

Моделирование излучения вспышки 27.04.2012 в спектральных линиях водорода, гелия и кальция

Ю. А. Купряков,^{1,2} К. В. Бычков,¹ О. М. Белова,³ В. А. Малютин,^{4,*} А. Б. Горшков¹

¹Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга (ГАИШ МГУ). Россия, 119234, Москва, Университетский пр-т, д. 13

²Астрономический институт Чешской академии наук. Чехия, Ондржейов

³Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра экспериментальной астрономии

⁴Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра астрофизики и звездной астрономии Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 22.11.2023; после доработки 26.01.2024; подписана в печать 23.02.2024)

В работе приведены результаты анализа наблюдений вспышки SOL2012-04-27 на горизонтальной солнечной установке HSFA-2 обсерватории Ондржейов (Астрономический институт Чешской академии наук) в спектральных линиях водорода, гелия и кальция. После обработки спектров были определены интегральные потоки излучения в линиях. Наблюдения интерпретируются в рамках предположения о быстром выделении энергии внутри хромосферы, сопровождающемся разлётом газа. В рамках модели нагретого газа выполнен теоретический расчет параметров плазмы с учётом физических условий в хромосфере, включая самопоглощение в спектральных линиях. Сопоставление сразу по шести линиям позволило с большой степенью уверенности восстановить температуру T , плотность и пространственную структуру излучающего газа. Наилучшее согласие теории с наблюдениями получается в модели разлёта неоднородных облаков, в каждом из которых есть области горячие ($T \approx 18000 \div 19500$ K) и менее нагретые ($T \approx 8000 \div 9000$ K). В среднем одно облако даёт около десяти процентов в полный поток излучения.

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

Ключевые слова: вспышки; бальмеровская серия водорода; линии гелия HeI; линии иона CaII.

10.55959/MSU0579-9392.79.2420801

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы излучение солнечных вспышек исследуется во всем электромагнитном диапазоне как космическими, так и наземными приборами. Излучение в наиболее ярких линиях атомов водорода, гелия, ионов кальция, железа и некоторых других элементов является важнейшим фактором как для объяснения источников энергии вспышки, так и для моделирования потоков и профилей линий (например, программный код MULTI [1] и созданный на его основе код RADYN [2], [3]). Постановка задачи, связанная с характеристиками излучения, требует знания полного набора атомных данных химических элементов, чьи спектральные линии или континуум исследуются.

Атомные данные кода MULTI для водорода, гелия и кальция указаны в составе приложений работы [1]. Модель водорода содержит 6 дискретных уровней, гелия — 9 уровней, иона кальция — 5 уровней [3]. В [4] приведены моделируемые кривые блеска и профили линий H I, He II и Ca II в рамках условий, характерных для солнечной вспышки.

В работе [5] проводится моделирование излучения в ходе слабой вспышки 07.06.1991. Модель атома водорода включает 10 уровней, гелия — 13 уровней, иона Ca II — 5 уровней. Ударные скорости водорода взяты из [6], для перехода Ly α использовались теоретические результаты из [7], для переходов Ly β и H α — результаты из [8] и [9]. Силы осциллятора взяты из [6]. Для переходов H, K Ca II коэффициенты Эйнштейна взяты из [10], ударные скорости посчитаны на основе экспериментальных сечений [11], штарковские ширины от ударов с атомами водорода — из [12] и экспериментальные штарковские ширины — из [13]. Построены полуэмпирические модели профилей линий K Ca II и H δ с учетом поля скоростей.

Недавнее обнаружение тонких магнитных петель в хромосфере с температурой около миллиона градусов [14], из оснований которых наблюдались выбросы горячей плотной плазмы, свидетельствует о возможности нагрева плазмы и ускорения частиц непосредственно в хромосфере. Дополнительным фактором возникновения в хромосфере спорадических процессов ускорения частиц и нагрева плазмы может служить обнаружение мощного терагерцового излучения из активных областей [15]. Анализ показывает [16], что для терагерцового излучения наиболее вероятен плазменный механизм, ре-

