

УДК 523.98

Ускорение плазмы над тенью пятен

О. С. Гопасюк, С. И. Гопасюк

Крымская астрофизическая обсерватория, 98409, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 07 июля 2003 г.

Аннотация. На основании анализа данных наблюдений лучевых скоростей, измеренных по линиям разной интенсивности нами (Гопасюк, Гопасюк, 2002) было сделано предположение, что в области температурного минимума происходит эффективная диффузия плазмы в магнитное поле тени пятна. Около 6% этого потока приходится на формирование квазистационарного потока, направленного вверх. Над тенью некоторых пятен возможно ускорение плазмы от 0.1 км/с над областью температурного минимума до 16 – 20 км/с в переходной области хромосфера – корона. Одновременно с ускорением плазмы имеет место ее нагрев от 3500 К в области температурного минимума до 10^5 К в области образования линии CIV 1548 Å. Такой характер изменения с высотой скорости и температуры плазмы возможен при наличии внешнего поля, воздействующего на плазму. Определены величина силы и величина энергии, подводимые к плазме и изменение этих величин с высотой, чтобы создать наблюдаемые скорость и температуру плазмы.

PLASMA ACCELERATION ABOVE SUNSPOTS UMBRAE by *O.S. Gopasyuk, S.I. Gopasyuk*. On the basis of the observational line-of-sight velocities measured in the lines of different intensity was made conclusion that effective plasma diffusion in a sunspot umbra magnetic field takes place in the temperature minimum region. About 6% of this plasma flow forms the quasi-stationary flow directed upwards. There is possibly an acceleration of the plasma from 0.1 km/s above the temperature minimum region up to 16 – 20 km/s in the chromosphere – corona transition region above some sunspots umbrae. Coincidentally with its acceleration the plasma gets warm from 3500 K in the temperature minimum region up to 10^5 K in the region of the CIV 1548 Å line formation. Such a pattern of changes in the plasma velocity and temperature with height is possible in the presence of an external field influencing the plasma. The magnitudes of the force and energy were calculated for an external field, which needs to produce the observational velocity and temperature of the plasma.

Ключевые слова: Солнце, пятна, магнитные поля, движения плазмы

1 Введение

Движения плазмы над тенью пятен привлекательны тем, что они происходят в сильном магнитном поле, ориентированном преимущественно вертикально. Наблюдения поля лучевых скоростей, измеренных в пятнах по линиям разной интенсивности, показали, что крупномасштабные движения в хромосфере над тенью пятна не являются прямым продолжением движений в фотосфере (Гопасюк, 2000).

Переход от движений, характерных для фотосферы (вертикальная скорость направлена вниз) к движениям, характерным для хромосферы (вертикальная скорость направлена вверх), происходит на высоте формирования центральной части линии FeI 5270 Å (в области температурного минимума). На этой высоте поле скоростей состоит из отдельных мелкомасштабных элементов со встречным направлением движений. Создается видимость, что имеет место нарушение уравнения непрерывности движения материи. Для разрешения этого противоречия нами (Гопасюк, Гопасюк, 2002) было высказано предположение, что в области температурного минимума происходит эффективная диффузия плазмы в магнитное поле тени пятна и создана модель течения плазмы в области температурный минимум – фотосфера.

Наблюдения по ультрафиолетовым (УФ) линиям пока довольно редки. И, естественно, не имеется достаточных наблюдательных данных, на основании которых можно было бы сделать вывод о степени регулярности направления крупномасштабных движений плазмы и величине их скорости. Тем не менее, наблюдения в линии CIV 1548 Å над тенью некоторых пятен в переходной области хромосфера – корона, где температура плазмы 10^5 К, выявили подъем вещества (Алиссандракис и др., 1987; Атей и др., 1983; Кингстон и др., 1982; Лайтс, 1980; Мейн и др., 1982). Наряду с этим, имеются наблюдения показавшие, что в переходной области хромосфера – корона над тенью пятен крупномасштабные дозвуковые и сверхзвуковые потоки плазмы направлены вниз (Атей и др., 1983; Николас и др., 1982).

Для анализа нами были взяты только те наблюдения в линии CIV 1548 Å, которые показали движения, направленные вверх. Исследования движений плазмы над тенью пятен проведены в пределах высот температурный минимум – переходная область хромосфера – корона.

2 Изменение скорости с высотой

Значения потоковых скоростей плазмы над тенью пятна взяты по результатам данных наблюдений в трех линиях: FeI 5270 Å (Гопасюк, 2000), H_β (Гопасюк, 1999) и CIV 1548 Å (Алиссандракис и др., 1987; Лайтс, 1980; Мейн и др., 1982). Наблюдения в FeI 5270 Å и H_β относятся к одним и тем же четырем одиночным пятнам. Скорости, измеренные в CIV 1548 Å, относятся к другим пятнам.

