К РАСЧЕТУ СПЕКТРА СОЛНЕЧНОГО ПЯТНА

Калинин А.А., Калинина Н.Д.

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

TOWARD THE SUNSPOT SPECTRUM CALCULATION

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). The observations were carried out on July 13 by three sets from 12–30 to 19 h on the ACU-5 solar telescope and the ASP-20 spectrograph of the AO UrFU CCD camera Starlight SXV-H9 in the first grid order (dispersion 0.238 nm / mm, or 0.0307 nm / pixel with binning). At the beginning of the observations, the magnetic field strength at the center of the spot was 3,600 Gs, and at the end of 3,200 Gs. We discuss the reliability of determining such large magnetic field values. The initial stage of work on the theoretical interpretation of the spectra obtained is described — the construction of a model spectrum of a spot. The main assumptions allowed in simulating such spectra and some software packages that are applicable for modeling are discussed. For the spectrum calculation we used the COSSAM program (version dated January 18, 2017). The possibility of building a model of the atmosphere of the spot consistent with the shallow magnetohydrostatic waist constricted model is considered.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-199-202

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. Физические параметры такого пятна представляют несомненный интерес, поэтому 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). Наблюдения были проведены 13 июля тремя сетями с 12 ч 30 м до 19 ч на солнечном телескопе АЦУ-5 и спектрографе АСП-20 АО УрФУ с ПЗС-камерой Starlight SXV-H9. В начале наблюдений напряженность МП в центре пятна составляла 3600 Гс, а в конце 3200 Гс. Каждый сет состоял из последовательных наблюдений темновых кадров, края Солнца (для определения рассеянного света щель располагалась перпендикулярно верхнему краю), центра диска (для определения плоского поля) и сечения пятна по центру, для линий K, H Ca II и H δ . В каждом положении Солнца и дифракционной решетки регистрировалось 10 кадров для последующего усреднения. На рис. 1 приведен пример спектра в линии H Ca II и сводка службы магнитных полей пятен с положением щели спектрографа.

Рис. 1. **а** – сводка наблюдений МП солнечных пятен. Обозначено положение щели спектрографа; **б** – синтезированный по изложенной в статье методике спектр пятна в области линии Нδ, модель большого пятна согласно [10]. Черное – без МП, серое с МП 3600 Гс. Линии с МП шире и менее глубоки.

В дальнейшем выяснилось, что измерения обсерваторий КрАО, Маунт Вилсон и HMI SDO дают меньшие значения МП для наблюдавшегося пятна. Тем не менее, мы считаем, что вопрос о величине поля нельзя считать окончательно решенным по следующим причинам. Наблюдения полей пятен на АО УрФУ ведутся с 1965 г., наблюдатель Г.В. Лямова является старейшим и опытейшим в нашей Службе Солнца. Не так давно проводилось сравнение измерений четырех обсерваторий (Киев, КрАО, АО УрФУ, Маунт Вилсон) и первые три в среднем показали хорошее соответствие, а пониженными относительно среднего значения были измерения Маунт Вилсон [1] (см. также работу Цап Ю.Т. с соавторами на настоящей конференции [2]). Известны проблемы измерения сильных МП и МП вообще на аппарате HMI SDO, вызванные насыщением сигнала поляриметра, а также доплеровскими сдвигами сигнала вследствие собственных движений спутника на орбите, что вынуждает прибегать к сложным редукам наблюдаемого сигнала (см., например, [3]). В связи с вышеизложенным кажется интересным построить эмпирическую модель атмосферы пятна и найти возможные указания на наличие сильного МП. Далее изложен возможный подход к решению этой задачи.

Для определения параметров в атмосфере Солнца, звезд и пятен в настоящее время чаще всего применяется метод решения обратной задачи путем построения модели атмосферы с последующим синтезом спектра и сравнения его с наблюдениями. Имеющийся наблюдательный материал позволяет провести:

- моделирование спектра для фотосферы в условиях, близких к ЛТР, в области линии H δ ;

- то же для крыльев линий H и K Ca II (см., например [4]);

- определение параметров хромосферы над пятном по ядрам линий H и K Ca II; возможна упрощенная диагностика [5], и решение обратной задачи [6, 7]. Для ядер линий H и K необходимо учитывать отклонения от ЛТР.

В public domain существуют несколько программ синтеза спектра в присутствии МП. Мы выбирали из трех программ.

- SME [8]: код высочайшего уровня для моделирования спектров звезд. Не учитывает МП, но мог бы служить для оценок параметров в немагнитной окрестности пятна. К сожалению, написан на проприетарном языке IDL и требует лицензированной версии (в коде вшита проверка лицензии).

- NICOLE [6]: решает обратную задачу как в ЛТР, так НЕЛТР. Требует больших вычислительных ресурсов (кластер, протокол MPI).