* E-mail: malyutin@list.ru

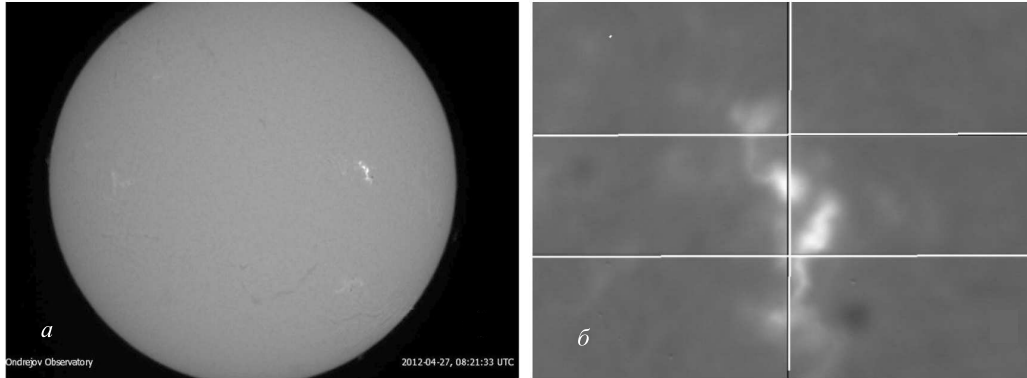


Рис. 1. Фильтрограммы солнечной хромосферы в линии $H\alpha$ 27.04.2012 08:21:33 UT с активной областью NOAA 11465 S18 W53 (Ondřejov Observatory): *a* — целый диск; *б* — область вспышки — вертикальная линия соответствует положению щели спектрографа, две горизонтальных линии служат для привязки изображения вспышки к спектрам (расстояние между ними соответствует 5.39×10^4 км)

лизующийся в плотных компактных и очень горячих источниках, расположенных на хромосферных уровнях с концентрацией плазмы порядка $10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Указанные обстоятельства в значительной степени определяют интерес к механизмам нагрева хромосферы.

Работа состоит из пяти разделов. В разд. 1 сообщается о наблюдательных данных вспышки, в разд. 2 говорится о модели излучения, источниках нагрева хромосферы и атомных данных, далее проводится сравнение расчетов с наблюдениями и интерпретация результатов (разд. 3), итоги отражены в заключении.

1. НАБЛЮДЕНИЯ

Объектом наблюдений являлась активная область NOAA 11465, в которой 27.04.2012 произошла вспышка класса M1.0. Ее начало по Всемирному времени (UT) пришлось на 08:15, максимум — 08:24 и конец — 08:29. Все спектральные наблюдения были выполнены на обсерватории Чешской академии наук (Ondřejov) на горизонтальной установке для исследования Солнца — Horizontal-Sonnen-Forschungs-Anlage (HSFA-2, 500 мм/35 м). Изображение вспышечной области представлено на рис. 1. Мы также использовали данные SDO AIA и рентгеновские наблюдения на аппарате GOES. Из рентгеновских данных, полученных на спутнике GOES, мы выбрали четыре момента в области максимума вспышки (рис. 2, помечены вертикальными линиями). Исследуемая область находится на щели спектрографа (вертикальная линия, рис. 1, б, между двух горизонтальных линий). Во время вспышки в ней наблюдалось усиление излучения длительностью около пяти минут в оптическом и рентгеновском диапазонах спектра. Были получены спектры в шести линиях: H CaII, H ϵ , H β , HeI D3, H α , CaII IR 8542 Å, примеры которых приведены на рис. 3. После редукции спектров были определены потоки излучения в спектральных линиях (пример профи-

ля, по которому был рассчитан интегральный поток в линии $H\alpha$, показан на рис. 4).

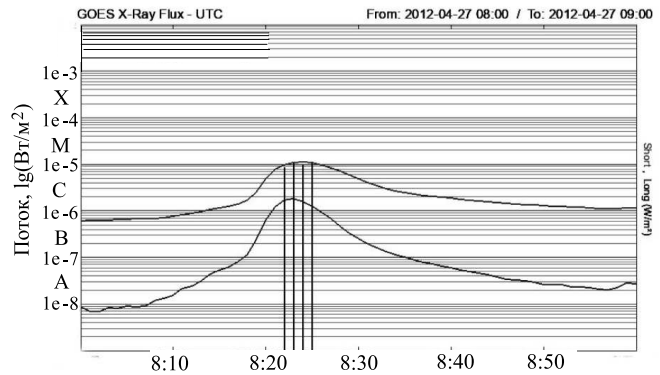


Рис. 2. Графики потока рентгеновского излучения GOES от времени UT содержат средние значения солнечного рентгеновского излучения за 1 мин в полосах пропускания 1 – 8 Å (верхняя кривая) и 0.5 – 4.0 Å (нижняя). Вертикальные линии соответствуют выбранным в настоящей работе моментам времени

В табл. 1 приведены потоки излучения на поверхности Солнца в спектральных линиях атомов водорода, гелия и иона CaII между моментами времени 08:22:29 и 08:25:17. Наблюдаемые потоки в линиях бальмеровской серии H α , H β и H ϵ обозначены, соответственно, F_{α}^o , F_{β}^o и F_{ϵ}^o , потоки в линии D3 атома гелия — F_{D3}^o , в линии H иона CaII — F_H^o и F_{IR}^o — в его инфракрасной линии $\lambda = 8542$ Å. Потоки рентгеновского излучения на уровне Земли в это время равны $F_{1E} \approx 10^{-5} \text{ Вт/м}^2$ в полосе 1 ÷ 8 Å и $F_{2E} \approx 2 \times 10^{-6} \text{ Вт/м}^2$ в полосе 0.5 ÷ 4 Å. Для удобства дальнейшего изложения в табл. 1 также приведены наблюдаемые значения отношений $R_{\alpha}^o = F_{\alpha}^o/F_{\beta}^o$, $R_{\epsilon}^o = F_{\epsilon}^o/F_{\beta}^o$ и $R_D^o = F_{\alpha}^o/F_{D3}^o$.

