

УДК 52-645

Свечение атомов водорода и гелия в условиях звездных хромосфер

*К.В. Бычков¹, О.М. Белова², В.А. Малютин²*¹ МГУ им. М.В. Ломоносова, ГАИ им. Штернберга, Университетский пр-т, 13, Москва, 119234
*bychkov@sai.msu.ru*² МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Ленинские горы, 1, стр. 2, Москва, 119991
whitecanvas05122010@mail.ru; malyutin@list.ru

Поступила в редакцию 4 октября 2022 г.

Аннотация. Выполнены расчеты излучения бальмеровской серии водорода и линии гелия HeI 5876. Рассматриваются условия атмосфер холодных звезд. Задавались температура, концентрация и колонковая плотность газа. Рассмотрена возможная роль надтепловых частиц, которые представлены электронным газом с температурой 200 эВ. Лучистый перенос учитывался в рамках модели Соболева – Бибермана – Холстейна. Вероятность выхода в частотах линий вычислялась для свертки профилей Доплера и Хольцмарка в случае водорода и для фойгтовского профиля в случае гелия. Решена система кинетических уравнений, описывающих стационарную населенность дискретных уровней и континуума водорода и гелия. Учтены связанно-связанные, связанно-свободные радиационные и ударные переходы. Без учета быстрых частиц в холодном газе (6000 К) бальмеровский декремент является очень крутым, а с учетом быстрых частиц – пологим. В горячем газе (12000 К) декремент может смениться инкрементом. Поток в линии гелия достигает нескольких процентов от потока в H_{α} при наличии потока быстрых электронов $\sim 10^6$ эрг/см²/с или в горячем газе ($T \gtrsim 15000$ К).

Ключевые слова: бальмеровский декремент, линия HeI 5876, скорости процессов, вероятность выхода кванта, надтепловые (горячие) частицы

1 Введение

В оптическом диапазоне спектра Солнца и звезд солнечного типа во время вспышек часто наблюдаются эмиссионные линии бальмеровской серии и линии атома гелия (Гершберг, 2015), среди которых можно выделить HeI λ 5876, HeI λ 4471, HeI λ 4026. Также достаточно яркой является инфракрасная линия He λ 10830. Особенностью данной задачи на высвечивание газа является тот факт, что эти линии, как правило, образуются над фотосферой в областях, где оптическая глубина в непрерывном спектре невелика и в первом приближении ею можно пренебречь, но необходимо учитывать самопоглощение в частотах спектральных линий.

2 Постановка задачи

Рассматриваются условия атмосфер холодных звезд главной последовательности. Излучающая хромосфера представлена плоскопараллельным однородным слоем газа. В качестве входных параметров задавались температура газа T_0 в интервале от 6000 до 16000 К; концентрация n_0 газа в интервале от 10^{12} до 10^{15} см⁻³ и колонковая плотность газа N_2 в интервале 10^{20} – 10^{21} см⁻². Для учета влияния фотосферного излучения задавалась температура черного тела $T_* \in 4000$ – 5500 К. Рассмотрена возможная роль надтепловых частиц. Для имитации влияния горячих частиц на спектр излучения в линиях включено относительно небольшое количество электронов с высокой температурой $T_{\text{fast}} = 200$ эВ и потоком $\text{flux}_{\text{fast}}$ до 10^6 эрг/см²/с. Мы провели расчеты также для значений $T_{\text{fast}} = 400$ эВ и 1 кэВ. Это не привело к качественному изменению декремента и яркости линии гелия. Лучистый перенос

учитывался в рамках модели Соболева–Бибермана–Холстейна. Вероятность выхода в частотах линий вычислялась для свертки профилей Доплера и Хольцмарка в случае водорода и для фойгтовского профиля в случае атома гелия. Считалось, что основным донором электронов является водород.

