О МОДЕЛИРОВАНИИ СПЕКТРА СОЛНЕЧНОГО ПЯТНА

Калинин А.А., Калинина Н.Д.

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

ON THE SUNSPOT SPECTRUM MODELING

Kalinin A.A., Kalinina N.D.

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

In July 2017, a large sunspot with a magnetic field strength at a maximum of 3,900 Gs (July 12) passed across the solar disk. We obtained the spectra of this spot in the region of the H δ line of hydrogen and the H and K lines of ionized calcium ($\lambda\lambda$ 410.1, 396.9, 393.4 nm, respectively). With trial and error method we fit passably the wings of the H δ line and got preliminary model of the atmosphere in the sunspot central region. For the spectrum calculation we used the COSSAM program (version dated January 18, 2017). Our shallow magnetohydrostatic waist constricted model is somewhat hotter in comparison with conventional models and we attribute this fact to the adopted MHS. We conducted non-LTE simulation of the K Ca II line for our sunspot model (via RH-code) and found qualitative agreement with observations, but for consistency plan to include MHS in the hydrostatic part of the RH-code.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-193-196

В июле 2017 г. по диску Солнца проходило большое солнечное пятно с напряженностью магнитного поля (МП) в максимуме 3900 Гс (12 июля) по данным Службы Солнца АО УрФУ. Одним из авторов были получены спектры этого пятна в области линии H δ водорода и линий H и K ионизованного кальция ($\lambda\lambda$ 410.1, 396.9, 393.4 нм соответственно). Некоторые подробности наблюдений описаны в [1]. Там же описан способ получения модельного спектра пятна на основе простой магнитостатической модели с перетяжкой магнитного поля [2] и ЛТР моделирования спектра в области линии H δ с помощью программы COSSAM (см. рис. 1б в работе [1]). Из известных нам МГС моделей только эта позволяет рассматривать крупные, но мелкие пятна с расширяющимися ниже уровня перетяжки силовыми линиями поля. При напряженности магнитного поля 3000 Гс и параметрах модели согласно [2] получено удовлетворительное согласие с наблюдениями в крыльях линии H δ для центра пятна в первом сете (UT 8^h 30^m). Параметры атмосферы центра пятна, полученные при подгонке спектра, отображены на рис.1.

В настоящей заметке мы рассмотрим спектр в области линий H и K ионизованного кальция. Центральные части этих линий образуются в хромосфере пятна в условиях повышенных температур и сильных отклонений от ЛТР. Для их моделирования мы использовали программу RH-code, созданную Н. Uitenbroek и в общих чертах описанную в его работе [3]. Программа решает многоуровневую задачу переноса излучения произвольного

атома для заданной модели атмосферы. Возможно рассмотрение одно-, двух- и трехмерной геометрии, соответственно для плоскопараллельной атмосферы, бесконечного бруса прямоугольного сечения и параллелепипеда. Доступны также расчеты для сферы.

Рис. 1. Модель центра солнечного пятна. По оси абсцисс – высота (км) над уровнем $\tau_{500} = 1$. На графиках (слева направо и сверху вниз) : m – масса в столбце ($\text{кг}/\text{м}^2$); τ_{500} – оптическая толщина на длине волны 500 нм; T – температура (K); n_e – электронная концентрация (м^{-3}); N_H – концентрация атомов нейтрального водорода(м^{-3}); V_{turb} (км/с) – турбулентная скорость – принята такой же, как в известной модели VAL3C. Параметр B_0 магнитного поля принят равным 3000 Гс.

Программа активно развивалась примерно до 2010 г., а затем ее стали приспосабливать для синтеза спектра в целях анализа больших массивов данных, поступающих со спутников (например, SDO) и больших телескопов типа вступающего в строй DKIST [4]. Последний вариант RH-code

называется RH1.5D и способен проводить массивные параллельные расчеты на больших кластерах. Описание RH1.5D см. в [5]. Решение обратной задачи для зеемановских профилей одновременно для нескольких атомов и их линий обеспечивает код Stic [6], также опирающийся на опыт RH-code.

Мы смоделировали профиль линии К Са II для полученной модели пятна. Поскольку термодинамика нашей модели предполагает ЛТР, то в программе RH-code населенности атома водорода приняты больцмановскими. Атом кальция вследствие малого содержания можно считать примесным и рассматривать его в неЛТР приближении.

Рис. 2. Профили линии К Са II для модели центра пятна (слева) и спокойного Солнца VAL3C (справа). По оси абсцисс λ – длина волны (нм), по оси ординат J – поток (дж м⁻² с⁻¹ гц⁻¹). Обратите внимание, что слева порядок численных значений 10^{-9} , а справа 10^{-8} .

Интенсивность на частотах линии К в пятне на порядок меньше, чем в невозмущенной атмосфере, а также имеется эмиссионный пик (в наблюдаемых спектрах замыкаемый макроскопическими движениями в тени пятна). Качественно синтезированный спектр близок к наблюдаемому. Количественное сопоставление преждевременно, так как для атома водорода было принято приближение ЛТР. Более точный учет отклонений от ЛТР возможен, если в имеющуюся в RH-code подпрограмму расчета гидростатики включить магнитное поле по методике [1, 2].

По результатам данной работы и работы [1] можно сделать следующие выводы. 1). Подбором зависимости температуры от высоты, глубины вильсоновской депрессии и параметра магнитного поля B_0 возможно получить удовлетворительное согласие синтезированного спектра с наблюдениями в области линии Нδ. При этом напряженность поля принята 3000 Гс. 2). Полученная модель атмосферы пятна более горяча в сравнении с общепринятыми средними значениями для больших пятен. Предварительно мы связываем это обстоятельство с тем, что МГС модель [2] – это фактически приближение мелкого пятна. 3). Профили линии К Са II качественно вос-

производят наблюдаемые, но требуется включение магнитного поля в уравнения гидростатического равновесия.

Работа выполнена в рамках Госзадания Минобрнауки РФ (базовая часть гос. задания, РК № АААА-А17-117030310283-7).

Литература

1. Калинин А.А., Калинина Н.Д. К расчету спектра солнечного пятна // Труды XXII Всероссийской ежегодной конференции «Солнечная и солнечно-земная физика – 2018», ГАО РАН, СПб, 8 – 12 октября 2018, с. 199-202.
2. Соловьев А.А. Моделирование магнитной структуры солнечных пятен // Астрон. журн., 1997, т. 74, с. 131-138.
3. Uitenbroek H. Multilevel radiative transfer with partial frequency redistribution // *Astrophys. Journal*, 2001, v. 557, pp. 389-398.
4. Pevtsov A.A. DKIST: the present and future of the largest solar telescope in the world // Тезисы докладов XXIII Всероссийской ежегодной конференции «Солнечная и солнечно-земная физика – 2019», ГАО РАН, СПб, 7 – 11 октября 2019, с. 82.
5. Pereira Tiago M.D. and Uitenbroek H. RH1.5D: a massively parallel code for multi-level radiative transfer with partial frequency redistribution and Zeeman polarisation // *Astron. Astrophys.*, 2015, v.574, A3, pp. 1-6.
6. de la Cruz Rodriguez J., Leenaarts, S., Danilovic S., Uitenbroek H. Stic: A multiatom non-LTE PRD inversion code for full-Stokes solar observations // *Astron. Astrophys.*, 2019, v. 623, A74, pp. 1-14.