

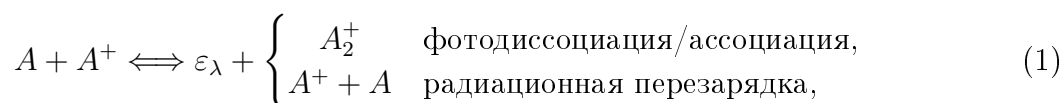
**Ион-атомные и атом-атомные столкновительные процессы
и моделирование звёздных атмосфер****А.А. Михайлов¹, Л.М. Игнатович¹, В.А. Сречкович¹,
М.С. Димитриевић², Д. Евремовић²**¹*Институт физики, Прегревица 118, 11000 Белград, Сербия*²*Астрономическая Обсерватория, Волгина 7, 11060 Белград, Сербия***E-mail: mdimitrijevic@aob.bg.ac.rs*

Поступила в редакцию 1 июня 2015 г.

Резюме. Представлены результаты, полученные в серии предыдущих работ о влиянии на оптические и кинетические свойства слабо ионизованной астрофизической плазмы двух групп столкновительных процессов: ион-атомных и атом-атомных. В первую входят радиационные процессы типа фотодиссоциация/ассоциация и радиационная перезарядка, а во вторую – хими-ионизационные/рекомбинационные процессы. Влияние радиационных процессов оценивается путем сравнения их интенсивностей с интенсивностями известных конкурирующих процессов применительно к фотосфере Солнца и к фотосферам DB белых карликов. Изучаемые хими-ионизационные/рекомбинационные процессы рассмотрены с точки зрения их влияния на населенности возбужденных состояний атома водорода (Солнце и M красный карлик с эффективной температурой 3800 K) и атома гелия (DB белые карлики). Влияние этих процессов на населенности возбужденных состояний атома водорода исследовано с помощью программы RHONIX, которая генерирует модель рассматриваемой атмосферы. Весь представленный материал показывает несомненное влияние рассмотренных радиационных и хими-ионизационных/рекомбинационных процессов на оптические свойства и на кинетику слабо ионизованных слоёв звёздных атмосфер. Можно надеяться, что представленные результаты послужат достаточным основанием для включения этих процессов в модели звёздных атмосфер.

1 Введение

В серии предыдущих работ две группы ион–атомных и атом–атомных столкновительных процессов изучались с точки зрения их влияния на оптические и кинетические свойства слабо ионизованной лабораторной и астрофизической плазмы [1–5, 7–17]. В первую группу входят радиационные процессы типа фотодиссоциация/ассоциация, радиационная перезарядка,



где ε_λ – энергия фотона с длиной волны λ , A и A^+ – атом и его положительный ион в основных состояниях, а A_2^+ – молекулярный ион в основном электронном состоянии. Эти процессы иллюстрирует ниже приведенный рисунок 1, где $U_1(R)$ и $U_2(R)$ – адиабатические потенциальные кривые основного и первого возбуждённого электронного состояния иона A_2^+ , а R – межъядерное расстояние в атомных единицах. Рисунок 1 показывает, что изучаемые радиационные процессы представляют результат переходов с излучением или поглощением фотона между упомянутыми молекулярными электронными состояниями.

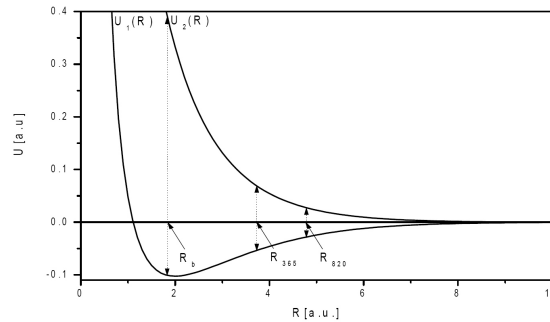
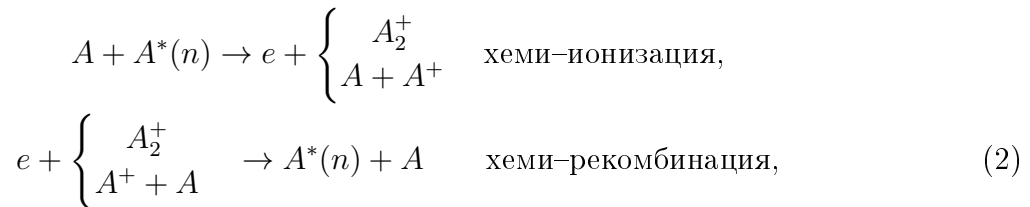


Рис. 1: Адиабатические потенциальные кривые основного и первого возбуждённого электронного состояния иона A_2^+ .