- COSSAM [9]: программа ЛТР синтеза четырех параметров Стокса по заданной модели атмосферы. Требует задания магнитного поля, список линий и их параметры могут быть заданы, а можно использовать готовый. Возможно использование упрощенной модели атмосферы с заданием параметров: T_{eff} – эффективная температура, $\log(g)$ – логарифм ускорения силы тяжести, He – содержание гелия (по числу атомов), ρ_x – масса столбца на глубине x , τ – оптическая толщина на глубине x и длине волны 500 нм, θ – обратная температура $5040/T$, $\log p_e$ – логарифм электронного давления, $\log p_g$ – логарифм полного давления, $\log k$ – коэффициент непрерывного поглощения на длине волны 500 нм. Эта программа используется для расчета спектра.

Для построения модели атмосферы пятна мы выбрали методику построения простой магнитогидростатической модели пятна согласно работе [10]. Основные свойства данной модели: выполняется принцип подобия Шюттера-Темешвари; пятно ниже уровня вильсоновской депрессии экранировано от окружающей среды защитным слоем, а выше – нет; конфигурация магнитного поля определяется функцией $\omega(z)$, имеющей смысл площади поперечного сечения силовой трубки, заключающей в себе единицу магнитного потока поля напряженности B ; экранированная и неэкранированная части пятна сшиваются на уровне $Z = 0$ при условии
$$\left[\omega'' - \frac{3}{2} \frac{(\omega')^2}{\omega} \right]_0 = 0$$
, или $P(\infty, z) = P(0, z) + B^2(0)/8\pi$. Это место в пятне можно назвать перетяжкой – здесь выполняется простой баланс давлений, как для вертикального магнитного цилиндра. Баланс давлений в пятне и вне пятна определяется уравнением $P(\infty, z) - P(r, z) = B^2(r, z)/8\pi$. Параметры, характеризующие модель пятна (подробности в [10]) следующие: ϵ – малый параметр, определяющий отклонение МП от потенциального; λ – высота пере-

хода к потенциальному полю; n – коэффициент пропорциональности между глубиной залегания эффективного монополя и λ ; β – определяет поведение ω ниже перетяжки; B_0 – магнитное поле на уровне перетяжки; Z_w – вильсоновская депрессия. Задав параметры модели, по уравнению для давления можно дифференцированием по Z найти $\rho(z)$ на оси симметрии. Затем задав значение молекулярного веса μ найти $T(z)$, и итерациями уточнить решение. Для реализации алгоритма была составлена программа SUNSPOT. Термодинамическая часть содержит программы TERPAR и TEMUPE для определения μ , электронного давления p и коэффициента непрерывного поглощения, с точностью лучше 1% воспроизводящая термодинамику модели атмосферы HSRA и модели конвективной зоны Spruit, которые и задавали внешние условия при решении МГС. В целом при задании указанных параметров модели получается модель атмосферы пятна, достаточная для программы расчета спектра COSSAM. Пример синтеза спектра для модели большого пятна согласно [10] приведен на рис. 16.

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

Литература

1. Лозицкая Н.И., Г.В. Лямова, В.М. Малащук. Сравнение результатов визуальных измерений магнитных полей крупных солнечных пятен, выполненных в разных обсерваториях в 23 цикле солнечной активности // Известия КрАО, 2006, т. 103, ч. 2, с. 60-67.
2. Цап Ю.Т., Лозицкая Н.И., Перебейнос В.А. и др. Сравнение визуальных измерений магнитных полей пятен в Крыму и на Маунт-Вилсон // Солнечная и солнечно-земная физика – 2018, Тезисы докладов, СПб, Пулково, 8–12 октября, с. 107.
3. Schuck P.W., Antiochos S.K., Leka K.D. et al. Achieving Consistent Doppler Measurements from SDO/HMI Vector Field Inversions // Astrophys. Journal, 2016, V. 823, pp. 101-122.
4. Sheminova V.A., Rutten R.J., Rouppe van der Voort L.H.M. The wings of Ca II H and K as solar fluxtube diagnostics // Astron. Astrophys., 2005, v. 437, pp. 1069-1080.
5. Ding M.D., Fang C. A semi-empirical model of sunspot penumbra // Astron. Astrophys., 1989, v. 225, pp. 204-212.
6. Socas-Navarro H., de la Cruz Rodriguez J., Asensio Ramos A. et al. An open-source, massively parallel code for non-LTE synthesis and inversion of spectral lines and Zeeman-induced Stokes profiles // Astron. Astrophys., 2015, v. 577, A7, pp. 1-10.
7. Teplitskaya R.B., Grigoryeva S.A., Skochilov V.G. Determination of the relative populations from strong Fraunhofer line profiles by solving an inverse problem // Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 1996, v. 115, pp. 209-217.
8. Piskunov N., Valenti J.A. Spectroscopy Made Easy: Evolution // Astron. Astrophys., 2017, v. 597, A16, pp. 1-10.
9. Wade G.A., Bagnulo S., Kochukhov O. et al. LTE spectrum synthesis in magnetic stellar atmospheres. The interagreement of three independent polarised radiative transfer codes // Astron. Astrophys., 2001, v. 374, pp. 265-279.
10. Соловьев А.А. Моделирование магнитной структуры солнечных пятен // Астрон. журн., т. 74, с. 131-138.