МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРОВ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТУБЕРАНЦЕВ

Калинин А.А.

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

MODELING OF THE SOLAR PROMINENCES SPECTRUM

Kalinin A.A.

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

We give short review of the solar prominence spectrum modeling: basic physical assumptions and numerical methods. Three codes of the MEDOC group (France) for such modeling are described. Some results for the helium HeII 30.4 nm and hydrogen HI H α lines intensities ratio are given. The Monte-Carlo method for the spectrum modeling of the calcium lines in the cylinder geometry is shortly described.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-195-198

Моделирование спектров солнечных протуберанцев является сложной задачей теории переноса излучения, решение которой требует больших вычислительных ресурсов [1]. Приведем базовые уравнения и предположения в стандартных обозначениях [3].

Уравнение переноса излучения (УПИ) с соответствующими принятой геометрии граничными условиями

$$\frac{dI_\nu}{ds} = -\chi_\nu I_\nu + \eta_\nu$$

Уравнения стационарности (УС) для населенностей энергетических уровней рассматриваемых атомов

$$N_j \sum_{j \neq i}^n P_{ji} = \sum_{j \neq i}^n N_i P_{ij}$$

$$P_{ji} = A_{ji} + B_{ji} \bar{J}_{ij} + C_{ji} = R_{ji} + C_{ji}$$

$$P_{ij} = B_{ij} \bar{J}_{ij} + C_{ij} = R_{ij} + C_{ij}$$

Здесь ν – частота, I_ν – удельная интенсивность, s – путь вдоль направления полета фотона, χ_ν – коэффициент поглощения, η_ν – коэффициент излучения, N_j – населенность уровня j , P_{ij} – суммарная скорость перехода с уровня i на уровень j , R – скорость радиационных переходов, C – скорость ударных переходов, A и B – коэффициенты Эйнштейна, $\bar{J}_{ij}$ – средняя по профилю интенсивность в переходе ij . Необходимо знать скорости переходов A , B , C , задать геометрию и кинематику – зависимость скорости V_{xyz} (или $V_{r\theta\phi}$ в цилиндрической геометрии), а также задать модель атома (или атомов).

Существуют достаточно сложные комплексы программ для моделирования спектров протуберанцев. Рассмотрим кратко программы группы MEDOC (Франция) [4].

prom7. В этой программе протуберанец моделируется плоским бесконечным слоем (геометрически одномерная задача) – рис. 1а.

Рис. 1. а – модель плоского бесконечного слоя, программа **prom7** (слева); б – бесконечный цилиндр, программы **cyma2dv** и **c2d2e** (справа).

Плазма в протуберанце изобарическая и изотермическая. Параметры модели: T – температура, P – давление, V – микротурбулентная скорость, e – толщина, h – высота над поверхностью Солнца. При решении УПИ учитывается перераспределение по частотам в так называемой стандартной формулировке [5]. Для водорода учитывается 20 уровней и континуум, для кальция – один уровень Ca I, 5 уровней Ca II, один уровень Ca III. Метод решения – Фотри с переменными эддингтоновскими множителями [3]. Программа дает на выходе интегральные интенсивности в первых лаймановских и бальмеровских линиях, линиях Ca II, а также постскриптовский файл профилей избранных линий. Пример расчета с помощью данной программы приведен в работах [2, 6]. Программа работает очень надежно - в диапазоне давлений от 0.001 до 1 дин/см² и температур от 4 до 20 тыс. К сошлись все модели.

cyma2dv. Протуберанец моделируется бесконечным цилиндром, ось которого наклонена под углом α к нормали к поверхности Солнца (рис. 1б). Для изобарической-изотермической модели входные параметры те же, что и для prom7 с добавлением угла наклона α (вместо толщины используется диаметр D). Возможно введение переходного слоя от изотермического цилиндра радиусом R_0 и температурой T_0 до внешнего радиуса R_1 с температурой T_1 . Внутри цилиндра возможно ввести поле скоростей - вдоль цилиндра, а также расширение и вращение. К сожалению, на данный момент параметры поля скоростей зашиты в код программы, и для их ис-

пользования необходимо текст программы редактировать. Модель атома водорода ограничена 5 уровнями и континуумом. Есть программа **visu** визуализации результатов с достаточно ограниченными возможностями (eps файл некоторых профилей линий в разных сечениях цилиндра и т.п.). Метод расчета: ускоренные Λ -итерации [3]. Пример использования программы см. в [7].

c2d2e. Геометрия, параметры модели и способ решения те же, что и для **сума2dv**. Нет поля скоростей, но расчет ведется для атома водорода и для атома гелия с учетом взаимного поглощения в линиях и континууме. Для атома водорода учтено 5 уровней и континуум, для атома гелия: 29 уровней He I, 4 уровня He II и 1 уровень He III (континуум). Особый интерес представляет возможность расчета линии 30.4 нм He II. На момент написания данной статьи текст программы на сайте отсутствует и дан e-mail, по которому интересующимся можно обратиться при желании использовать программу. Автор имеет вариант, ранее выложенный на сайте за март 2016 г. Опыт работы с программой показал, что к ней необходим дополнительный пакет анализа результатов, т.к. в случае малых плотностей программа **visu** не срабатывает. Пример работы программы приведен в [8]. На рис. 2а приведена зависимость от давления и температуры отношения интенсивности в водородной линии $H\alpha$ к интенсивности в линии He II 30.4 нм, рассчитанных по программе **c2d2e** для верхней части петельного протуберанца – суммарные по вертикальному сечению параллельного поверхности Солнца цилиндра значения.

