

РАСЧЕТ СПЕКТРА ПРОСТОЙ МАГНИТОГИДРОСТАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОТУБЕРАНЦА

Калинин А.А., Калинина Н.Д.

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

CALCULATION OF THE SPECTRUM FOR THE SIMPLE MAGNETOHYDROSTATIC PROMINENCE MODEL

Kalinin A.A., Kalinina N.D.

Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

In this paper, we attempt to simulate the prominence spectrum for the magnetohydrostatic (MHS) model described in [1]. It calculates the thermodynamic parameters of a two-dimensional prominence model based on the solution of the inverse MHS problem. We calculated the $H\alpha$ line profile for the cold part of the prominence using the approximate technique of [2], and in a two-dimensional model using the MALI-NLTE2D method (see [3]). The calculations were performed both for the filament model (the prominence is observed on the solar disk) and for limb observations. The results are qualitatively close, but the agreement is broken when hotter regions of the MHS model are included. The calculation using the approximate technique allows for a quick estimate of the prominence plasma parameters, and taking into account the radiative transfer improves the accuracy of the MHS model, since it allows to calculate the degree of ionization of the prominence plasma and determine its molecular weight.

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-149-152>

В последние годы достигнут существенный прогресс в понимании процессов, характеризующих активность образований в солнечной атмосфере – вспышек, протуберанцев, корональных выбросов массы. Для этого привлекается мощный аппарат радиационной магнитогидродинамики и соответствующие вычислительные мощности, наработан опыт решения самосогласованного моделирования объектов на Солнце. Пример такого подхода описан, например, в [4]. При этом полное решение МГД задачи с полным учетом переноса энергии пока остается крайне трудоемкой задачей с большими затратами вычислительных средств. Поэтому роль простых моделей для выяснения качественных характеристик объекта остается достаточно важной.

Если характерные скорости внутри исследуемого объекта (в нашем случае протуберанца) существенно меньше альвеновских, то можно рассматривать его эволюцию как последовательность квазистационарных магнитостатических конфигураций со своим набором магнитных и термодинамических параметров – вектора магнитного поля $\mathbf{B}$, плотности ρ , температуры T , газового давления P и среднего молекулярного веса μ (химсостав стандартный солнечный). Таким образом, применяется подход маг-

нитной гидростатики – МГС. Получаемую в рамках такого подхода модель нужно привязать к наблюдениям, а для этого рассчитать ее спектр (визуализация модели).

В 2010 г. Соловьевым [1] был предложен подход к получению МГС моделей протуберанцев на основе обратной задачи – по известной конфигурации магнитного поля рассчитать термодинамические параметры. В результате единым образом получаются все классические модели – Киппенхана-Шлютера, Пикельнера, Куперуса-Рааду.

Для двумерной модели основные уравнения согласно [1] (см. рис. 1а).

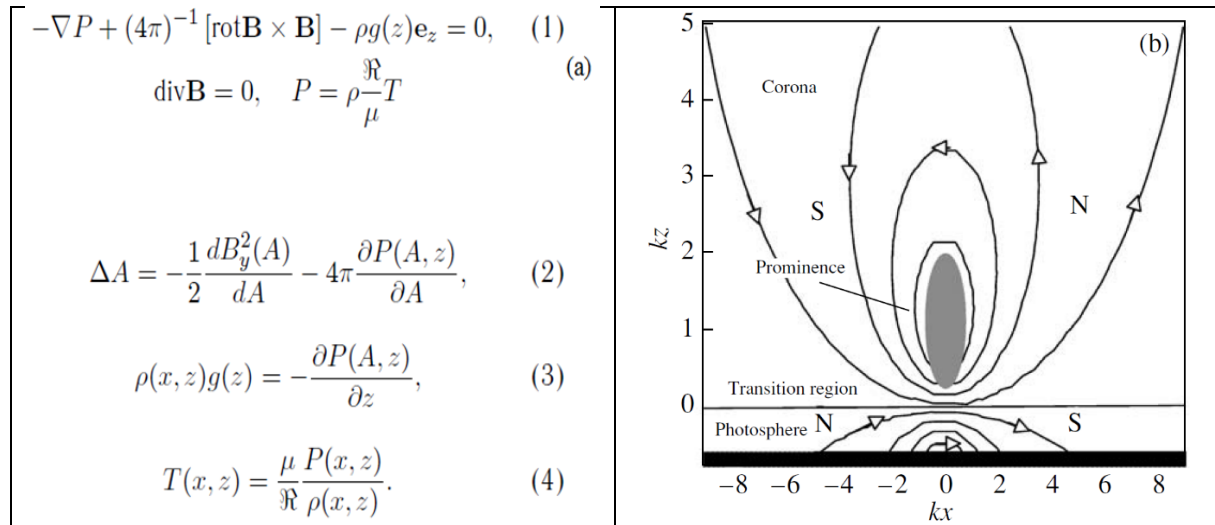


Рис. 1.

