

Вспышка 2017-04-21: анализ излучения в линиях бальмеровской серии водорода

Ю. А. Купряков,^{1,2,*} В. А. Малютин,^{3,†} К. В. Бычков,¹ А. Б. Горшков,¹ О. М. Белова⁴

¹Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга МГУ им. М. В. Ломоносова
Россия, 119234, Москва, Университетский пр-т, д. 13

²Астрономический институт Чешской академии наук

Чешская республика, 25165, Ондřejежов, ул. Фричова, 298

³Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра астрофизики и звездной астрономии

⁴Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра экспериментальной астрономии

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 15.01.2025; после доработки 16.02.2025; подписана в печать 12.03.2025)

Мы наблюдали солнечную вспышку класса В6.2 в активной области NOAA 12651 на спектрографе HSFA обсерватории Ondřejov в спектральных линиях водорода. После обработки спектров были определены интегральные потоки излучения в линиях H α , H β и H ϵ . В рамках модели нагретого газа выполнен теоретический расчёт параметров плазмы с учётом физических условий в хромосфере, включая самопоглощение в спектральных линиях. Объяснение наблюдаемых потоков требует представления о неоднородном газе. Согласие теоретических потоков с наблюдаемыми удаётся получить в модели наложения двух газовых слоёв. Позади находится газ с высокой концентрацией N в диапазоне от $3 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ до $3 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$, а между ним и наблюдателем — менее плотный слой, где $N = (3 - 6) \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Толщина слоев находится в диапазоне от 600 до 3000 км, температура между 4000 К и 7200 К, а турбулентная скорость от 0 до 90 км/с. Присутствие плотных областей означает происхождение источника наблюдаемого излучения из средней хромосферы, не выше 1000 км.

PACS: 97.10.Ex, 96.60.th, 96.60.Na. УДК: 524.3, 523.9

Ключевые слова: хромосфера, водород, бальмеровская серия, модель нагретого газа.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.80.2530801](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.80.2530801)

ВВЕДЕНИЕ

Солнечная вспышка представляет собой процесс, охватывающий по высоте слои атмосферы от короны до средней хромосферы. Из короны исходят гамма- и рентгеновские фотоны, в то время как разные слои хромосферы излучают в ультрафиолетовом и оптическом диапазонах спектра. Нижние слои средней хромосферы часто оказываются оптически плотными в частотах спектральных линий, что позволяет со значительно большей определённостью выполнить теоретическое восстановление параметров излучающей плазмы по сравнению со случаем прозрачной в линиях среды.

Обнаруженные более 150 лет назад, вспышки были известны в течение многих десятилетий как хромосферные явления, причем излучение в линии H α было наиболее значимой диагностикой происходящих физических процессов. Затем, с постепенным улучшением рентгеновских и EUV космических наблюдений, корональные аспекты вспышек также привлекли внимание. Общепринято, что вспышки являются результатом резкого высвобождения

энергии во время магнитного пересоединения в солнечной короне. Помимо вопросов о том, что вызывает пересоединение и как высвобождаемая энергия преобразуется в различные формы нагрева вспышки, транспортировка энергии вспышки через солнечную атмосферу и характеристики радиационного выхода вспышки по-прежнему являются важными и открытыми вопросами. Солнечная хромосфера, сложная область между солнечной фотосферой и короной, остается основным объектом интереса во время вспышек, поскольку она является местом основного выделения лучистой энергии в оптическом и ультрафиолетовом диапазоне спектра. Хромосферные вспышки указывают на локализованные области увеличения яркости в местах, где закреплены горячие петли магнитного поля, видимые в EUV и мягком рентгеновском диапазоне. Более того, они имеют тенденцию распространяться вертикально над нижней атмосферой. Хотя вспышки, как правило, являются трехмерными явлениями, анизотропия, вносимая магнитным полем во вспышечных петлях, позволяет нам использовать гораздо более простую 1D-модель. Реакция хромосферы на первичные процессы высвобождения и переноса энергии из короны в нижние слои атмосферы моделируется сложной не-ЛТР радиационной гидродинамикой (RHD). Этот подход описывает состояние

