

РАСЧЕТ СПЕКТРА МАГНИТОСТАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВОЛОКНА ДЛЯ ЦЕНТРА ДИСКА СОЛНЦА

Калинин А.А., Калинина Н.Д.

Уральский Федеральный университет, Екатеринбург, Россия

CALCULATION OF THE SPECTRUM OF THE MAGNETOSTATIC FILAMENT MODEL FOR THE SOLAR DISK CENTER

Kalinin A.A., Kalinina N.D.

Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-145-148>

In this report, an attempt is made to simulate the spectrum of a prominence based on the magnetostatic model described in [1]. It calculates the thermodynamic parameters of a two-dimensional prominence model. In our case, we set the task of testing the possibility of constructing an atmospheric model for calculating the spectrum, allowing the use of known radiative transfer programs (at the first stage, one-dimensional ones). The spectrum in hydrogen lines was calculated for the vertical section of the MHS model, which corresponds to the spectrum of a cold filament lying horizontally above the surface of the Sun and, according to [1], having a hot, less dense filament underneath it. In the future, it is planned to generalize this technique for two-dimensional problems.

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 магнитогазодинамики и соответствующие вычислительные мощности, наработан опыт решения самосогласованного моделирования объектов на Солнце. Пример такого подхода описан, например, в [11]. Важно не только понять конфигурацию и динамику магнитного поля, определяющего активность солнечных объектов, но рассчитать спектральный отклик моделируемого объекта, поскольку именно спектр – это то, что мы реально наблюдаем.

Если характерные скорости внутри исследуемого объекта (в нашем случае вспышечно-подобной структуры – ВПС, обычно видимой на лимбе в виде активного протуберанца, а на диске – активизирующегося волокна) существенно меньше альвеновских, то можно рассматривать его эволюцию как последовательность квазистационарных магнитоэстатических 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 магнитной гидростатики – МГС. Для полученной конфигурации рассчитывается спектр.

МГС модели известны давно – классическая модель Киппенхана-Шлютера [4] (магнитный “гамак”), “сифон” Пикельнера [5], инверсной полярности магнитного поля Куперуса-Рааду [7] и др. Для сопряжения с программами расчета переноса излучения наиболее удобна модель [4], в рамках которой выполнена классическая работа Хисли и Михаласа [9], развитая впоследствии Хайнцелем и Анзером [6,10 и более поздние].

В 2010 г. Соловьевым [2] 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 [2] см. рис. 1а.

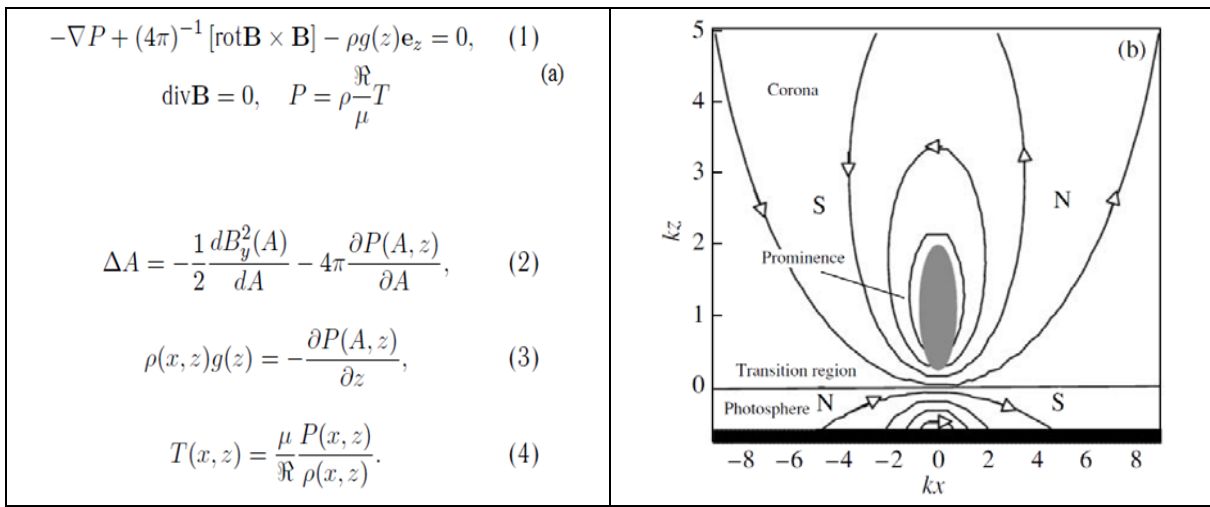


Рис. 1.