В течение всего периода наблюдений профиль линии H α имеет два пика (рис. 4) с отрицательным и положительным значениями доплеровских сдвигов. Это свидетельствует о присутствии двух по-

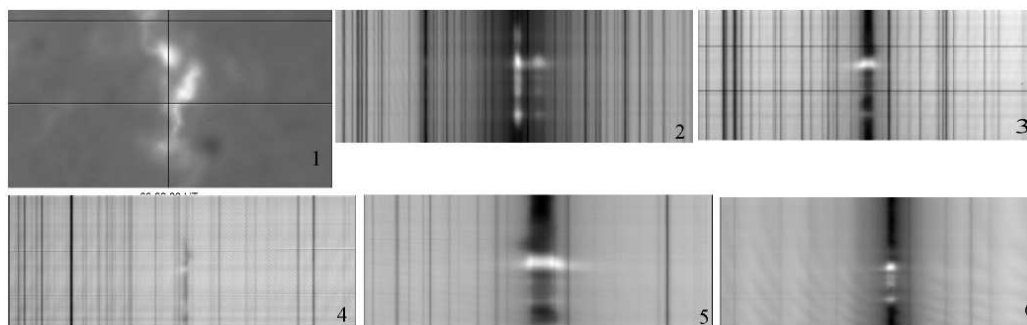


Рис. 3. Пример фильтрограммы в линии $H\alpha$ (1) и полученных спектров в линиях $H\text{ CaII}$ и $H\epsilon$, $H\beta$, $HeI\ D3$, $H\alpha$, $CaII\ IR\ 8542\ \text{\AA}$ (2–6) на установке HSFA-2 на момент 08:22:29 UT. На спектрах справа находится область длинных волн, слева — коротких

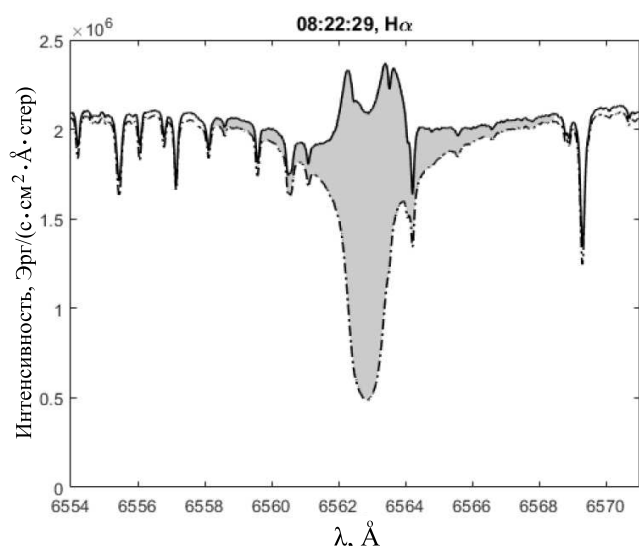


Рис. 4. Пример профиля линии $H\alpha$ и вычисления потока излучения в момент 08:22:29 UT. Профиль спектральной линии в активной (сплошная линия) и спокойной (штрих-пунктирная линия) хромосфере. Заштрихованная часть соответствует потоку в линии $H\alpha$

токов газа, движущихся в разных направлениях. Газ, показывающий отрицательный сдвиг, стремится к короне, а газ с положительным сдвигом движется к фотосфере. Это хорошо видно на рис. 5, причем левое крыло аппроксимировано двумя гауссианами, а правое — одним. Это связано с тем, что при таком варианте получается лучшее соответствие с наблюдаемым профилем линии $H\alpha$.

2. МОДЕЛЬ ИЗЛУЧЕНИЯ В ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ

Покажем, что рентгеновское излучение не может быть существенным источником энергии для оптического излучения вспышки. Для этого сопоставим мощность в рентгеновском диапазоне и оптике в момент времени 08:22:29. Суммарный поток в линиях (второй столбец табл. 1) равен

Таблица 1. Наблюдаемые потоки ($\text{эрг}/\text{см}^2\ \text{с}$) в эмиссионных линиях $H\alpha$, $H\beta$, $H\epsilon$, $H\text{ CaII}$, $IR\ CaII\ (\lambda = 8542)$ и $D3\ HeI^a$ и относительные потоки R_α^o , R_ϵ^o , R_D^o ; (a) — линия видна в поглощении

Эпизод	1	2	3	4
Время(UT)	08:22:29	08:23:29	08:24:17	08:25:17
F_α^o	4.34×10^7	3.52×10^7	2.50×10^7	2.37×10^7
F_β^o	3.31×10^7	2.40×10^7	1.65×10^7	1.46×10^7
F_ϵ^o	1.63×10^7	1.22×10^7	8.14×10^6	7.35×10^6
R_α^o	1.31	1.47	1.52	1.62
R_ϵ^o	0.49	0.51	0.49	0.50
F_H^o	2.09×10^7	1.69×10^7	1.31×10^7	1.24×10^7
F_{IR}^o	1.26×10^7	1.16×10^7	1.03×10^7	9.65×10^6
F_{D3}^o	2.37×10^5	5.28×10^5	8.06×10^5	1.32×10^6
R_D^o	183	67	31	18