Магнитная конфигурация (рис. 1b) расположена на поверхности Солнца (предполагается плоской), ось y перпендикулярна плоскости рисунка (параметры вдоль оси y не меняются), ось x параллельна поверхности Солнца, ось z – перпендикулярна ей. $A(x, z)$ – функция магнитного потока, k – определяет масштаб по осям, остальные обозначения стандартны. Данная конфигурация соответствует протуберанцу обратной полярности – модель Куперуса-Рааду (подробности см. [1]). N и S – полярности поля для наблюдателя, смотрящего в направлении $-z$.

Самой доступной линией для наблюдений протуберанцев является линия $H\alpha$. Для визуализации МГД моделей в этой линии в работе [2] предложен приближенный метод, основанный на расчетах одномерных моделей [5, 6]. В этом методе функция источника S в линии $H\alpha$ считается постоянной, и для расчета выходящей в произвольном направлении интенсивности в линии требуется только проинтегрировать по лучу зрения (LOS) функцию источника. При известных из МГС модели термодинамических параметрах (рис. 2b) все сводится к цепочке формул (рис. 2а, обозначения стандартные).

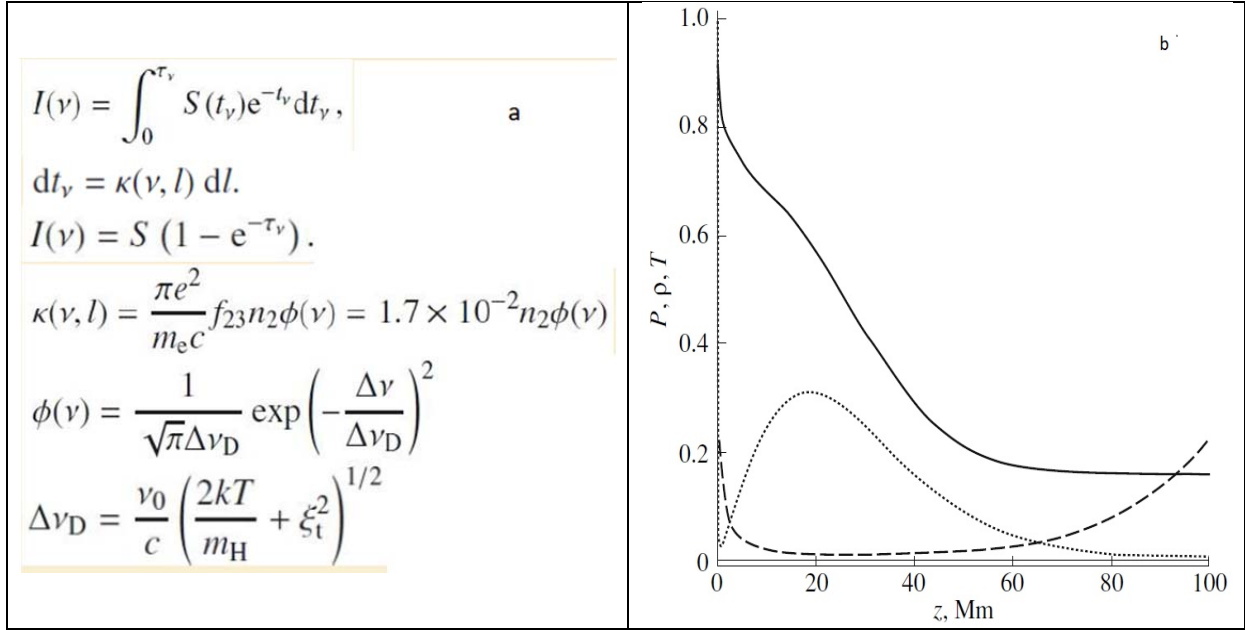


Рис. 2. Справа – сплошная линия давление $P(z,0)$ дин см^{-2} , точки – плотность $\rho(z,0)$ в ед. $1.7 \times 10^{12} \text{ г см}^{-3}$, штрих – температура T млн Кельвин.

В приближенном методе [2] степень ионизации рассчитывается тоже приближенно. Для точного расчета необходимо получить решение двумерной задачи переноса излучения в условиях больших отклонений от локального термодинамического равновесия (2D NLTE). Это было сделано с помощью программы NLTE2D (опирающейся на методику MALI [8, 9]),