* E-mail: jurij.kupriakov@asu.cas.cz

† E-mail: malyutin@list.ru

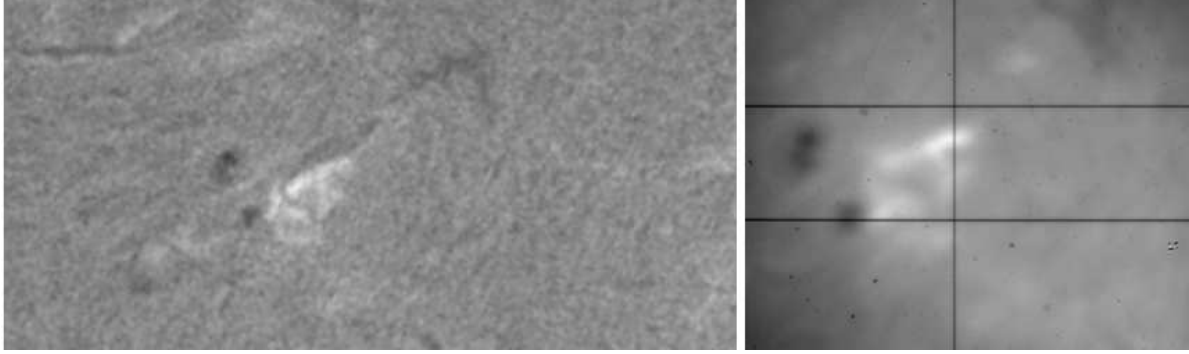


Рис. 1. NOAA 12651 (N12E35) (Kanzelhöhe observatory H α) 06:10:51 UT — слева, HSFA SJ (Ondřejov) 12:29:09 UT — справа. Расстояние между горизонтальными реперными линиями на правом снимке 5.38×10^4 км. Область на щели спектрографа, в которой определялись значения потоков в линиях, имеет размеры $(9.49 \times 10^3) \times (3.16 \times 10^3)$ км

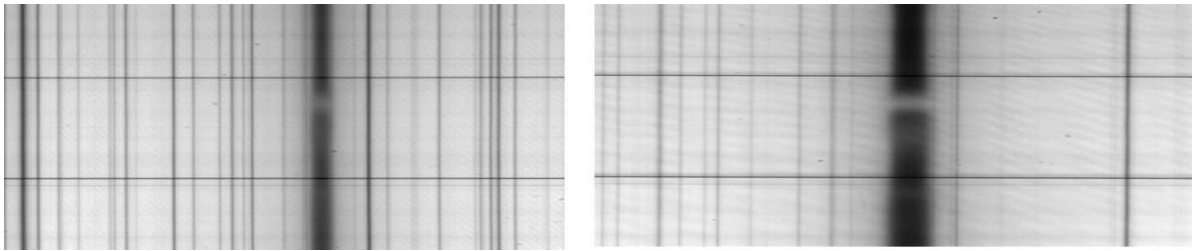


Рис. 2. Спектры в линиях H β (слева) и H α (справа). Горизонтальные линии являются реперными для определения масштаба

плазмы в петле вспышки и приводит к самосогласованно вычисляемому спектру, при этом принимается во внимание значительное влияние поля излучения на населенности дискретных энергетических уровней, состояние ионизации и связь излучения и вещества. Первые модели вспышек рассматривали не-ЛТР радиационный перенос приближенным образом и были разработаны в [1, 2], учитывали проводимость и нагрев атмосферы электронными пучками, распространяющимися в магнитном поле в рамках одномерного приближения. Они описали основные особенности динамической хромосферы, т.е. конденсацию, движущуюся вниз, и взрывное испарение вверх в горячую петлю. С тех пор такие 1D-модели еще больше совершенствовались. Так, в Университете Осло был разработан код RADYN [3, 4]. Он используется другими исследователями для моделирования излучения вспышек, например [5–7].

1. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Вспышка SOL2017-04-21 в активной области NOAA 12651 (N12E35; см. рис. 1) началась в 12:06, достигла максимального значения V6.2 в 12:16 и закончилась в 12:26 UT. Диапазон наших наблюдений охватывает период 12:29:04–12:30:00 UT, уже на фазе падения излучения. Наблюдения проводились нами на горизонтальной установке для исследования Солнца — HSFA-2 в обсерватории Ondřejov Астрономического института Чешской академии наук.