$F_L = 1.3 \times 10^8\ \text{эрг}/\text{см}^2\ \text{с}$. С другой стороны, пересчитывая F_{1E} и F_{2E} к значениям на поверхности Солнца и складывая их, получаем величину $F_{XS} \approx 4 \times 10^6\ \text{эрг}/\text{см}^2\ \text{с}$, что в тридцать раз меньше, чем F_L . Остаются два других механизма, много лет рассматриваемые в литературе: пересоединение магнитного поля ([17], [18]) и затухание магнитогиродинамических (МГД) волн, генерируемых в подфотосферных слоях ([19], [20]). В обоих вариантах по предположению происходит быстрое, взрывное выделение энергии. Газ нагревается, кроме того, обусловленное нагревом увеличение давления приводит к его расширению. В результате появляется движение газа в обоих направлениях — снизу вверх и сверху вниз, которое может объяснить наблюдаемое расщепление линии $H\alpha$ на «синий» и «красный» компоненты (рис. 5).

Возможны три источника нагрева и ионизации хромосферного газа: диссипация магнитогиродинамических волн, генерируемых в конвективной зоне ([19, 20]), воздействие потока надтепловых частиц из короны [21] и ударные волны, вызванные разлётом газа. В настоящей работе мы моделируем излучение нагретого хромосферного газа в ли-

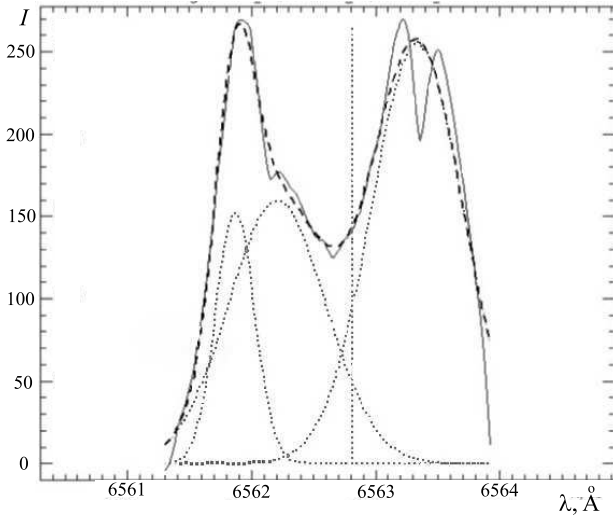


Рис. 5. Интенсивность линии $H\alpha$ в условных единицах в шкале длин волн. Измеренные значения доплеровских скоростей: $V_1 = -42.9$ км/с, $V_2 = -27.5$ км/с, $V_3 = 24.0$ км/с. Пунктирные линии показывают аппроксимацию профиля тремя гауссианами, штриховая линия показывает их сумму, сплошная кривая соответствует наблюдаемому профилю

ниях атомов водорода, гелия и иона $CaII$, задавая набор стационарных слоёв с определёнными значениями температуры, турбулентной скорости, плотности и толщины. Это предположение ближе всего к джоулевой диссипации, но такие слои присутствуют также и в двух других моделях. Параметры газа подбираем таким образом, чтобы максимально приблизить теоретические потоки в спектральных линиях к наблюдаемым.

Расчёты выполняем для условий в солнечной хромосфере, газ которой прозрачен в непрерывном спектре оптического диапазона, но возможно самопоглощение в частотах спектральных линий. Концентрации ионов и атомов и населённости их дискретных уровней контролируют связанно-свободные, свободно-связанные и связанно-связанные переходы под действием излучения фотосферы и электронных ударов. Излучение фотосферы моделируем чёрным телом с температурой 5500 К. В фотоионизацию иона $CaII$, помимо фотосферы, дают вклад хромосферные эмиссионные линии лаймановской серии старше $Ly\beta$ [22, 23], поэтому нельзя говорить, что скорость фотоионизации кальция определяется температурой 5500 К. Вклад хромосферных линий мы учитываем также в рамках модели чернотельного излучения. Соответствующий модельный параметр — температуру черного тела T_{Ca} — выражаем в кельвинах. Учёт рассеяния в спектральных линиях выполняется в рамках подхода Бибермана–Соболева–Холстейна [25–27]. Уравнения заселения дискретных уровней описаны в [28] на примере атома водорода. Ниже изложим модели атомов водорода, гелия и иона $CaII$.