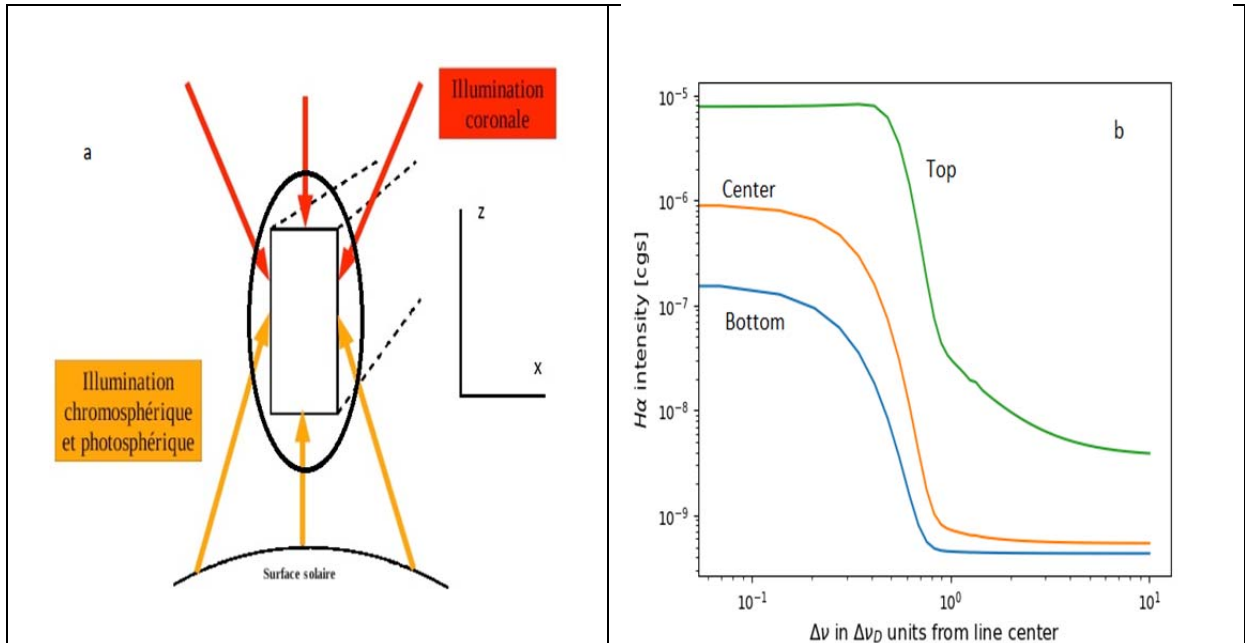


Рис. 3.

описанную в [3, 7]. Геометрия задачи показана на рис. 3а. Протуберанец представлен в виде параллелепипеда (бруса), освещенного излучением

Солнца и короны, параллельного солнечной поверхности с трансляционной симметрией по оси y . Обозначенный жирной линией овал – примерная внешняя граница магнитной конфигурации протуберанца (см. рис. 1b).

Расчеты NLTE 2D задачи проведены на сетке 63×63 , плотность сетки логарифмически растет к центру протуберанца (для учета растущих оптических глубин). Рассчитаны степени ионизации, населенности уровней для 5-уровневого с континуумом атома водорода. В качестве иллюстрации результатов приведены профили линии $H\alpha$ для протуберанца на лимбе при наблюдении нижней, средней и верхней части протуберанца (рис. 3b). Более подробные результаты будут представлены в другой работе.

Результаты и выводы

Показана возможность расчета населенностей атома водорода в 2D МГС модели протуберанца [1]. Рассчитан профиль линии $H\alpha$ для холодной части протуберанца согласно приближенной методике [2], а также в двумерной модели по методу NLTE2D-MALI [3]. Расчеты были проведены как для модели волокна (протуберанец наблюдается на диске Солнца), так и для наблюдений на лимбе. Качественно результаты близки, но при включении более горячих областей МГС модели согласие нарушается. При этом расчет по приближенной методике позволяет проводить быструю оценку параметров плазмы протуберанца, а учет переноса излучения улучшает точность МГС модели, т.к. позволяет рассчитать степень ионизации вещества и определить его молекулярный вес.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Науки и Высшего Образования Российской Федерации, тема № FEUZ-2023-0019.

Литература

1. Solov'ev A.A. // *Astronomy Reports*, 2010, Vol. 54, No. 1, pp. 86–95.
2. Heinzel P., Gunar S., Anzer U. // *Astron. Astrophys.*, 2015, v. 579, A16.
3. Leger L. These, 2008, Universite de Toulouse III, 152 p.
4. Bjørgen J.P., Leenaarts J. et al. // *Astron. Astrophys.*, 2019, 631, A33.
5. Gouttebroze, P., Heinzel, P., and Vial, J.-C. // *A&AS*, 1993, 99, p. 513.
6. Heinzel, P., Vial, J.-C., and Anzer U. // *Astron. Astrophys.*, 2014, v. 564, A132.
7. Léger L., Chevallier L., and Paletou F. // *Astron. Astrophys.*, 2007, v. 470, p.1-9.
8. Rybicki G.B., Hummer D.G. // *Astron. Astrophys.*, 1991, v. 245, pp. 171-181.
9. Heinzel P. // *Astron. Astrophys.*, 1995, v. 299, pp. 563-573.