Были получены спектральные наблюдения в линиях водорода (H α , H β , H ϵ). На рис. 2 в качестве примера приведены спектры H α и H β .

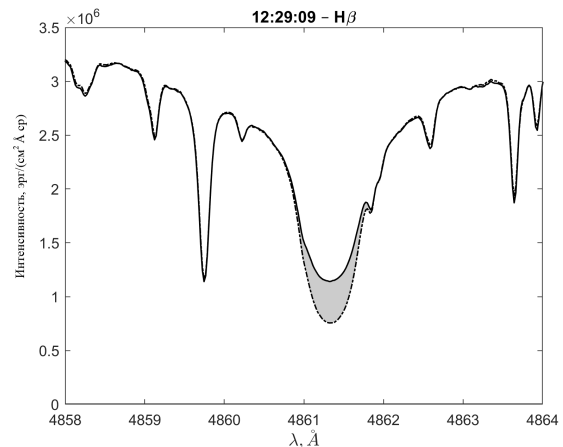


Рис. 3. К определению потока излучения в линии H β (заштрихованная область)

После учета темнового тока и плоского поля мы получили профили линий как в активной области, так и в области спокойного Солнца. Затем рассчитали потоки излучения в линиях (рис. 3). Измеренные значения потоков F в спектральных линиях и их отношение на выбранные моменты времени приведены в табл. 1.

Таблица 1. Наблюдаемые потоки в линиях в единицах $\text{эрг}/\text{см}^2 \cdot \text{с}$

UT	12:29:04	12:29:09	12:29:17	12:29:21	12:29:28	12:30:00
H α	4.25×10^6	4.32×10^6	4.91×10^6	5.50×10^6	4.64×10^6	5.07×10^6
H β	1.08×10^6	3.32×10^6	1.10×10^6	1.40×10^6	1.01×10^6	1.09×10^6
H ϵ	7.40×10^5	6.39×10^5	7.98×10^5	9.06×10^5	7.12×10^5	4.73×10^5
H α /H β	3.94	1.30	4.46	3.93	4.59	4.65
H ϵ /H β	0.69	0.19	0.73	0.65	0.70	0.43