2.1 Атомные данные

Решена система кинетических уравнений баланса, описывающих стационарную населенность энергетических уровней водорода и атома гелия. Фотопроцессы протекали в условиях дилутированного чернотельного излучения фотосферы с температурой T_* . Скорости фотоионизации, спонтанной и вынужденной фоторекомбинации водорода посчитаны по теории Крамерса и подробно описаны в [Belova, Bychkov \(2018\)](#); силы осциллятора, скорости ударного возбуждения и ударной ионизации водорода взяты из работы [Johnson \(1972\)](#). Скорости обратных процессов – ударной деактивации и тройной рекомбинации – вычислены по формулам Больцмана и Саха при соответствующей температуре газа. Атомные данные ударных процессов HeI были взяты из [Вайнштейн и др. \(1973\)](#), коэффициенты Эйнштейна и силы осциллятора взяты из базы данных NIST¹. Мы учитывали дискретные состояния исходя из критерия Инглиса–Теллера: для водорода 15, для атома гелия 29 (главное квантовое число $n = 1 \div 5$, орбитальное квантовое число $l = 0 \div 4$).

3 Результаты

Рассмотрим бальмеровский декремент без быстрых частиц и при наличии потока $\text{flux}_{\text{fast}} = 5 \cdot 10^5 \text{ эрг/с/см}^2$. Отношение N_α/N_β в холодном газе уменьшается от больших значений $\sim 7 \div 8$ до величины $\sim 1 \div 1.5$ при температуре 7000 К, после чего начинает слегка расти (рис. 1, панель *a*). Смена убывания декремента слабым возрастанием объясняется оптическими толщинами линий: N_α является оптически толстой на всем интервале рассматриваемой температуры T_0 , однако N_β остается оптически тонкой при температурах менее ~ 7000 К, благодаря чему ее интенсивность с ростом T_0 растет намного быстрее, чем интенсивность в N_α . При больших температурах отношение незначительно уменьшается. Линия N_γ растет по интенсивности вплоть до величины $N_\gamma/N_\beta \approx 1.2$ при температуре 12000 К (рис. 1, панель *b*). В еще более горячем газе водород значительно ионизируется, что приводит к уменьшению интенсивности. Итак, при движении по шкале температур T_0 в сторону ее увеличения крутой бальмеровский декремент сменяется пологим или даже инкрементом, когда $F(N_\alpha) < F(N_\beta) < F(N_\gamma)$. При наличии потока быстрых частиц декремент N_α/N_β не испытывает уменьшения при низких температурах от 6000 К до 7000 К: поток надтепловых электронов приводит к значительному заселению 3-го и 4-го уровней атома водорода, в результате чего первые две линии бальмеровской серии оказываются оптически толстыми (рис. 1, панель *c*). Аналогично велик поток в линии N_γ , особенно при малой концентрации частиц (рис. 1, панель *d*). При больших температурах (> 8000 К) декремент ведет себя так же, как в отсутствие быстрых частиц.

Смену возрастания на убывание, которое имеет место для отношения N_α/N_β при температуре ~ 9000 К (рис. 2), можно объяснить как за счет большего заселения 4-го уровня атома водорода, так и за счет изменения характера профиля линий: свертка профилей Доплера и Хольцмарка становится менее близка к чисто доплеровскому профилю.

На графике 3 представлены потоки в линии атома гелия на длине волны $\lambda = 5876 \text{ \AA}$. При температуре газа $T_0 = 6000$ К как абсолютный поток, так и поток относительно линии N_α растет с возрастанием $\text{flux}_{\text{fast}}$, что говорит о похожем росте потока как в линии водорода, так и в линии гелия при низкой температуре. Возбуждения уровней всецело определяются быстрыми частицами. Похожий рост интенсивностей с $\text{flux}_{\text{fast}}$ можно объяснить схожей структурой энергетических уровней у двух элементов: возбужденные уровни обоих элементов лежат очень высоко относительно основного состояния. При большей температуре (~ 12000 К) быстрые частицы определяют интенсивность линий только при потоках от 10^5 эрг/с/см^2 . Наконец в очень разогретой атмосфере при 16000 К яркость линии определяется всецело ударами тепловых частиц, что выражается в отсутствии зависимости значения $F(5876)$ от $\text{flux}_{\text{fast}}$, при этом линия гелия остается оптически тонкой.