- Водородные вероятности радиационных пере-

ходов, скорости ударной ионизации, тройной рекомбинации, ударного возбуждения и деактивации взяты нами из [6]. Сечения фотоионизации и фоторекомбинации взяты в приближении Крамерса. В качестве профилей линий используется свёртка контуров Доплера и Хольцмарка. В плазме с электронной плотностью не больше 3×10^{11} см $^{-3}$ по критерию Инглиса–Теллера число реализуемых уровней M может достигать тридцати и более. Мы провели исследование влияния числа учитываемых уровней на спектр излучения бальмеровской серии и установили, что при $M \geq 16$ теоретические потоки в линиях по мере увеличения M меняются не более, чем на 0.2%. Это обусловлено термализацией уровней при конкуренции ударной ионизации и тройной рекомбинации. В наших расчётах принято $M = 18$ в отличие от кода RADYN [3], где $M = 5$.

- В настоящей работе рассматриваются 29 дискретных уровней гелия (главное квантовое число $1 \leq n \leq 5$; орбитальное квантовое число $0 \leq l \leq n - 1$); значения энергии уровней взяты из NIST [29]. Атомные данные как радиационных, так и ударных процессов получены из программы АТОМ [30]. Коэффициенты лоренцевского уширения взяты из книги [31].
- Модель иона $CaII$ включает 22 дискретных уровня. Уровни с главным квантовым числом $n \leq 6$, называемые индивидуальными, показаны на рис. 6; у состояний $3d$ и $4p$ учитывается тонкая структура: $3d^2D_{3/2,5/2}$; $4p^2P_{1/2,3/2}$. Уровни $7 \leq n \leq 10$ считаем водородоподобными. Значения энергий получены из NIST [29]. Силы осциллятора в поглощении взяты из трех источников: NIST [29], TOPBASE [32] и [33], а для переходов между высокими уровнями использовались силы осциллятора водорода из [6]. Сечения фотоионизации с индивидуальных уровней взяты из TOPBASE [32], а у водородоподобных используется приближение Крамерса. Профили спектральных линий переходов $4s-4p$, $3d-4p$ полагались фойгтовскими; для остальных переходов профили считались доплеровскими. Ударные переходы описываются эффективными силами ударов Υ_{ij} , которые были взяты из [34]. При переходах между индивидуальными уровнями расчет скорости производился только через эффективные силы удара из указанной статьи, если они есть; в случае отсутствия данных у запрещенных переходов полагалось $\Upsilon_{ij} = 1$, у разрешенных применялась формула Режемотера [35]. Переходы между водородоподобными уровнями описываются формулой Режемотера. Сечения для тепловой ионизации электронным ударом со всех уровней взяты из книги Кокса [36].

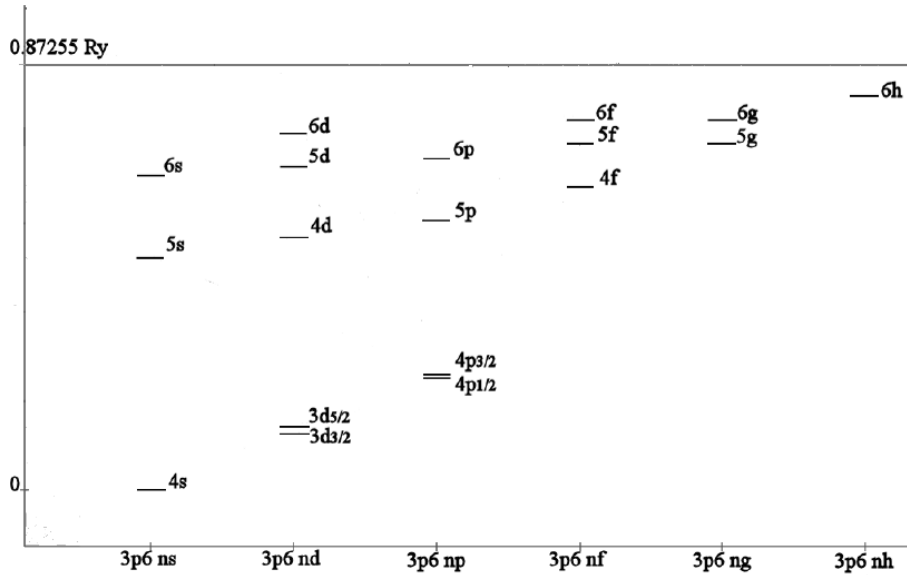


Рис. 6. Диаграмма Гротриана индивидуальных энергетических уровней CaII. По вертикали отложена энергия в ридбергах: нулевой уровень соответствует основному состоянию, потенциал ионизации отмечен серой горизонтальной линией (0.87255 Ry). По горизонтали меняется орбитальное квантовое число

3. СОПОСТАВЛЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И НАБЛЮДАЕМЫХ ПОТОКОВ

Теоретическая интерпретация потоков, приведённых в табл. 1, позволяет получить представление о плотности, температуре и пространственной структуре слоёв, излучающих в оптических линиях.

Сначала покажем, что наблюдаемые потоки не могут быть объяснены в модели однородного слоя. В табл. 2 для первых трёх эпизодов приведены величины отношения наблюдаемого F_α^o и теоретического F_α^t значений абсолютного потока в линии $H\alpha$, когда совпадают теоретические и наблюдаемые отношения R_α и R_ϵ . Во всех трёх случаях теоретические значения абсолютных потоков оказываются значительно меньше наблюдаемых. Четвёртый эпизод в таблицу не включён, так как в нём не удаётся согласовать с наблюдениями теоретические отношения R_α^t и R_ϵ^t .