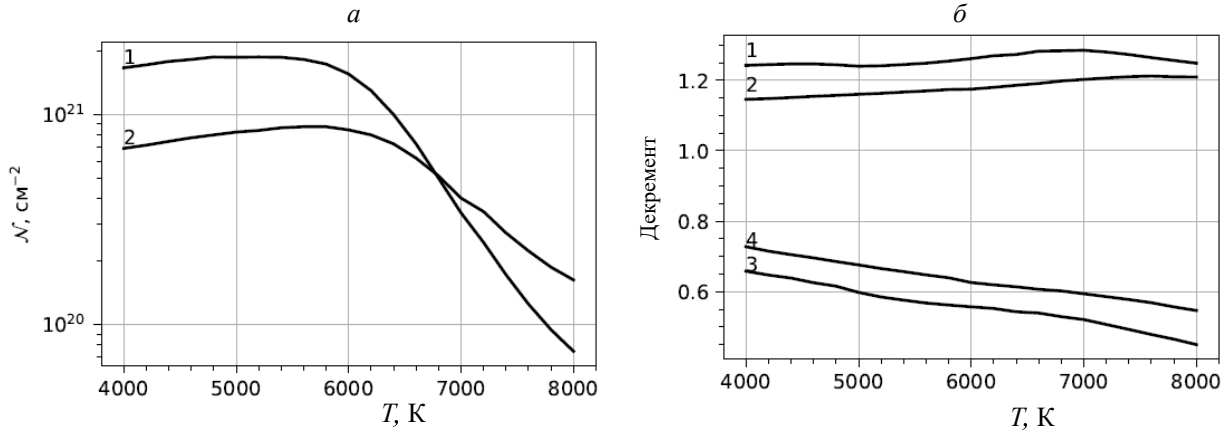


Рис. 4. Зависимости колонковой плотности $\mathcal{N}$ (см^{-2}) (а) и декремента (б) от температуры при фиксированном абсолютном потоке в линии $F(\text{H}\epsilon) = 7.1 \times 10^5 \text{ эрг}/\text{см}^2 \cdot \text{с}$. а — кривая 1 построена для толщины газового слоя 500 км; кривая 2 построена для толщины 5000 км; б — кривые 1, 3 построены для отношений $F_{\alpha\beta} = F(\text{H}\alpha)/F(\text{H}\beta)$ и $F_{\epsilon\beta} = F(\text{H}\epsilon)/F(\text{H}\beta)$ при толщине слоя 500 км; кривые 2, 4 построены для тех же отношений при толщине слоя 5000 км

2. МЕТОД РАСЧЁТА ИЗЛУЧЕНИЯ В ЛИНИЯХ

В настоящей работе мы приняли простую модель газовых слоёв, наложенных друг на друга по лучу зрения. Параметры слоёв — концентрацию N , толщину H , температуру газа T и турбулентную скорость v — мы подбирали таким образом, чтобы теоретические потоки были близки к наблюдаемым. Мы приняли модель газа, прозрачного в непрерывном спектре оптического диапазона, но испытывающего возможное самопоглощение в частотах спектральных линий. Населённости дискретных уровней и состояние ионизации водорода, необходимые для расчёта потока линейчатого излучения, определялись путём решения уравнений баланса, записанных для 18 уровней атома водорода. Согласно критерию Инглиса–Теллера максимальное значение главного квантового числа K в условиях хромосферы оказывается больше 30. Но в действительности можно ограничиться меньшим числом уровней. А именно, достаточно установить величину K , при которой достигается равновесие между ударной ионизацией и тройной рекомбинацией. Число K определялось по излучению в линиях. Меняя величину K , мы убедились, что при $K > 18$ изменение потоков с ростом K составляет менее 0.3%. При составлении уравнений балан-

са учитывались связанно-свободные, свободно-связанные и связанно-связанные ударные и радиационные переходы в поле чернотельного излучения с температурой 5700 К. Более подробное изложение применяемого нами алгоритма изложено в статьях [8, 9]. Атомные данные для водорода взяты из статьи [10]. Расчёт переноса излучения выполнен в рамках модели вероятности выхода фотона Соболева–Холстейна–Бибермана [11–13]; в качестве профилей поглощения спектральных линий атома водорода использовалась свёртка контуров Доплера и Хольцмарка.

3. МОДЕЛЬ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВСПЫШКИ

Покажем, что наблюдаемые потоки в трёх линиях водорода свидетельствуют о неоднородности излучающего газа. Для этого приведём результаты расчётов для случая однородного слоя с заданными толщиной H , концентрацией N , колонковой концентрацией $\mathcal{N} = N \times H$ и электронной температурой T .

На рис. 4, б кривыми 3–4 отложено отношение $F_{\epsilon\beta} = F(\text{H}\epsilon)/F(\text{H}\beta)$ как функции температуры для диапазона толщины от 500 км (кривая 3) до 5000 км (кривая 4). Параметры газа подбирались таким образом, чтобы теоретическое значе-