Во вторую из двух упомянутых групп входят хими–ионизационные и хими–рекомбинационные процессы типа хими–ионизация, хими–рекомбинация,



где $A^*(n)$ – атом в высоко возбуждённом (ридберговском) состоянии с главным квантовым числом $n \gg 1$, а e – свободный электрон. Рассматриваются процессы, обусловленные действием механизма резонансного обмена энергией внутри электронной компоненты, соответствующей атом–атомной или электрон–ион–атомной системе. Эти процессы иллюстрирует рис. 2, схематически показывающий (а) геометрию $A^*(n) + A$ столкновения и (б) суть резонансного механизма, которая состоит в том, что переход внешнего слабосвязанного электрона системы (e_n) с энергией $\varepsilon_n < 0$ в свободное состояние с энергией $\varepsilon_k > 0$ сопровождается переходом подсистемы $A^+ + A$ из первого возбуждённого молекулярного состояния с энергией U_2 в основное состояние с энергией U_1 .

Для астрофизической плазмы в данной работе рассматриваются два случая:
случай водорода, когда $A = \text{H}(1s)$ и $A^+ = \text{H}$,
случай гелия, когда $A = \text{He}(1s^2)$ и $A^+ = \text{He}(1s)$.

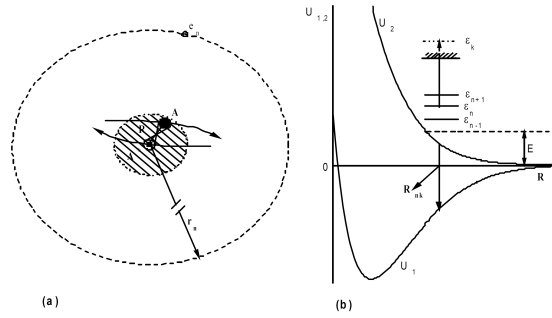


Рис. 2: (а) Геометрия $A^*(n) + A$ столкновения; (б) суть резонансного механизма (см. текст).

Влияние радиационных процессов (1) оценивается путем сравнения их интенсивностей с интенсивностями известных конкурирующих радиационных процессов, а именно:

$$A^+ + e \leftrightarrow \varepsilon_\lambda + \begin{cases} A^+ + e \\ A^* \end{cases}, \quad (3)$$

$$A + e \leftrightarrow \varepsilon_\lambda + A + e, \quad (4)$$

$$A + e \leftrightarrow A^-, \quad (5)$$

где A^- – стабильный отрицательный ион. Влияние хими–ионизационных и хими–рекомбинационных процессов (2) также оценивается путем сравнения их интенсивностей с интенсивностями известных конкурирующих ионизационных и рекомбинационных процессов:

$$A^+ + e \rightarrow A^*(n) + \varepsilon_\lambda, \quad (6)$$

$$A^+ + e + e \leftrightarrow A^*(n) + e. \quad (7)$$

2 Радиационные процессы

Атмосфера Солнца: видимая область

В случае водорода процессы (1) рассмотрены применительно к фотосфере и нижней хромосфере Солнца [1, 3] и охарактеризованы их спектральной эмиссивностью $\varepsilon_{ia}(\lambda)$, т.е. спектральной плотностью энергии излучения, которое эти процессы генерирует из единицы объёма в единицу времени в телесный угол 4π . Эмиссивности, характеризующие в случае водорода процессы (3), (4) и (5), обозначены здесь через $\varepsilon_{ei}(\lambda)$, $\varepsilon_{ea}^{ff}(\lambda)$ и $\varepsilon_{ea}^{fb}(\lambda)$. В соответствии с этим влияние процессов (1) оценивается величинами следующих параметров:

$$F_{ei}(\lambda) = \frac{\varepsilon_{ia}(\lambda)}{\varepsilon_{ei}(\lambda)}, \quad F_{ea}^{ff}(\lambda) = \frac{\varepsilon_{ia}(\lambda)}{\varepsilon_{ea}^{ff}(\lambda)}, \quad F_{ea}^{fb}(\lambda) = \frac{\varepsilon_{ia}(\lambda)}{\varepsilon_{ea}^{fb}(\lambda)},$$

которые определяются как функции высоты рассматриваемого слоя солнечной атмосферы на основе стандартных моделей [18, 19]. Результаты, полученные для видимой области спектра, иллюстрируют рисунки 3–6. Эти рисунки показывают, что общий

вклад процессов (1) в непрозрачность солнечной атмосферы в видимой области необходимо принимать во внимание, несмотря на присутствие исключительно интенсивных процессов (5).