¹ <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>

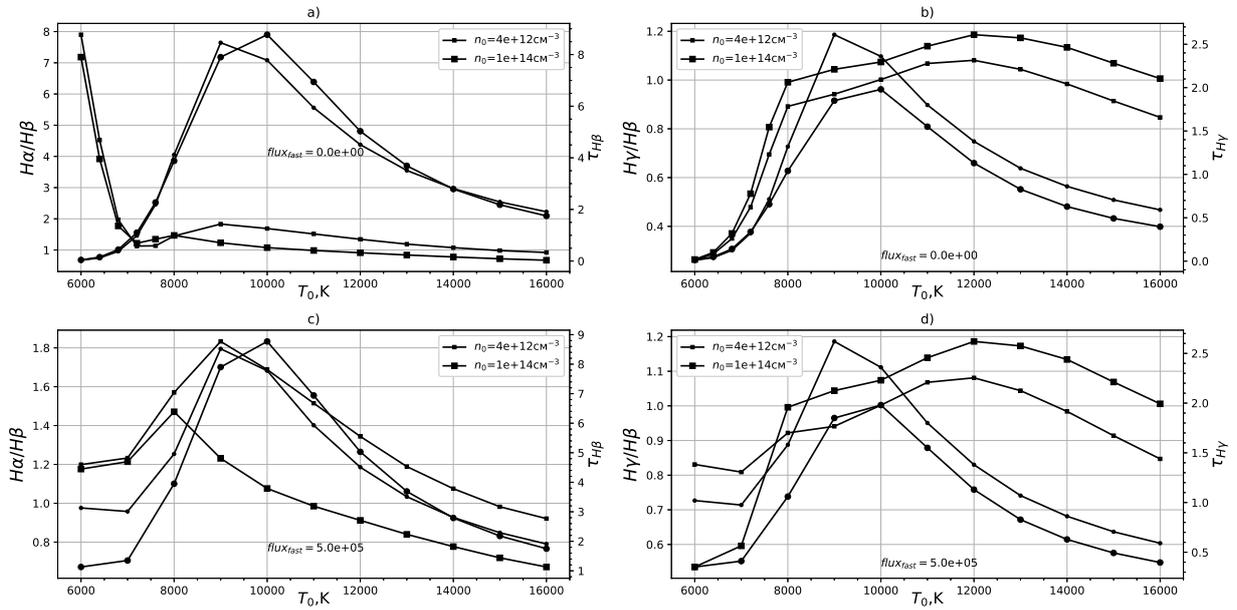


Рис. 1. Зависимость бальмеровского декремента H_{α}/H_{β} , H_{γ}/H_{β} (квадратики; величина отложена вдоль левой оси) и оптической толщины в центре линий H_{β} , H_{γ} (кружки; величина отложена вдоль правой оси) от температуры газа T_0 . Графики приведены для значений параметров $T_* = 5500$ К, $N_2 = 4 \cdot 10^{20}$ см $^{-2}$. Значки разного размера соответствуют разной плотности газа n_0 . Панели *a, b* приведены для нулевого потока надтепловых электронов, а панели *c, d* – для потока $\text{flux}_{\text{fast}} = 5 \cdot 10^5$ эрг/с/см 2