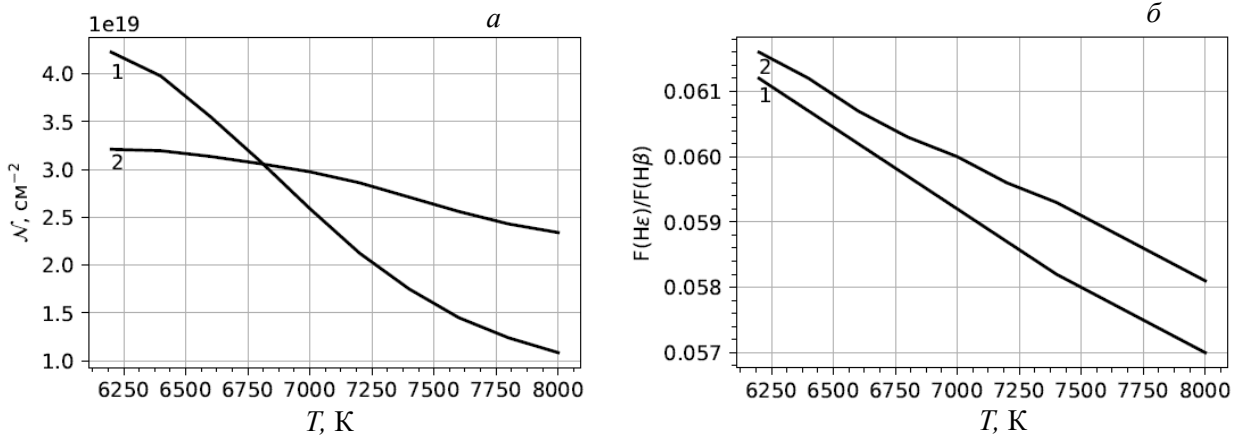


Рис. 5. Зависимости колонковой плотности $\mathcal{N}$ (см^{-2}) (а) и отношения $F_{\epsilon\beta} = F(\text{H}\epsilon)/F(\text{H}\beta)$ (б) от температуры при фиксированных абсолютных потоках $F(\text{H}\beta) = 1.01 \times 10^6 \text{ эрг/см}^2 \cdot \text{с}$ и $F(\text{H}\alpha) = 4.64 \times 10^6 \text{ эрг/см}^2 \cdot \text{с}$. На обеих панелях: кривая 1 построена для толщины газового слоя 500 км; кривая 2 построена для толщины 5000 км

ние потока в линии $\text{H}\epsilon$ равнялось наблюдаемому $F(\text{H}\epsilon) = 7.1 \times 10^5 \text{ эрг/см}^2 \cdot \text{с}$ в момент 12:29:28. Кривые 1 и 2 отображают соответствующее отношение $F_{\alpha\beta} = F(\text{H}\alpha)/F(\text{H}\beta)$. На рис. 4, а приведена колонковая концентрация газа $\mathcal{N}$. Объёмная концентрация N , соответствующая $\mathcal{N}$ и H , находится в диапазоне от $3 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ до $4 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Хорошо видно, что при согласии линий $\text{H}\beta$ и $\text{H}\epsilon$ ($F_{\epsilon\beta} = 0.70$) теоретическое отношение $F_{\alpha\beta}$ не согласуется с наблюдаемым: поток в линии $\text{H}\alpha$ всего на 20% больше, чем в $\text{H}\beta$, что является следствием сильного самопоглощения в линии $\text{H}\alpha$. Наблюдаемое большое отношение $F_{\alpha\beta} > 3.5$ получается для менее плотного газа с оптической глубиной в $\text{H}\alpha$ меньше единицы.

Для того же момента 12:29:28 график на рис. 5, а изображает связь между T и $\mathcal{N}$, при которой теоретические значения потока в линии $\text{H}\alpha$ и отношения $F_{\alpha\beta}$ равны наблюдаемым, соответственно, $4.64 \times 10^6 \text{ эрг/см}^2 \cdot \text{с}$ и 4.59. Соответствующая объёмная концентрация лежит в диапазоне от $6.5 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ до $1.1 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Отношение $F_{\epsilon\beta} < 0.07$, приведённое на рис. 5, б, в этом случае значительно меньше наблюдаемого 0.7. Таким образом, мы приходим к выводу, что излучение в линиях $\text{H}\alpha$ и $\text{H}\epsilon$ формируется в областях с разной плотностью газа.

Наблюдаемые потоки в трёх линиях удалось объяснить в рамках системы из двух слоёв — плотного и разреженного, причём разреженный слой находится между плотным слоем и наблюдателем. В табл. 2 приведены теоретические значения для двух слоёв: концентрация $N_{1,2}$; толщина слоя $H_{1,2}$; температура $T_{1,2}$; турбулентная скорость $v_{1,2}$. Приведённые числа можно объяснить в модели плотного холодного ядра ($N_1 > 3 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$), окруженного нагретой разреженной оболочкой ($N_2 < 10^{11} \text{ см}^{-3}$, за исключением $N_2 = 3.5 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ в момент 12:29:09). Большая величина турбулентной скорости v_2 , возможно, свидетельствует о расширении оболочки либо об её испарении. Ясно, что плотные ядра могли об-

разоваться только в достаточно глубоких слоях атмосферы, не выше средней хромосферы.