Эпизод	1	2	3
F_α^o/F_α^t	11.7 ÷ 12.8	8.8 ÷ 9.8	7.9 ÷ 10.5

Таблица 2. Диапазон отношений теоретического F_α^t и наблюдаемого F_α^o абсолютных потоков в линии $H\alpha$ при условии совпадения теоретических отношений R_α^t и R_ϵ^t с наблюдаемыми R_α и R_ϵ

Исходя из этих результатов, примем модель облачной структуры. В ней оптическое излучение газа во время вспышки складывается из потоков от нескольких компактных облаков, причём в силу относительно малых размеров облаков можно пренебречь их наложением друг на друга на луче зрения.

Убедимся, что одновременный учёт линий водорода и гелия невозможен в модели однородных облаков. Для этого выполним расчёты в диапазоне температур от 12000 К до 15000 К, подбирая концентрацию таким образом, чтобы для каждой температуры имело место равенство теоретического и наблюдаемого значений R_D . Результаты расчётов приведены на рис. 7 в виде диаграммы $R_\alpha-R_\epsilon$. Квадратами помечены данные наблюдений. Размер квадратов и стили кривых соответствуют конкретному моменту наблюдений.

Хорошо видно, что ни одна кривая не проходит через «свою» наблюдаемую точку. В расчётах толщина облака принята равной 100 км, её изменение в пределах 30 ÷ 200 км либо изменение диапазона рассматриваемой температуры не меняет выводов. Таким образом, необходимо принять, что каждое облако состоит из нескольких слоёв с разной температурой и концентрацией.

Значительная часть наблюдательных данных, приведённых в табл. 1, объясняется в модели двухслойных облаков. Каждое облако состоит из двух слоёв — горячего и холодного. Одна часть облаков летит из некоторого центра на нас, а другая — в противоположном направлении. Полагаем, что в облаках, движущихся на нас, холодный слой находится ближе к наблюдателю, чем горячий, а в удаляющихся облаках — наоборот, горячий слой расположен между холодным слоем и наблюдателем. Назовём распределение температуры в облаках первого типа прямым, а второго — инверсным.

В случае первых трёх моментов доминирует излучение летящих на нас облаков. В табл. 3 приведены параметры гипотетических облаков, а в табл. 4 — теоретические значения абсолютных и относительных потоков излучения в спектральных линиях.

Таблица 3. Параметры облаков для четырех эпизодов. Символом «Э» обозначен номер эпизода, h — толщина слоя (в км), T — температура газа (в К), N — концентрация газа (в см^{-3}), V_t — турбулентная скорость (в км/с), T_{Ca} — температура черного тела, имитирующая вклад линий лаймановской серии водорода в фотоионизацию CaII. Для 4-го эпизода приведен пример прямого (П) и инверсного (И) распределений параметров облаков

Э	h	T	N	V_t	T_{Ca}
1	40	13800	1.0×10^{12}	3	6100
	120	7870	6.0×10^{12}	3	
2	40	15000	1.0×10^{12}	3	6100
	120	7950	6.0×10^{12}	4	
3	30	18000	1.0×10^{12}	3	6600
	120	8150	4.5×10^{12}	2.5	
4П	30	18000	2.5×10^{12}	3	6600
	100	8000	3.0×10^{12}	3.5	
4И	30	19500	2.5×10^{12}	3	6600
	100	9000	3.0×10^{12}	3.5	

Таблица 4. Теоретические потоки (эрг/см² с) в эмиссионных линиях из табл. 1. В четвертом эпизоде П соответствует прямому расположению слоев, И — инверсному

Э	1	2	3	4П	4И
F_{α}^t	2.55×10^6	2.87×10^6	2.90×10^6	1.87×10^6	7.42×10^6
F_{β}^t	1.85×10^6	1.99×10^6	2.00×10^6	2.08×10^6	4.47×10^6
F_{ϵ}^t	8.82×10^5	1.03×10^6	9.97×10^5	5.82×10^5	1.66×10^6
R_{α}^t	1.38	1.44	1.45	0.90	1.66
R_{ϵ}^t	0.48	0.51	0.50	0.28	0.37
F_H^t	1.25×10^6	1.72×10^6	1.28×10^6	5.56×10^5	1.33×10^6
F_{IR}^t	9.84×10^5	1.40×10^6	1.06×10^6	6.49×10^5	1.20×10^6
F_{D3}^t	1.37×10^4	4.43×10^4	8.19×10^4	2.71×10^5	2.54×10^5
R_D^t	186	65	35	6.9	29

Сопоставление данных табл. 1 и 4 для эпизодов 1–3 показывает, что мы можем добиться согласия *относительных* теоретических и наблюдаемых значений потоков в спектральных линиях. Но при этом *абсолютные* значения теоретических потоков оказываются на порядок величины меньше наблюдаемых. Отсюда следует вывод, что мы наблюдаем свечение примерно десяти разлетающихся облаков. Число гипотетических облаков обратно пропорционально вкладу каждого облака в общий поток излучения. Оптическая толщина в линии H α лежит в пределах от 1 до 20.