Линия FeI 5270 Å образуется на высоте около 600 км над фотосферой (Маттиг, 1969) и располагается в области температурного минимума. Средняя по тени пятна скорость направлена вверх и равна 0.1 км/с. Высота образования линии H_β в среднем составляет 1400 км (Маттиг, 1962), а средняя скорость в тени пятна – направлена вверх и равна 0.7 км/с. Линия CIV 1548 Å формируется над пятном в переходной области хромосфера – корона при температуре 10^5 К (Джордан, 1969; Николас и др., 1982). Исследования Хагъярд и др. (1983) показали, что высота образования CIV 1548 Å должна быть 4000 – 6000 км. Мы приняли высоту формирования ее равной 4000 км, а среднюю по тени пятна скорость движения плазмы вверх равной 16 км/с.

На рис. 1 нанесены величины средних по площади тени вертикальных скоростей в зависимости от высоты образования линий. Отсчет высот взят от уровня образования FeI 5270 Å. Мы считаем, что в пределах этих высот изменение скорости происходит непрерывно и квазистационарно.

Линия CIV 1548 Å присутствовала над пятнами во всех наблюдениях. Это означает, что над пятном всегда имеется область с температурой 10^5 К, при которой образуется линия CIV 1548 Å.

Итак, выделяется два очень важных обстоятельства:

1. Над тенью пятна всегда имеет место рост температуры примерно от 3500 К в области температурного минимума до 10^5 К – на высоте формирования линии CIV 1548 Å.
2. По крайней мере, над тенью некоторых пятен наблюдается подъем плазмы с увеличивающейся скоростью (средней по площади тени) от 0.1 км/с непосредственно над областью температурного минимума до 16 км/с на высоте формирования линии CIV 1548 Å.

Сифонный механизм, в его классическом виде, не может быть ответственным за наблюдаемое (рис. 1) движение плазмы над тенью пятна. Действие сифонного механизма основано на появлении разности давлений плазмы из-за разной напряженности магнитного поля в противоположных основаниях магнитной петли. В том основании магнитной петли, которое уходит в фотосферу вне пятна,

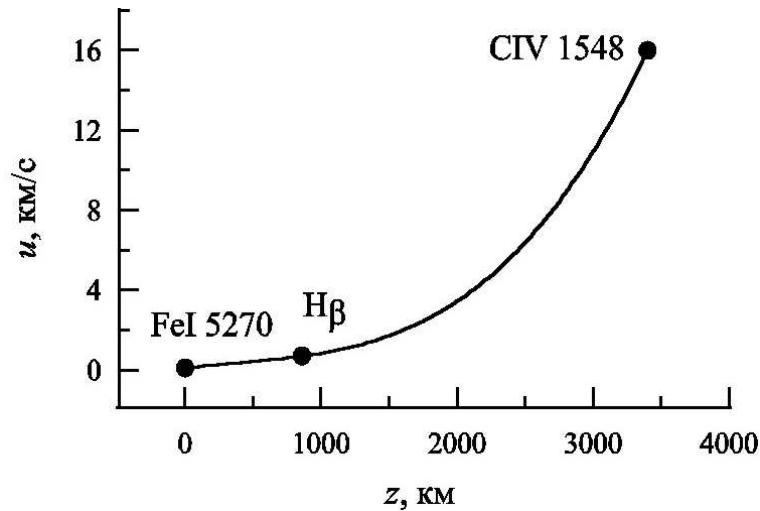


Рис. 1. Средние величины вертикальной скорости над тенью пятна в зависимости от высоты образования линий. Сплошной линией проведен полином 3-й степени

напряженность поля ниже, а температура выше, чем над тенью пятна. Поэтому давление плазмы будет больше в том основании петли, в котором напряженность поля меньше. Разность давлений плазмы на концах магнитной петли создает движение плазмы, направленное в сторону пятна, что не соответствует наблюдениям над тенью пятна.

Кроме того, при дозвуковом течении, которое наблюдается (рис. 1), скорость плазмы увеличивается только при уменьшении ее тепловой функции (Ландау, Лифшиц, 1954). Из наблюдений мы видим, что с ростом скорости плазмы растет и ее температура.

3 Поток плазмы в трубке тока во внешнем магнитном поле

Рассмотрим воздействие внешнего поля на поток плазмы в трубке тока, которая по геометрии совпадает с магнитной силовой трубкой. Мы не будем уточнять способы создания этого поля. Отметим только, что оно воздействует на стационарный поток проводящего газа. Нас интересует, как должны меняться параметры этого поля вдоль трубки тока, чтобы получить наблюдаемое изменение скорости и распределение температуры плазмы вдоль оси трубки тока, которая принята за ось z в цилиндрической системе координат.