Низкая теоретическая температура холодного ядра ($\approx 4000 \text{ К}$) является следствием высокой величины отношения $F_{\epsilon\beta}$. Это иллюстрирует рис. 4: с увеличением температуры линия $\text{H}\epsilon$ существенно ослабляется по сравнению с $\text{H}\beta$ при условии фиксированного значения $F(\text{H}\epsilon)$. Основная причина заключается в относительно небольшой величине абсолютного потока в линиях. Отношение $F_{\epsilon\beta}$ можно приблизить к наблюдаемому и при высоких температурах, $T > 6000 \text{ К}$, но ценой значительного увеличения абсолютных потоков. Теоретические значения получаются значительно больше наблюдаемых, что иллюстрирует рис. 6. На панели б по вертикальной оси приведено отношение $F_{\epsilon\beta}$ как функция температуры, а на панели а — абсолютная величина потока в линии $\text{H}\beta$, вычисленная для двух значений толщины слоя: 500 км и 5000 км. Наблюдаемые значения абсолютного потока и $F_{\epsilon\beta}$ отмечены точечной горизонтальной линией. Хорошо видно, что согласие теоретического и наблюдаемого значений потока может осуществиться только при низких температурах. Причиной столь низкой температуры вспышечного газа может быть его постепенное охлаждение после первоначального нагрева. Этот газ в силу его прозрачности в частотах непрерывного спектра слабо нагревается фотосферным излучением и может стать холоднее фотосферы.

Повышенная яркость области (рис. 1) с низкотемпературным газом свидетельствует о том, что сквозь неё проникает излучение фотосферы и мы наблюдаем суммарное излучение вспышечного газа и фотосферы. Это может быть следствием фрагментированной структуры вспышки с высокой скважностью, например в форме системы тонких волокон. Относительно высокая плотность оболочки в момент 12:29:09 может быть следствием случайного частичного перекрытия таких волокон.

Рентгеновское излучение вспышки зарегистриро-

Таблица 2. Теоретические потоки F (эрг/см²с) исследуемых линий, а также параметры излучающих слоев активной области. Индекс 1 у параметров соответствует далекому слою, индекс 2 — близкому слою от наблюдателя. Моменты времени указаны в UT. Концентрация газа N указана в см⁻³, толщина слоев H в км, температура газа T в К, турбулентная скорость v в км/с

UT	12:29:04	12:29:09	12:29:17	12:29:21	12:29:28	12:30:00
$F(\text{H}\alpha)$	4.25×10^6	4.37×10^6	4.89×10^6	5.58×10^6	4.64×10^6	5.08×10^6
$F(\text{H}\beta)$	1.36×10^6	3.32×10^6	1.43×10^6	1.56×10^6	1.39×10^6	1.49×10^6
$F(\text{H}\epsilon)$	7.40×10^5	6.39×10^5	7.98×10^5	9.06×10^5	7.12×10^5	4.73×10^5
N_1 , см ⁻³	1.05×10^{13}	3.80×10^{12}	1.20×10^{13}	2.35×10^{13}	1.20×10^{13}	9.80×10^{12}
N_2	5.30×10^{10}	3.50×10^{11}	5.00×10^{10}	6.00×10^{10}	5.10×10^{10}	5.70×10^{10}
H_1 , км	1200	1200	1300	1000	1000	600
H_2	2600	3000	3000	3000	3000	3000
T_1 , К	4000	6200	4000	4000	3900	3900
T_2	6200	6900	7200	6000	5800	5700
v_1 , км/с	0	0	0	0	0	0
v_2	60	28	80	80	85	90

Таблица 3. Сравнение оптических и рентгеновских светимостей излучения. $F(X)$ — поток в рентгеновском диапазоне по данным полосы 1–8 Å аппарата GOES, приведенный к околоземному пространству (эрг/с см²). $L(X)$, $L(\text{opt})$ — соответствующие мощности рентгеновского и оптического излучений в линиях (в эрг/с)