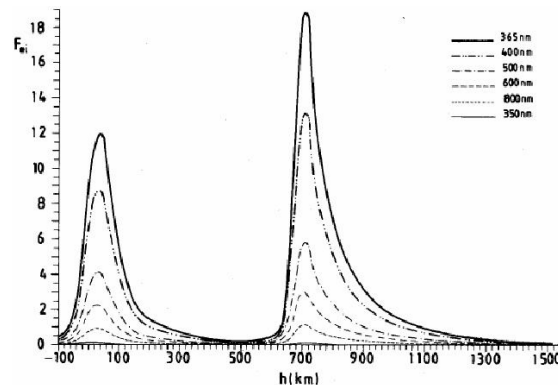


Рис. 3: Параметр F_{ei} как функция высоты в атмосфере Солнца.

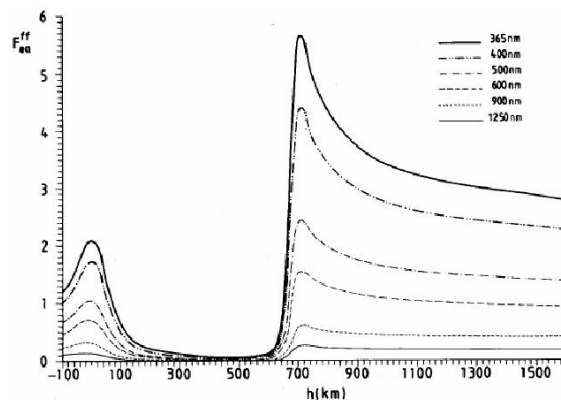


Рис. 4: Параметр F_{ea}^{ff} как функция высоты в атмосфере Солнца.

Атмосфера Солнца: UV и VUV область

В далекой UV области эмиссионные каналы процессов (1) перестают играть роль, в то время как роль абсорбционных каналов в этой области очень быстро растёт. В соответствии с этим в UV и VUV области влияние процессов (1) оценивается величиной параметра $F_{\kappa}(\lambda)$, т.е. отношением коэффициента обусловленной этими процессами абсорбции к коэффициенту абсорбции, обусловленной конкурирующими процессами (3), (4) и (5) вместе взятыми [6]. Полученные результаты иллюстрируют приведенные ниже рисунки 7а, б.

Рисунки показывают, что вклад процессов (1) в непрозрачность солнечной атмосферы в UV и VUV области близок к вкладу процессов (3), (4) и (5) вместе взятых.

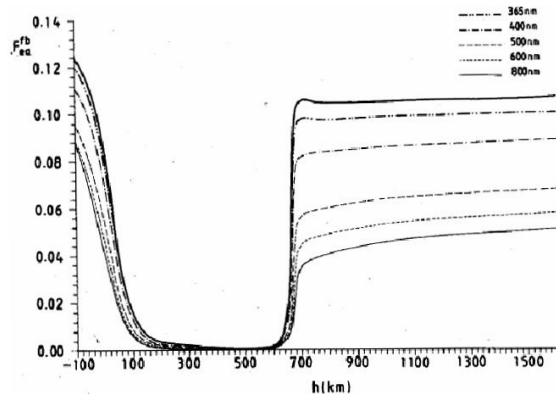


Рис. 5: Параметр F_{ea}^{fb} ($\lambda = 350 - 800$ нм) как функция высоты в атмосфере Солнца.

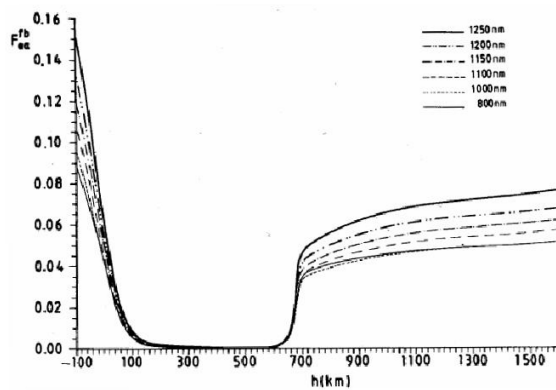


Рис. 6: Параметр F_{ea}^{fb} ($\lambda = 800 - 1250$ нм) как функция высоты в атмосфере Солнца.

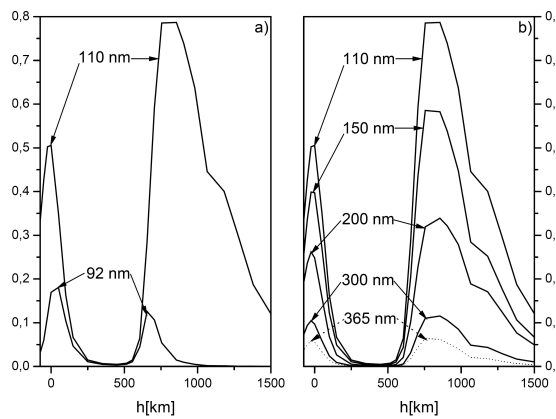


Рис. 7: Параметр F_{κ} как функция высоты в атмосфере Солнца.