Уравнения, описывающие движения плазмы в трубке тока, расположенной вертикально, можно записать в виде:

$$\frac{S}{S_0} = \left(1 + \frac{z}{r_0} \operatorname{tg} \alpha\right)^2, \quad (1)$$

$$\rho u S = \rho_0 u_0 S_0 = \operatorname{const}, \quad (2)$$

$$\rho u \frac{du}{dz} + \frac{dP}{dz} + \rho g = f(z), \quad (3)$$

$$\rho u \left(u \frac{du}{dz} + C_P \frac{dT}{dz} \right) = A(z), \quad (4)$$

$$P = R \rho T. \quad (5)$$

Уравнение (1) – уравнение магнитной силовой трубки ($S = \pi r^2$ – сечение трубки тока на высоте z , z отсчитывается от основания трубки тока, α – угол раствора силовых линий в трубке тока, принят не меняющимся с высотой; r_0 – радиус сечения в основании магнитной трубки.). Уравнение

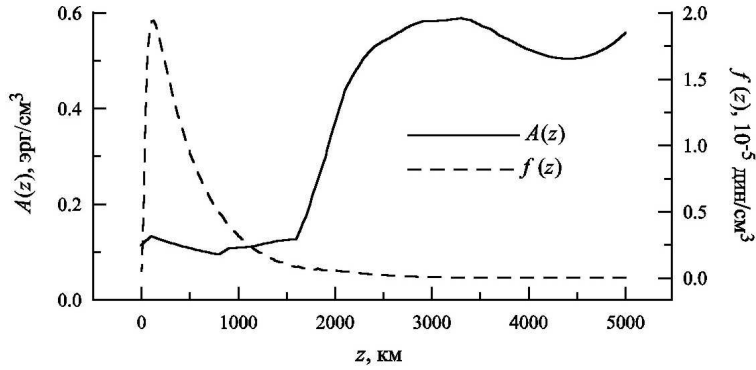


Рис. 2. Изменение функций $A(z)$ и $f(z)$ с высотой z

(2) выражает постоянство расхода массы вдоль трубки тока (ρ – плотность плазмы; u – скорость ее). Уравнение (3) – уравнение движения (P – давление плазмы; g – ускорение силы тяжести; $f(z)$ – сила внешнего поля). Уравнение (4) представляет изменение плотности потока энергии (C_P – удельная теплоемкость плазмы при постоянном давлении; T – температура; $A(z)$ – плотность подводимой извне энергии в единицу времени). Уравнение (5) – уравнение состояния идеального газа (R – газовая постоянная). Индекс 0 относится к параметрам в основании трубки тока.

4 Параметры внешнего поля

Скорость течения плазмы (рис. 1) известна в каждой точке z трубки тока, которая совпадает с магнитной силовой трубкой (выражение (1)). Все параметры течения зависят только от одной координаты z . На высоте $z = 0$ радиус магнитной трубки $r_0 = 1000$ км. Средний по тени пятна угол раствора силовых линий $\alpha = 30^\circ$ (Гопасюк, 2000). В качестве нулевого приближения взята гидростатическая модель тени пятна (Авретт, 1981).

На основании уравнений (1) – (5), данных рис. 1 и модели тени пятна были вычислены (Гопасюк, Гопасюк, 2002):

$$A(z) = \rho_0 u_0 \frac{S_0}{S} \frac{d}{dz} \left(\frac{u^2}{2} + C_P T \right) \quad (6)$$

и

$$f(z) = \rho \frac{d}{dz} \left(\frac{u^2}{2} + gz \right) + \frac{dP}{dz}, \quad (7)$$

где dP/dz вычислена на основании модели тени пятна.

Расчеты показали, что параметры внешнего поля $A(z)$ и $f(z)$ особенно чувствительны к виду функции u (рис. 1). Однако вид каждой из функций $A(z)$ и $f(z)$ оставался в целом подобным. Результаты вычислений $A(z)$ и $f(z)$ приведены на рис. 2.

Вычисления были продолжены до высоты $z = 5000$ км.

5 Заключение

Для того, чтобы происходило наблюдаемое увеличение скорости плазмы от начального значения 0.10 км/с до 16 км/с и нагрев плазмы от 3500 К до 10^5 К, сила, действующая на плазму со стороны внешнего поля, должна иметь вид, близкий к импульсному – достигнуть максимального значения $f(z) \approx 1.87 \cdot 10^{-5} / 3$ на высоте $z = 120$ км и затем плавно спадать (почти по экспоненте) до $7.48 \cdot 10^{-7} / 3$ на расстоянии $z = 1600$ км. При этом плотность подводимого потока энергии в единицу времени $A(z)$ должна оставаться почти постоянной на расстоянии от $z = 0$ до $z = 1600$ км и равной примерно

0.12 /³. При больших значениях высоты $A(z)$ должна увеличиться примерно до 0.52 /³ при $z = 3300$ км. Затем должно происходить медленное уменьшение функции $A(z)$ до 0.44 /³ на $z = 4440$ км. Такие изменения силы внешнего поля и подвода энергии к плазме могут обеспечить наблюдаемое изменение скорости плазмы и роста температуры ее с высотой.