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. Приведена ВПС, соответствующая протуберанцу обратной полярности – модель Куперуса-Рааду (подробности см. [2]). N- и S- полярности поля для наблюдателя, смотрящего в направлении $-z$.

По методике работы [2] в [1] построена модель ВПС для вспышки 6 июля 2011 г., использованная затем в [3] для расчета колебаний такой ВПС. ВПС состоит из двух волокон: холодного, лежащего горизонтально над поверхностью Солнца и имеющего под собой горячее менее плотное волокно (см. рис. 2а). На рис. 2b показаны величины плотности ρ , температуры T и компоненты магнитного поля B_x для разреза ВПС по вертикали ($x = 0$). Принято $\mu = 1.2$.

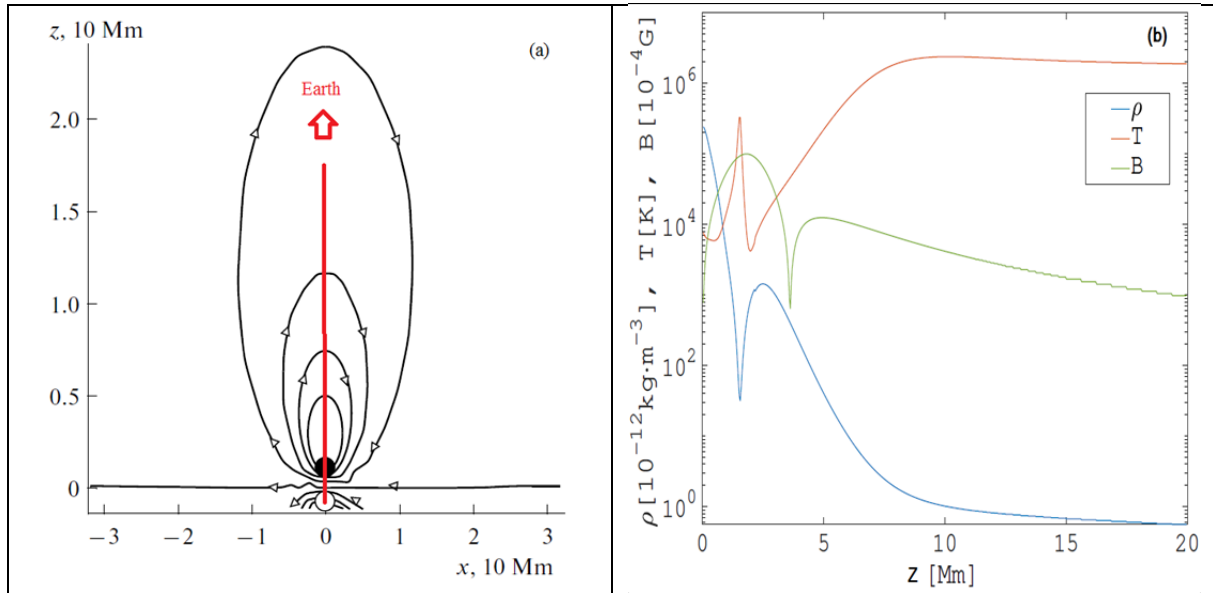


Рис. 2.

Мы поставили задачу опробовать возможность расчета спектра для вертикального сечения описанной МГС модели ВПС, допускающей применение известных программ переноса излучения (на первом этапе одномерных). Расчет спектра производился при помощи программы PRODOP (см., например, [12]). Необходимое для построения модели атмосферы ВПС давление получено из уравнения (4) – рис. 1а. Рассчитан спектр в линиях водорода для вертикального сечения данной МГС модели.