Атмосферы DB белых карликов: видимая область

В гелиевом случае процессы (1) рассмотрены применительно к фотосферам DB белых карликов [20] с эффективными температурами $T_{\text{eff}} \leq 16\,000$ К. Влияние этих процессов

оценивается только величинами выше приведенных параметров $F_{ei}(\lambda)$ и $F_{ea}^{ff}(\lambda)$, так как в гелиевом случае нет стабильного отрицательного иона [2, 4, 5]. Полученные результаты иллюстрируют рисунки 8 и 9, которые относятся к фотосфере ДВ белого карлика с эффективной температурой $T_{\text{eff}} \leq 12\,000$ К. Параметры $F_{ei}(\lambda)$ и $F_{ea}^{ff}(\lambda)$ определены как функции логарифма Росселандовской оптической толщины.

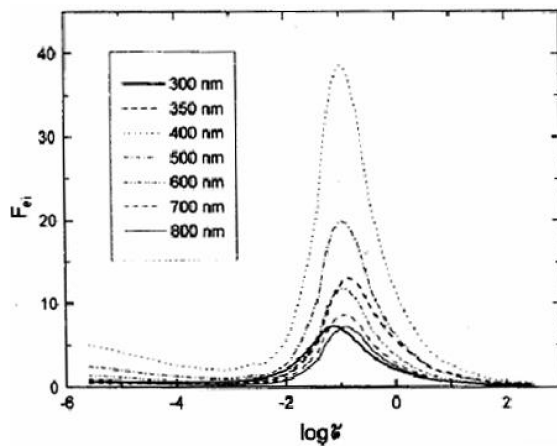


Рис. 8: Параметр F_{ei} как функция логарифма Росселандовской оптической толщины $\log \tau$.

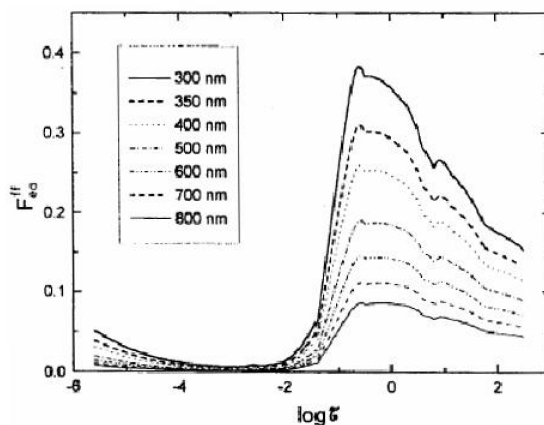


Рис. 9: Параметр F_{ea}^{ff} как функция логарифма Росселандовской оптической толщины $\log \tau$.

Эти рисунки показывают, что ввиду отсутствия в случае гелия процессов (5), общий вклад процессов (1) в непрозрачность атмосфер ДВ белых карликов в видимой области по отношению к вкладу конкурирующих процессов в несколько раз больше, чем это имеет место для водорода.

3 Хеми-ионизационные и хеми-рекомбинационные процессы

В данной работе хеми-ионизационные и хеми-рекомбинационные процессы (2) рассмотрены сначала с точки зрения их влияния на населённости возбуждённых состояний

атома водорода в атмосферах Солнца и более холодных звёзд и на населённости возбуждённых состояний атома гелия DB белых карликов. Даны сравнительные оценки влияния этих и конкурирующих процессов (6) и (7), которые даются значениями следующих параметров:

$$F_{phr}^{(ab)}(4; 8) = \frac{\sum_{n=4}^8 I_r^{ab}(n, T)}{\sum_{n=4}^8 I_{phr}^{ab}(n, T)}, \quad F_{eei}^{(ab)}(4; 8) = \frac{\sum_{n=4}^8 I_r^{ab}(n, T)}{\sum_{n=4}^8 I_r^{eei}(n, T)},$$

где $I_r^{ab}(n, T)$, $I_{phr}^{ab}(n, T)$ и $I_r^{eei}(n, T)$ – рекомбинационные потоки на атомный уровень с заданным n , обусловленные процессами (2), (6) и (7), соответственно.