Четвёртый эпизод отличается от предыдущих одновременным достижением наиболее высоких значений F_{D3}^o и R_{α}^o на фоне практически не меняющегося значения R_{ϵ}^o . В модели горячего газа позади холодного величина $R_D^o = 18$ оказалась несовместимой с $R_{\alpha}^o = 1.62$. С физической точки зрения эта

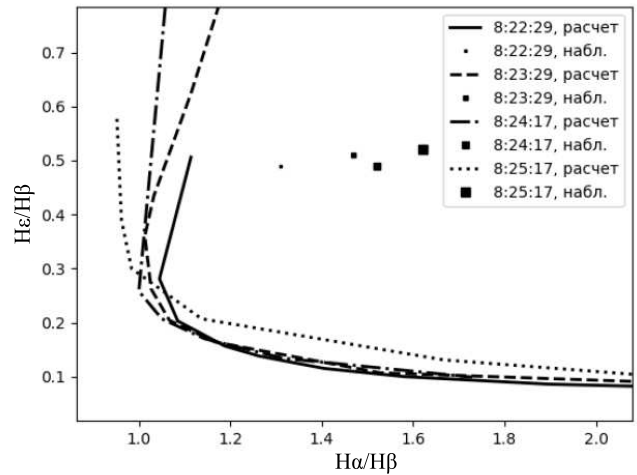


Рис. 7. Диаграмма $R_{\alpha}-R_{\epsilon}$ для наблюдаемых значений R_D из табл. 1. Квадраты соответствуют наблюдаемым значениям R_{α} и R_{ϵ} , а кривые разных стилей — соответствующим теоретическим значениям

несовместимость имеет следующее объяснение. Относительное усиление линии гелия свидетельствует об увеличении оптической глубины в линии H α , а увеличение отношения R_{α}^o при неизменной R_{ϵ}^o требует ослабления поглощения в линии H α . Отметим, что существует возможность увеличения R_{α}^t за счёт значительного роста поглощения в H β , но при этом увеличивается относительный поток в линии H ϵ , достигая значения $R_{\epsilon}^t > 0.75$, чего не наблюдается. Следовательно, в четвёртом эпизоде мы наблюдаем суммарное излучение областей с большим и малым поглощениями в линии H α . В предлагаемой модели это означает смесь двухслойных облаков с прямым и инверсным расположением горячих и холодных слоёв. В четырех последних строках табл. 3 приведён возможный пример прямого и инверсного распределений температуры в облаках, а в последних столбцах табл. 4 — соответствующие потоки в спектральных линиях.

Наблюдаемое излучение является комбинацией потоков от облаков с прямым и инверсным распределением температуры. Среднее значение вычисленной концентрации составляет около $3 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$. В невозмущённой хромосфере это соответствует высоте около 1000 км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кратко сформулируем основные результаты работы.

1. Излучение вспышки SOL2012-04-27 в спектральных линиях оптического диапазона водорода, гелия и иона CaII может быть объяснено в модели энерговыделения внутри хромосферы, сопровождающегося разлётом газа.
2. По наблюдаемым потокам излучения в шести линиях можно с достаточно высокой степе-

ню определённости восстановить параметры светящегося газа: его температуру, плотность, размеры и пространственную структуру.

3. Газ, светящийся в оптических линиях, имеет облачную структуру. Размер облака составляет по лучу зрения около 100 км. Вклад одного облака в полный поток излучения составляет около 10%.
4. Облака являются неоднородными, они имеют по крайней мере две области — холодную с температурой в диапазоне 7800 К ÷ 9000 К и горячую, 13800 К ÷ 19500 К.
5. Теоретически обнаруженные нами обла-

ка плазмы могут служить доказательством утверждения, что плазменный механизм тергерцового излучения может быть реализован в плотных, компактных и горячих источниках на хромосферном уровне, правда, с более низкой концентрацией, чем предполагается в [16].