Рис. 2. а – график зависимости отношения интенсивности в водородной линии $H\alpha$ к интенсивности в линии He II 30.4 нм (слева).

б – геометрия метода Монте-Карло. Вектор GC характеризует направление полета модельного фотона, рожденного внутри цилиндра, а вектор EC направление модельного фотона, пришедшего от Солнца (справа).

Метод Монте-Карло. Метод является адаптацией программы Bernes [9] к цилиндрической геометрии. Основы методики описаны в [10], а способ ускорения сходимости в [11]. Поле радиации в среде представляется с

помощью модельных фотонов (М-фотонов), излучаемых атомами среды (диффузная составляющая) или поступающих снаружи (прямое излучение Солнца) – см. рис. 2б. Предполагается полное перераспределение по углам и частотам в элементарном акте рассеяния. Среда считается цилиндрической, все ее параметры зависят только от расстояния до оси цилиндра (радиуса). Цилиндр делится на оболочки. Направление полета М-фотонов определяется распределением интенсивности излучения по углам, а количество – интенсивностью на данной частоте. Каждому М-фотону приписывается также начальный вес W_0 в зависимости от общей интенсивности поля излучения в данном переходе (спектральной линии или континууме). Программа **МК** позволяет рассчитывать профили бальмеровских линий атома водорода для бесконечного цилиндра, перпендикулярного поверхности Солнца с произвольным полем скоростей в теле протуберанца. В настоящее время проводится модификация программы с целью возможности учета наклона цилиндра к поверхности Солнца (2D геометрия) с произвольным полем скоростей внутри, а также учета поля излучения водорода (берется из программы *сума2dv*) и его влияния на континуумы ионизованного кальция, что должно позволить корректно рассчитать спектр кальция в активном петельном протуберанце.

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

Литература

1. *Labrosse N., Heinzel P., Vial J. et al.* Physics of Solar Prominences: I – Spectral Diagnostics and Non-LTE Modelling // *Space Sci. Rev.*, 2010, v.151, pp. 243-232.
2. *Gouttebroze P., Heinzel P.* Calcium to hydrogen line ratios in solar prominences // *Astron. Astrophys.*, 2002, V. 385, pp. 273-280.
3. *Hubeny I., Mihalas D.* Theory of stellar atmospheres – 2015, Princeton Univ. Press, 923 p.
4. [https://idoc.ias.u-psud.fr/MEDOC/Radiative transfer codes](https://idoc.ias.u-psud.fr/MEDOC/Radiative%20transfer%20codes).
5. *Heinzel P., Gouttebroze P., Vial J.* Formation of the hydrogen spectrum in quiescent prominences – One-dimensional models with standard partial redistribution // *Astron. Astrophys.*, 1987, v. 183, pp. 351-362.
6. *Калинин А.А.* Нейтральный и ионизованный кальций в солнечных протуберанцах / Солнечная и солнечно-земная физика 2017, СПб, Пулковское, 9–13 октября, с. 165-168.
7. *Gouttebroze P.* Radiative transfer in cylindrical threads with incident radiation. V. 2D transfer with 3D velocity fields // *Astron. Astrophys.*, 2008, v. 487, pp. 805-813.
8. *Gouttebroze P., Labrosse N.* Radiative transfer in cylindrical threads with incident radiation. VI. A hydrogen plus helium system // *Astron. Astrophys.*, 2009, v. 503, pp. 663-671.
9. *Bernes C.* A Monte Carlo approach to non-LTE radiative transfer problems // *Astron. Astrophys.*, 1979, v. 73, pp. 67-73.
10. *Калинин А.А., Соболев А.М.* Метод Монте-Карло для многоуровневых задач переноса излучения в случае бесконечного вращающегося цилиндра // *Астрономическо-геодезические исследования: Динамические и физические характеристики небесных тел*, 1988, Свердловск: УрГУ, с. 56-63.
11. *Калинин А.А.* Влияние вращения и расширения на профили водородных линий в цилиндрических протуберанцах: расчет методом Монте-Карло с улучшенной сходимостью / Труды конференции “Структура и динамика солнечной короны”, Троицк, 4–8 октября 1999 г., с. 259-264.