Атмосфера Солнца

Результаты, полученные в случае фотосферы и нижней хромосферы Солнца [9], представлены на рисунках 10 и 11. Видно, что в данном случае процессы (2) доминируют по отношению к фоторекомбинационным процессам (6) и что их интенсивность близка к интенсивности процессов тройной электрон-электрон-ионной рекомбинации.

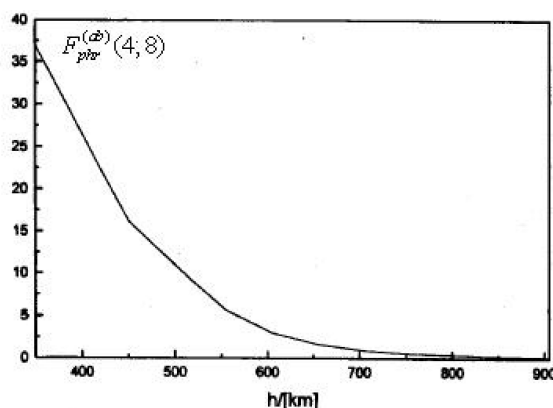


Рис. 10: Параметр $F_{phr}^{(ab)}(n, T)$ как функция высоты в атмосфере Солнца.

Атмосферы DB белых карликов

Результаты, полученные для случая гелия, иллюстрируют рисунки 12 и 13, относящиеся к процессам (2) в атмосфере DB белого карлика с эффективной температурой $T_{\text{eff}} = 12000$ К. Значения параметров $F_{eei}^{(ab)}(n, T)$ и $F_{phr}^{(ab)}(n, T)$ даны как функции логарифма росселандовской оптической толщины.

Атмосферы красных M-карликов (программа PHOENIX)

В данной работе процессы (2) рассмотрены также в случае атмосферы M-красного карлика с эффективной температурой $T_{\text{eff}} = 3800$ К. Влияние этих процессов на населённости возбуждённых состояний атома водорода в этом случае исследовано с по-

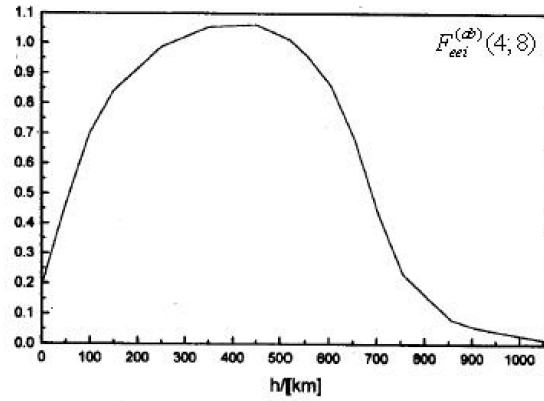


Рис. 11: Параметр $F_{eei}^{(ab)}(n, T)$ как функция высоты в атмосфере Солнца.

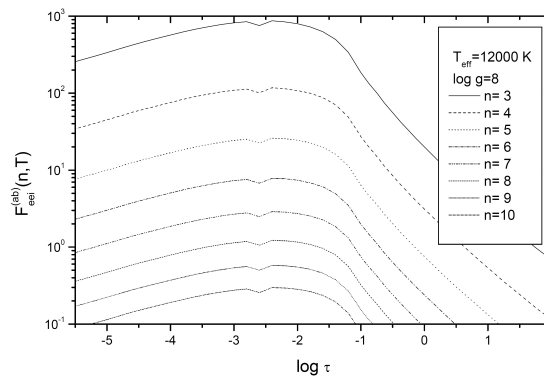


Рис. 12: Параметр $F_{eei}^{(ab)}(n, T)$ как функция логарифма росселандовской оптической толщины $\log \tau$.

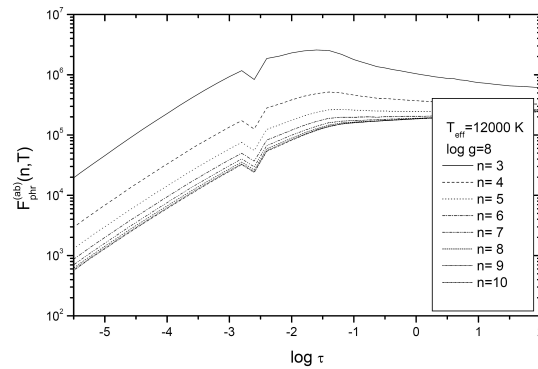


Рис. 13: Параметр $F_{phr}^{(ab)}(n, T)$ как функция логарифма росселандовской оптической толщины $\log \tau$.