UT	12:29:04	12:29:09	12:29:17	12:29:21	12:29:28	12:30:00
$F(X)$	3.48×10^{-4}	3.44×10^{-4}	3.41×10^{-4}	3.41×10^{-4}	3.41×10^{-4}	3.38×10^{-4}
$L(X)$	9.8×10^{23}	9.7×10^{23}	9.7×10^{23}	9.6×10^{23}	9.6×10^{23}	9.6×10^{23}
$L(\text{opt})$	1.82×10^{24}	2.48×10^{24}	2.04×10^{24}	2.34×10^{24}	1.91×10^{24}	1.99×10^{24}

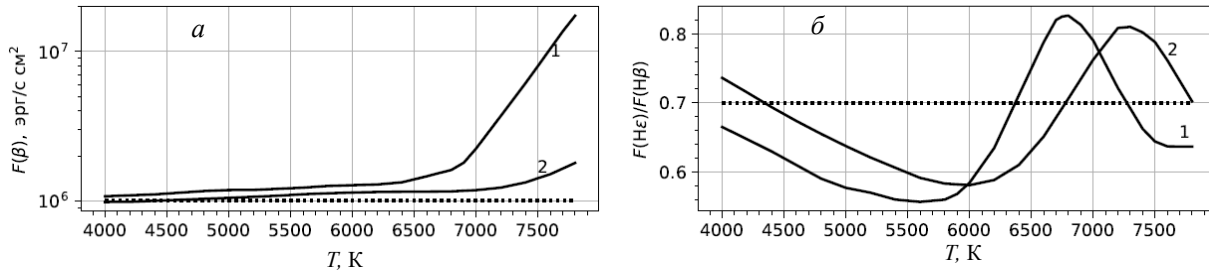


Рис. 6. Зависимости теоретического потока $F(\text{H}\beta)$ (эрг/см² с; панель а) и отношения $F_{\epsilon\beta} = F(\text{H}\epsilon)/F(\text{H}\beta)$ (панель б) от температуры при фиксированной концентрации N . На обеих панелях: кривая 1 построена для толщины газового слоя 500 км и $N = 3.45 \times 10^{13}$ см⁻³; кривая 2 построена для толщины 5000 км и $N = 1.43 \times 10^{12}$ см⁻³. Точечная горизонтальная прямая соответствует наблюдаемым значениям на момент 12:29:28 UT

вано аппаратом GOES в полосе 1–8 Å. Во второй строке табл. 3 приведены взятые из базы данных GOES ¹ рентгеновские потоки $F(X)$ у поверхности Земли в единицах эрг/с/см², а в третьей строке — соответствующие им светимости $L(X)$. Четвёртая строка содержит светимость $L(\text{opt})$ в наблюдаемых оптических линиях, вычисленную по их потокам из табл. 1, при этом размеры области оптического излучения приняты равны-

ми $(9.49 \times 10^3 \text{ км}) \times (3.16 \times 10^3 \text{ км})$ в соответствии с подписью к рис. 1. Так же, как в нашей предыдущей работе [14], сравнение полученных значений $L(X)$ и $L(\text{opt})$ показывает, что рентгеновское излучение не сильнее оптического и поэтому оно не может быть основным энергетическим источником оптической вспышки. Им может быть либо нагрев МГД-волнами, поднимающимися из конвективной области, либо ионизация и нагрев надтепловыми частицами, проникающими из активной области короны.

¹ <https://www.ncei.noaa.gov/data/goes-space-environment-monitor>

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулируем основные выводы работы.

1. В рамках модели двухкомпонентного газа удаётся получить набор теоретических потоков в спектральных линиях, близких к наблюдаемому.
2. Восстановление параметров показало, что в пяти эпизодах есть плотный ($N > 10^{13} \text{ см}^{-3}$) холодный ($T \approx 4000 \text{ K}$) слой и разреженный ($N < 10^{11} \text{ см}^{-3}$), но более нагретый ($T > 5700 \text{ K}$), причём разреженный слой расположен ближе к наблюдателю.

3. Слои имеют фрагментированную структуру, так что излучение фотосферы проникает между участками плотных слоёв, не прозрачных в спектральных линиях, и излучение вспышечного газа складывается с излучением фотосферы.