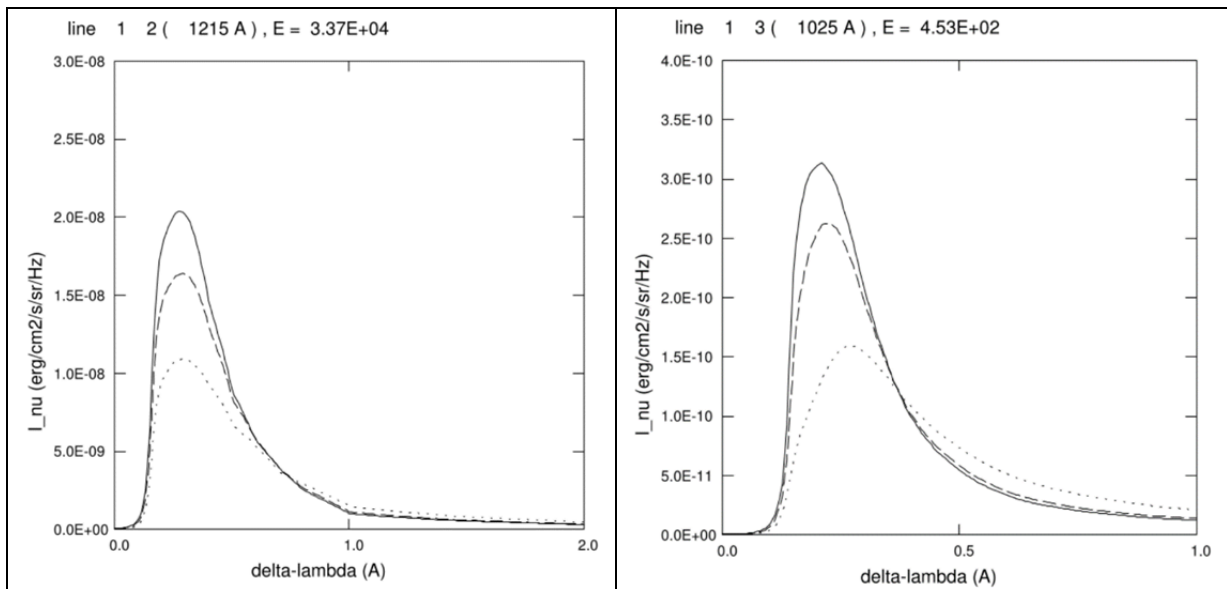


Рис. 3. Слева линия $Ly\alpha$, справа $Ly\beta$.

Профили двух линий водорода (как они видны с Земли – см. рис. 2а) приведены на рис. 3 (постскриптовский файл вывода программы PRODOP). Профили линий $Ly\alpha$ и $Ly\beta$ показаны сплошной линией. Штри-

ховая и пунктирная линии соответствуют наблюдениям под другим углом и не отражают физику задачи вследствие одномерного подхода и сложной структуры ВПС.

Программа PRODOP в принципе позволяет считать спектры ионизованных кальция и магния, а также гелия. Однако в нашей упрощенной постановке удовлетворительно удалось получить только спектры водорода, а также частично магния и кальция. При этом достигнуть сходимости удалось только при исключении области $z > 5$, т.е. высоких температур и низких плотностей. Кроме того, необходима очень мелкая сетка по x в области особенностей ($z \approx 1.2$) Для гелия не удалось получить результатов, итерации завершаются аварийно.

Результаты и выводы

Показана возможность расчета линий водорода в одномерном сечении МГС модели вспышечно-подобной структуры с помощью известной программы PRODOP (псевдоформальное решение уравнения переноса, т.е. без учета второго измерения). Необходимо тщательно учитывать возможные быстрые изменения параметров модели, сетка по координате z должна быть адаптивной. В дальнейшем нужен переход к двумерным моделям.

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

Литература

1. Solov'ev A.A. // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2012, Vol. 52, No. 8, pp. 1062–1069.
2. Solov'ev A.A. // *Astronomy Reports*, 2010, Vol. 54, No. 1, pp. 86–95.
3. Jelínek P., Karlický M., Smirnova V.V. and Solov'ev A.A. // *Astron. Astrophys.*, 2020, 637, A42.
4. Kippenhahn, R. and Schlüter, A. // *Zeitschrift für Astrophiz.*, 1957, Vol. 43, p.36.
5. Pikelner S.B. // *Solar Phys.*, 1971, **17**, 44.
6. Anzer U. // *Solar Phys.*, 1972, **24**, 324.
7. Kuperus M. and Raadu M.A. // *Astron. Astrophys.*, 1974, **31**, 189.
8. Low B.C. // *Astrophys. J.*, 1975, **197**, 251.
9. Heasley J.N., Mihalas D. // *Astrophys. J.*, 1976, Vol. 205, pp. 273–285.
10. Anzer U., Heinzel P. // *Astron. Astrophys.*, 1999, 349, 974–984.
11. Bjørgen J.P., Leenaarts J. et al. // *Astron. Astrophys.*, 2019, 631, A33.
12. Labrosse N., Gouttebroze P. and Vial J.-C. // *Astron. Astrophys.*, 2007, Vol. 463, pp. 1171–1179.