мощью программы RHOENIX, которая генерирует модель рассматриваемой атмосферы [16]. В рамках этой работы в программу RHOENIX включены процессы (2) для

$n \geq 4$. Полученные результаты иллюстрируют три следующие рисунка 14–16, где представлены значения параметра ζ , т.е. отношение населённостей возбужденных состояний атома водорода, рассчитанных с учётом и без учёта процессов (2). Видно, что по крайней мере в области $n \leq 20$ процессы (2) одинаково сильно влияют на населённости возбуждённых состояний атома водорода.

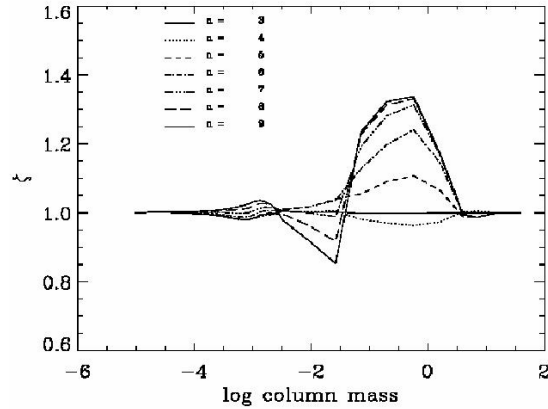


Рис. 14: Параметр ζ (отношение населённостей возбужденных состояний атома водорода), рассчитанный с учётом и без учёта процессов (2) для $n = 3 - 9$.

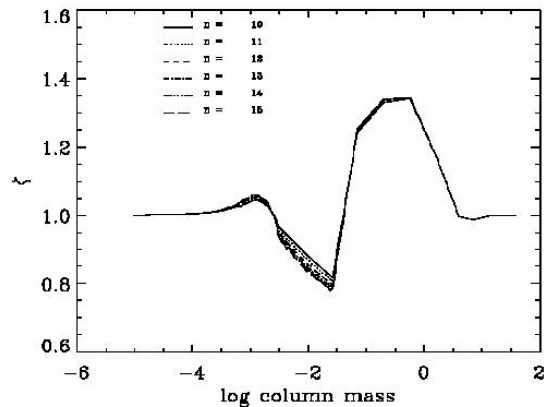


Рис. 15: То же, что на рис. 14, для $n = 10 - 15$.

4 Влияние хеми-ионизационных/рекомбинационных процессов на облик водородных спектральных линий в атмосфере красного М-карлика (программа PHOENIX)

В связи с данной проблемой в этой работе также рассмотрена атмосфера красного М-карлика с эффективной температурой $T_{\text{eff}} = 3800$ К. Характеристики рассмотренной атмосферы представлены на рис. 17, где показаны электронные концентрации, рассчи-

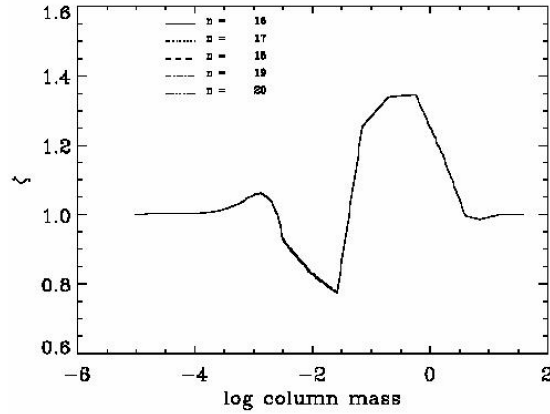


Рис. 16: То же, что на рис. 14, для $n = 16 - 29$.

таные с помощью программы PHOENIX с учётом и без учёта процессов (2). В отличие от предыдущего случая, здесь были включены процессы (2) с $n = 2$ и 3.

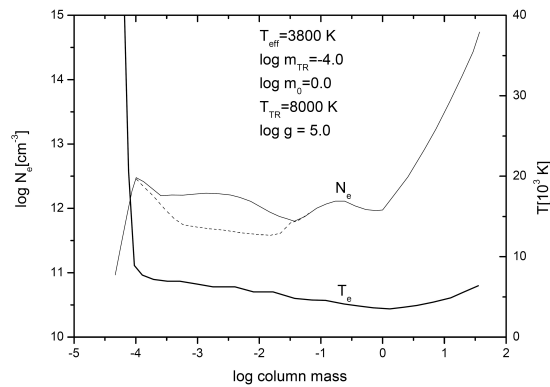


Рис. 17: Профили электронной концентрации, рассчитанные с помощью программы PHOENIX с учётом и без учёта процессов (2).

Для данной атмосферы были рассчитаны профили ряда спектральных линий атома водорода, также определенные с учётом и без учёта процессов (2) для $n \geq 2$. Полученные результаты иллюстрируют четыре следующие рисунка (Рис. 18–21) которые относятся к линиям H_α , H_δ , H_ϵ и P_{a_ϵ} , соответственно [21].