Авторы благодарят коллективы GOES, Ondřejov Observatory и Kanzelhöhe observatory за предоставленную возможность проведения наблюдений и использования данных.

Работа выполнена в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова

-
- | | |
|--|--|
| <p>[1] Fisher G.H., Canfield R.C., McClymont A.N. // <i>ApJ</i>. 289. 414 (1985).</p> <p>[2] Fisher G.H., Canfield R.C., McClymont A.N. // <i>ApJ</i>. 289. 434 (1985).</p> <p>[3] Carlsson M., Stein R.F. // <i>ApJ</i>. 397. L59 (1992).</p> <p>[4] Carlsson M., Stein R.F. // <i>ApJ</i>. 481. 500 (1997).</p> <p>[5] Abbett W.P., Hawley S.L. // <i>ApJ</i>. 521. 906 (1999).</p> <p>[6] Allred J.C., Hawley S.L., Abbett W.P., Carlsson M. // <i>ApJ</i>. 630. 537 (2005).</p> <p>[7] Kowalski A.F., Hawley S.L., Carlsson M. et al. // <i>Solar Phys.</i> 290. 3487 (2015).</p> | <p>[8] Белова О.М., Бычков К.В. // <i>Астрофизика</i>. 61, N 2. 255 (2018).</p> <p>[9] Купряков Ю.А., Бычков К.В., Белова О.М. и др. // <i>Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.</i> 79(2). 2420801. (2024).</p> <p>[10] Johnson L.C. // <i>ApJ</i>. 174. 227 (1972).</p> <p>[11] Биберман Л.М. // <i>ЖЭТФ</i>. 17. 416 (1947).</p> <p>[12] Holstein T. // <i>Phys. Rev.</i> 72. 1212 (1947).</p> <p>[13] Holstein T. // <i>Phys. Rev.</i> 83. 1159 (1951).</p> <p>[14] Малютин В.А., Купряков Ю.А., Бычков К.В. и др. // <i>Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.</i> 80, № 1. 2510801 (2025).</p> |
|--|--|

Analysis of Balmer series emission in the solar flare SOL2017-04-21

Yu. A. Kupryakov^{1,2,a}, V. A. Maliutin^{3,b}, K. V. Bychkov¹, A. B. Gorshkov¹, O. M. Belova⁴

¹Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119234, Russia

²Astronomical Institute of the Czech Academy of Sciences
Ondřejov, 251 65, The Czech Republic

³Department of astrophysics and stellar astronomy, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University

⁴Department of experimental astronomy, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^ajurij.kupriakov@asu.cas.cz, ^bmalyutin@list.ru

We observed B6.2 class solar flare in the NOAA 12651 active region on HSFA spectrograph of Ondřejov observatory in hydrogen spectral lines. After processing the spectra, we determined integral radiation fluxes in the H α , H β and H ϵ lines. Within the approach of heated gas model theoretical reconstruction of plasma parameters was performed taking into account the physical conditions in the chromosphere comprising self-absorption in spectral lines. Treating the observed fluxes leads to the consideration of inhomogeneous gas. Matching of theoretical fluxes with observed ones is achieved in the framework of two gas layers. Dense gas with concentration N ranging from $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ to $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ is located behind the rarefied layer with $N = (3 \div 6) \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. Layer thickness varies from 600 to 3000 km, temperature ranges from 4000 to 7200 K, and turbulent velocity — from 0 to 90 km/s. The presence of the dense region reveals the chromospheric origin of the gas.

PACS: 97.10.Ex, 96.60.th, 96.60.Na.

Keywords: chromosphere, hydrogen, Balmer series, heated gas model.

Received 15 January 2025.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2025. **80**, No. . Pp. .

Сведения об авторах

1. Купряков Юрий Алексеевич — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; e-mail: jurij.kupriakov@asu.cas.cz.
2. Малютин Виктор Александрович — аспирант; тел.: e-mail: malyutin@list.ru.
3. Бычков Константин Вениаминович — доктор физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: bychkov@sai.msu.ru.
4. Горшков Алексей Борисович — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; e-mail: gorshkov@sai.msu.ru.
5. Белова Оксана Михайловна — канд. физ.-мат. наук, ассистент; e-mail: belova.oksana@physics.msu.ru.