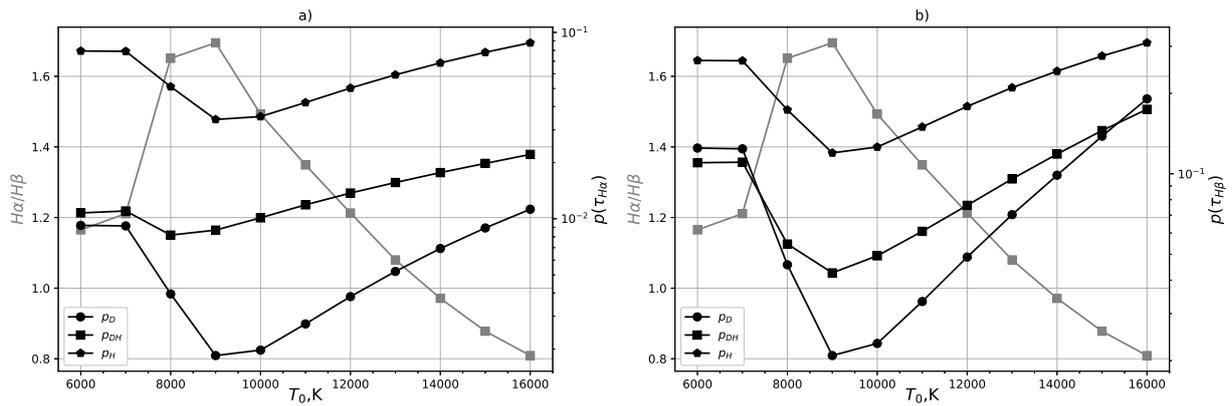


Рис. 2. Зависимость бальмеровского декремента H_{α}/H_{β} (серый цвет; величина отложена вдоль левой оси) и вероятности выхода кванта p (черный цвет, величина отложена вдоль правой оси) в частотах линий H_{α} (панель *a*), H_{β} (панель *b*) от температуры газа T_0 . Значения вероятности выхода из профиля Доплера (p_D) отмечены кружками, из профиля Хольцмарка (p_H) – пятиугольниками, из их свертки (p_{DH}) – квадратами. Графики приведены для значений параметров $T_* = 5500$ К, $N_2 = 4 \cdot 10^{20}$ см $^{-2}$, $\text{flux}_{\text{fast}} = 5 \cdot 10^5$ эрг/с/см 2 , $n_0 = 10^{13}$ см $^{-3}$

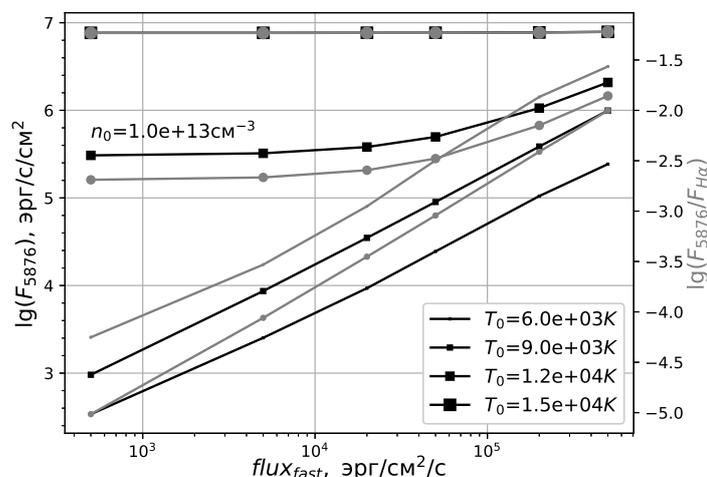


Рис. 3. Логарифмы абсолютного (квадратики; величина отложена вдоль левой оси) и относительного (кружки; величина отложена вдоль правой оси) потоков в линии HeI 5876 в зависимости от потока надтепловых электронов $flux_{fast}$. Фигурки разных размеров соответствуют разным температурам газа T_0 . Графики приведены для значений параметров $T_* = 5500$ K, $N_2 = 4 \cdot 10^{20}$ cm^{-2} , $n_0 = 10^{13}$ cm^{-3} .

4 Дискуссия

Данная работа является развитием давно рассматриваемого подхода к интерпретации линейчатого излучения газа, прозрачного в континууме. Например, [Гринин и Катышева \(1980a, b\)](#) детально рассмотрели излучение в линиях водорода, а [Катышева \(1993\)](#) – водорода и гелия. Также используется программа RADYN ([Allred et al., 2005](#)). В ней рассматриваются переходы между шестью уровнями атома водорода (включая континуум) и дискретные переходы между основным ($1s^2$) уровнем, $2s$ -, $2p$ -синглетами и триплетами гелия, причем в расчетах задается профиль Фойгта ([Carlsson, 1986](#)). В отличие от программы RADYN мы, во-первых, учитываем значительно большее число уровней высокого возбуждения, что является необходимым для надежного вычисления состояния ионизации ([Белова, Бычков, 2017a, b](#)). Число учитываемых уровней соответствует критерию Инглиса – Теллера. Во-вторых, учитывается, что в случае водорода надо использовать свертку доплеровского и хольцмарковского контуров, а не контур Фойгта.