Представленные рисунки показывают, что процессы (2), влияя непосредственно на населённости возбуждённых состояний атома водорода и на электронную концентрацию, очень сильно влияют и на форму спектральных линий атома.

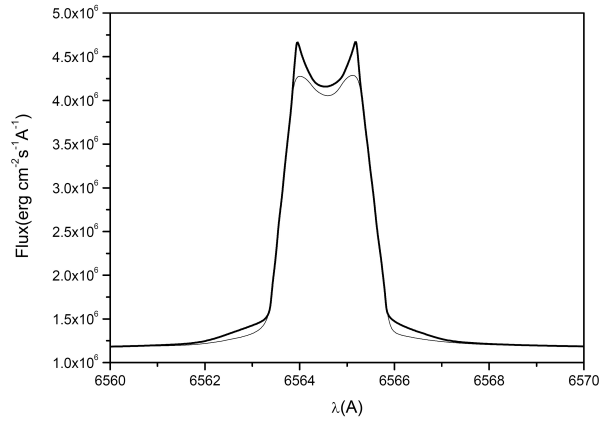


Рис. 18: Расчётный профиль линии H_{α} в атмосфере красного M-карлика.

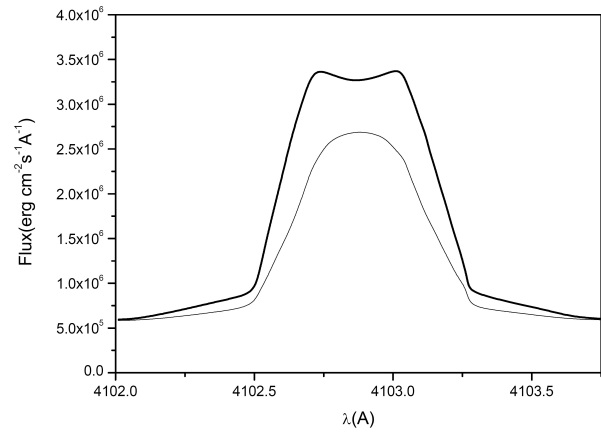


Рис. 19: То же, что на рис. 18, для линии H_{δ} .

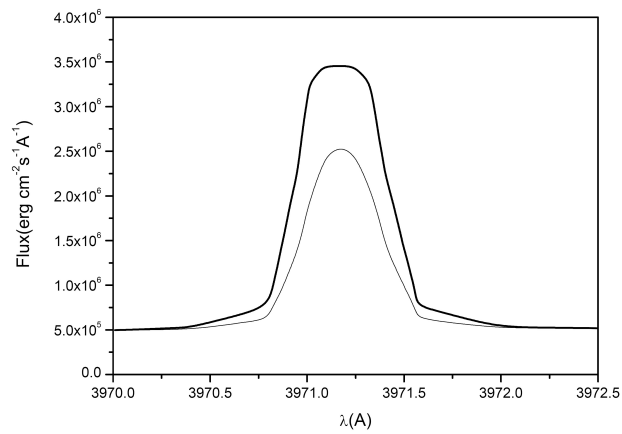


Рис. 20: То же, что на рис. 18, для линии H_{ϵ} .

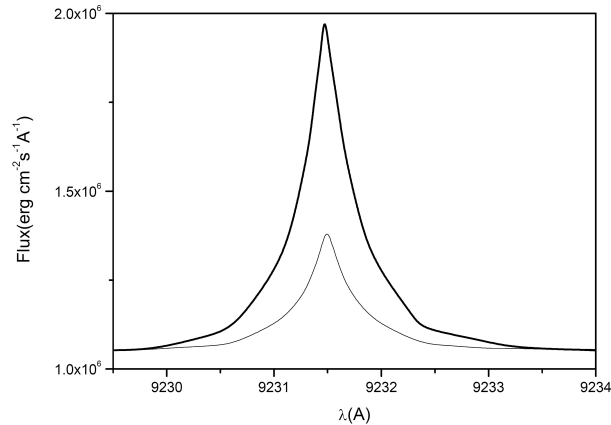


Рис. 21: То же, что на рис. 18, для линии Pa ϵ .

5 Заключение

Все вышеизложенное показывает несомненное влияние радиационных процессов (1) и хими-ионизационных/рекомбинационных процессов (2) на оптические свойства и на кинетику слабо ионизованных слоёв звёздных атмосфер. Можно надеяться, что представленные результаты служат достаточным основанием для включения процессов (1) и (2) в модели звёздных атмосфер.