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

-
- [1] Carlsson M. Uppsala Astronomical Report N 33. 1986.
 - [2] Carlsson M., Stein R.F. in Proceedings of a mini-Workshop on Chromospheric Dynamics. ed. M. Carlsson (Oslo: Institute of Theoretical Astrophysics). 47, 1994.
 - [3] Abbett W.P., Hawley S.L. // *ApJ*. **521**. 906. (1999).
 - [4] Allred J.C., Hawley S.L., Abbett W.P., Carlsson M. // *ApJ*. **630**. 537. (2005).
 - [5] Falchi A., Mauas J.D. // *A&A*. **387**. 678. (2002).
 - [6] Johnson L.C. // *ApJ*. **174**. 227. (1972).
 - [7] Scholz T.T., Walters H.R.J., Burke J., Scott M.P. // *MNRAS*. **242**. 692. (1990).
 - [8] Giovanardi C., Natta A., Palla F. // *A&AS*. **70**. 269. (1987).
 - [9] Giovanardi C., Palla F. // *A&AS*. **79**. 157. (1989).
 - [10] Black J.H., Weisheit J.C., Laviana E. // *ApJ*. **177**. 567. (1972).
 - [11] Taylor O., Dunn G.H. // *Phys. Rev. A*. **8**. 2304. (1973).
 - [12] Monteiro T.S., Danby G., Cooper I.L. et al. // *J. Phys. B*. **21**. 4165. (1988).
 - [13] Konjevic N., Dimitrijevic M.S., Wiese W.L. // *J. Phys. Chem. Ref. Data*. **13**. 649. (1984).
 - [14] Haisheng Ji, Wenda Cao, Goode R. // *ApJ*. **750**. L25. (2012).
 - [15] Kaufmann P., Correia E., Costa J.E.R. et al. // *A&A*. **157**. 11. (1986).
 - [16] Зайцев В.В., Степанов А.В., Мельников В.Ф. // *Письма в астрономический журнал*. **39**, № 9. 1. (2013).
 - [17] Alfvén H., Carlqvist P. // *Solar Phys.* **1**. 220. (1967).
 - [18] Зайцев В.В., Степанов А.В. // *Астрон. журнал*. **68**. 384. (1991).
 - [19] Могилевский Э.И. в книге «Физика солнечной активности». Москва. ИЗМИРАН. 1980. Стр. 3.
 - [20] Могилевский Э.И. // *Кинематика и физика небесных тел*. **2**, № 2. 75. (1986).
 - [21] Костюк Н.Д., Пикельнер С.Б. // *Астрон. журнал*. **51**. 1002. (1974).
 - [22] Gouttebroze P., Vial J.-C., Heinzel P. // *Sol. phys.* **172**, iss. 1–2. 125. (1997).
 - [23] Gouttebroze P., Heinzel P. // *A&A*. **385**. 273. (2002).
 - [24] Griem H.R. Spectral line broadening by plasmas. Pure and Applied Physics, New York: Academic Press. (1974).
 - [25] Биберман Л.М. // *ЖЭТФ*. **17**. 416. (1947).
 - [26] Holstein T. // *Phys. Rev.* **72**. 1212. (1947).
 - [27] Holstein T. // *Phys. Rev.* **83**. 1159. (1951).
 - [28] Белова О.М., Бычков К.В. // *Астрофизика*. **61**, № 2. 255. (2018).
 - [29] Ralchenko Y., Kramida A., Reader J. & NIST ASD Team. NIST Atomic Spectra Database (version 5.0). [Online]. Available: <http://physics.nist.gov/asd> [2015, September 1]. (2014).
 - [30] Vainshtein L.A., Shevelko V.P. Program ATOM for calculation of atomic characteristics, Preprint of the Lebedev Physical Institute N 19. Moscow, 1983.
 - [31] Грим Г. Уширение спектральных линий в плазме. М.: Мир, 1978.
 - [32] Cunto W., Mendoza C. // *Rev. Mexicana Astron. Astrofis.* **23**. 107. (1992).
 - [33] Green L.C., Rush P., Chandler C.D. // *ApJS*. **3**. 37. (1957).
 - [34] Melendez M., Bautista M.A., Badnell N.R. // *A&A*. **469**, Iss. 3. 1203. (2007).
 - [35] van Regemorter H. // *ApJ*. **136**. 906. (1962).
 - [36] Cox A.N. Allen's astrophysical quantities. 2000.

Simulation of emission of the flare 27.04.2012 in spectral lines of Hydrogen, Helium and Calcium

Yu.A. Kupryakov^{1,2}, K.V. Bychkov¹, O.M. Belova³, V. A. Maliutin^{4,a}, A.B. Gorshkov¹

¹Sternberg State Institute of Astronomy, Moscow State University, Moscow 119234, Russia

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

³Department of experimental astronomy, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University

⁴Department of astrophysics and stellar astronomy, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University Moscow 119991, Russia

E-mail: malyutin@list.ru

The article is devoted to analyses of solar flare SOL2012-04-27 emission in Hydrogen, Helium and Calcium spectral lines observed on horizontal solar equipment HSFA-2 in Ondřejov observatory. The integrated fluxes are calculated. The data collected are treated in the approach of the fast energy release followed by gas evaporation. The gas parameters are calculated with chromosphere conditions and spectral line self-absorption taken into account. Encompassing of six lines allows to reveal the temperature, density and extent of the gas with high degree of validity. The best agreement of the theory with observations is obtained in the model of the spread of inhomogeneous clouds, each of which has hot ($T \approx 18000 \div 19500$ K) and cool regions ($T \approx 8000 \div 9000$ K). On average, one cloud gives about ten percent of the total flux.

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

Keywords: flares, balmer series of hydrogen, helium HeI, ion CaII.

Received 22 November 2023.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2024. **79**, No. 2. Pp. .

Сведения об авторах

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