Нами рассмотрена модельная задача для однородного слоя газа. В реальных объектах необходимо учитывать стратификацию газа, что требует уточнения метода Бибермана – Холстейна – Соболева. Кроме того, у вспышек наблюдаются газодинамические эффекты, требующие своего объяснения. Эту работу мы надеемся выполнить в дальнейшем.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Л.А. Вайнштейну, г. н. с. ФИАН им. Лебедева, за предоставление атомных данных по атому гелия.

Литература

- Белова О.М., Бычков К.В., 2017a. *Астрофизика*. Т. 60. № 1. С. 127–134. [Belova O.M., Vyckov K.V., 2017a. *Astrophysics*, vol. 60, no. 1, pp. 127–134. (In Russ.)]
 Белова О.М., Бычков К.В., 2017b. *Астрофизика*. Т. 60. № 2. С. 219–232. [Belova O.M., Vyckov K.V., 2017b. *Astrophysics*, vol. 60, no. 2, pp. 219–232. (In Russ.)]
 Вайнштейн Л.А., Сوبельман И.И., Юков Е.А., 1973. Сечения возбуждения атомов и ионов электронами. М.: “Наука”. [Vainstein L.A., Sobel’man I.I., Yukov E.A., 1973. *Electron excitation cross-sections of atoms and ions*. Moscow: Nauka. (In Russ.)]
 Гершберг Р.Е., 2015. Активность солнечного типа звезд главной последовательности, 3-е дополненное

- изд. Симферополь: ООО “Антиква”. [Gershberg R.E., 2015. Solar-type activity of main-sequence stars, 3rd ed. Simferopol: Antikva. (In Russ.)]
- Гринин В.П., Катышева Н.А., 1980а. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 62. № 1. С. 59. [Grinin V.P., Katysheva N.A., 1980a. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, vol. 62, no. 1, pp. 59–65. (In Russ.)]
- Гринин В.П., Катышева Н.А., 1980б. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 62. № 1. С. 66. [Grinin V.P., Katysheva N.A., 1980b. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, vol. 62, no. 1, pp. 66–78. (In Russ.)]
- Катышева Н.А., 1993. Астрон. журн. Т. 70. № 5. С. 1063. [Katysheva N.A., 1993. *Astron. Zhurn.*, vol. 70, no. 5, pp. 1063–1074. (In Russ.)]
- Allred J.C., Hawley S.L., Abbett W.P., Carlsson M., 2005. *Astrophys. J.*, vol. 630, p. 537.
- Belova O.M., Bychkov K.V., 2018. *Astrophysics*, vol. 61, no. 2, pp. 255–270.
- Carlsson M., 1986. *Upps. Astron. Obs. Rep.*, no. 33.
- Johnson L.C., 1972. *Astrophys. J.*, vol. 174, pp. 227–236.

Calculations of hydrogen and helium line emission for conditions in stellar chromospheres

*K.V. Bychkov*¹, *O.M. Belova*², *V.A. Maliutin*²

¹ Sternberg Astronomical Institute, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119234, Russia
bychkov@sai.msu.ru

² Department of Experimental Astronomy, Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia
whitecanvas05122010@mail.ru; maliutin@list.ru

Abstract. The authors calculated the intensities of hydrogen Balmer lines and the HeI λ 5876 line. The input gas parameters such as temperature, concentration, and column density correspond to solar and solar-type star atmospheres. The influence of fast particles (electrons) was also considered. The radiative transfer in spectral lines frequencies is treated in the frame of the Sobolev-Biberman-Holstein approximation in such a way that hydrogen lines have the Doppler and the Holtzmark convolution profile, and helium lines have the Voigt profile. In equations describing the hydrogen and the helium energetic level occupation, the terms encompass the rates of bound-bound, bound-free radiative and collisional processes. The Balmer decrement in cold gas (6,000 K) is quite steep without fast particles, being sloping with fast particles. In warm gas (12,000 K), decrement can change into increment. The HeI λ 5876 flux becomes as large as several percent of the H_{α} flux only in the hot atmosphere ($>15,000$ K) or the atmosphere affected by a strong fast particle flux.

Key words: Balmer decrement, HeI λ 5876 line, transition rates, photon escape probability, fast particles