Литература

1. Mihajlov A.A., Dimitrijević M.S., and Ignjatović Lj.M., *A&A* **276**, 187 (1993).
2. Mihajlov A.A., Dimitrijević M.S., Ignjatović Lj.M., and Djurić Z., *A&AS* **103**, 57 (1993).
3. Mihajlov A.A., Dimitrijević M.S., and Ignjatović Lj.M., *A&A* **287**, 1026 (1994).
4. Stancil P.C., *ApJ* **430**, 360 (1994).
5. Mihajlov A.A., Dimitrijević M.S., Ignjatović Lj.M., and Djurić Z., *ApJ* **454**, 420 (1995).
6. Mihajlov A.A., Ignjatović Lj.M., Sakan N.M., and Dimitrijević M.S., *A&A* **469**, 749 (2007).
7. Mihajlov A.A., Ljepojević N.N., and Dimitrijević M.S., *J. Phys. B* **25**, 5121 (1992).
8. Mihajlov A.A., Dimitrijević M.S., and Djurić Z., *Phys. Scr.* **53**, 159 (1996).
9. Mihajlov A.A., Dimitrijević A.A., Ignjatović Lj.M., and Vasiljević M.M., *Astron. Astrophys. Trans.* **18**, 145 (1999).
10. Mihajlov A.A., Jevremović D., Hauschildt P., Dimitrijević M.S., Ignjatović Lj.M., and Alard F., *A&A* **403**, 787 (2003).
11. Mihajlov A.A., Ignjatović Lj.M., Dimitrijević M.S., and Djurić Z., *ApJSS* **147**, 369 (2003).
12. Ignjatović Lj.M. and Mihajlov A.A., *Phys. Rev. A*, **72**, 022715 (2005).
13. Mihajlov A.A., Ljepojević N.N., and Dimitrijević M.S., *J. Phys. B* **25**, 5121 (1992).
14. Mihajlov A.A., Dimitrijević M.S., and Djurić Z., *Phys. Scr.* **53**, 159 (1996).

15. Mihajlov A.A., Ignjatović Lj.M., Vasiljević M.M., and Dimitrijević M.S., *A&A* **324**, 1206 (1997).
16. Mihajlov A.A., Jevremović D., Hauschildt P., Dimitrijević M.S., Ignjatović Lj.M., and Alard F., *A&A* **403**, 787 (2003).
17. Mihajlov A.A., Djurić Z., Dimitrijević M.S., and Ljepojević N.N., *Phys. Scr.* **56**, 631 (1997).
18. Vernazza J.E., Avrett E.H., and Loeser, R., *ApJS* **45**, 635 (1981).
19. Maltby P., Avrett E.H., Carlsson M., Kjeldseth-Moe O., Kurucz R.L., and Loeser R., *ApJ* **306**, 284 (1986).
20. Koester D. *A&AS* **39**, 401 (1980).
21. Mihajlov A.A., Jevremović D., Hauschildt P., Dimitrijević M.S., Ignjatović Lj.M., and Alard F., *A&A* **471**, 671 (2007).

**Ion-Atom and Atom-Atom Collisional Processes
and Modeling of Stellar Atmospheres**

**A.A. Mihajlov¹, Lj.M. Ignjatović¹, V.A. Srećković¹,
M.S. Dimitrijević^{2*}, D. Jevremović²**

¹*Institute of Physics, Pregrevica 118, 11000 Belgrade, Serbia*

²*Astronomical Observatory Volgina 7, 11060 Belgrade, Serbia*

**E-mail: mdimitrijevic@aob.bg.ac.rs*

Received June 1, 2015

Abstract. We report the results obtained in our previous works on the influence of two groups of collisional processes (ion–atom and atom–atom) on the optical and kinetic properties of weakly ionised plasma. The first group includes radiative processes of the photodissociation/association type and radiative charge exchange, the second one – chemi-ionisation/recombination processes. The effect of the radiative processed is assessed by comparing their intensities with those of the known competing processed in application to the solar photosphere and to the photospheres of DB white dwarfs. The studied chemi-ionisation/recombination processes are considered from the viewpoint of their influence on the populations of the excited states of the hydrogen atom (the Sun and an M-type red dwarf with an effective temperature of 3800 K) and helium atom (DB white dwarfs). The effect of these processes on the populations of the excited states of the hydrogen atom has been studied using the PHOENIX code, which generates the model of the considered atmosphere. The reported results demonstrate the unquestionable influence of the considered radiative and chemi-ionisation/recombination processes on the optical properties and on the kinetics of the weakly ionised layers in stellar atmospheres. It can be expected that the reported results will be a sufficient reason for including these processes in the models of stellar atmospheres.