Если зависимость, представленную на рис. 1, продолжить, то скорость течения плазмы достигает звуковой скорости, равной примерно 44 км/с на высоте $z = 4730$ км. При больших z течение при данных $A(z)$ и $f(z)$ становится сверхзвуковым.

Ускорение и нагрев плазмы могут быть обусловлены как электромагнитным полем, так и полем акустических колебаний, распространяющихся вдоль магнитного поля, которое практически вертикально в тени пятна. Интенсивность акустических колебаний согласно (Бекерс, Таллант, 1969) довольно высокая. Возможна трансформация акустических волн в другие виды.

В электромагнитном поле составляющая силы $F(z)$, действующая на элемент объема V магнитной силовой трубки с расходящимися силовыми линиями и направленная вдоль ее оси:

$$F(z) = \int_V f(z)dV = -\frac{1}{c} \int_V j_\varphi H_r dV.$$

Из нее следует (Тамм, 1956):

$$F(z) = \frac{I_\varphi(z)}{c} S_z(z) \frac{dH_z}{dz}, \quad (8)$$

где $I_\varphi(z)$ – сила азимутального электрического тока, циркулирующего вокруг магнитной силовой трубки, S_z – площадь сечения ее, dH_z/dz – вертикальный градиент вертикальной составляющей магнитного поля ($dH_z/dz = -0.3$ Гс/км (Гопасюк, 2000)).

Электрический ток является азимутальным и направлен так, что его магнитный момент антипараллелен расходящемуся с высотой внешнему магнитному полю – магнитному полю тени пятна. Чтобы течение плазмы было квазистационарным, создание электрического тока и подвод энергии к плазме должны быть непрерывными. Выражение (8) позволяет вычислить величину азимутального тока. На высоте z , соответствующей максимуму силы $f(z)$, величина азимутального тока $I_\varphi \approx 4.2 \cdot 10^{10}$ А.

В процессе нагрева происходит ионизация водорода и гелия. Энергия ионизации, согласно исследованиям Лайтса (1980), сравнима с тепловой энергией плазмы, она нами при расчетах не учитывалась. Плотность тепловой энергии плазмы над тенью пятна сравнима с энергией, необходимой для нагрева невозмущенной хромосферы в переходной области хромосфера – корона (Николаас и др., 1982). Как мы видим, проблема нагрева является общей для хромосферы, как над пятном, так и над невозмущенными областями и требуют отдельных исследований.

Температура в движущейся плазме вдоль магнитного поля тени пятна в пределах 10% совпадает с температурой в гидростатической модели тени пятна (Авретт, 1981).

Скорости, переходящие к сверхзвуковым, реализовываются, вероятно, редко.

Отметим, что в случае, если магнитная трубка простирается вертикально вверх на достаточно большую величину, то этот механизм может приводить к ускорению плазмы до скоростей и температур плазмы солнечного ветра. Многие большие солнечные пятна являются источником солнечного ветра. Об этом свидетельствуют исследования (Койпер, 1957), в которых показано, что в среднем через 3 – 6 суток после прохождения пятна через центральный меридиан приходят к Земле потоки солнечной плазмы, вызывающие магнитные возмущения.

Литература

- Авретт (Avrett E.H.) // The Physics of Sunspots / Eds. Cram L.E., Thomas J.H. Sacramento Peak Obs. 1981. P. 235.
- Алиссандракис и др. (Alissandrakis C.E., Dialitis D., Mein P., Schmieder B., Simon G.) // Proc. 10th European Regional Astronomy Meeting of the IAU. The Sun V. 1. / Eds. L. Hejna, M. Sobotka. 1987. P. 147.

- Атей и др. (Athey R.G., Gurman J.B., Shine R.A., Henze W.) // *Astrophys. J.* 1983. V. 269. N. 2. pt. 1. P. 706.
- Бекерс, Таллант (Beckers J.M., Tallant P.E.) // *Solar Phys.* 1969. V. 7. N. 3. P. 351.
- Гопасюк О.С. // *Кинематика и физика небес. тел.* 1999. Т. 15. N. 5. С. 413.
- Гопасюк О.С. // *Кинематика и физика небес. тел.* 2000. Т. 16. N. 3. С. 230.
- Гопасюк О.С., Гопасюк С.И. // *Кинематика и физика небес. тел.* 2002. Т. 18. N. 2. С. 161.
- Гопасюк С.И., Гопасюк О.С. // *Кинематика и физика небес. тел.* 1998. Т. 14. N. 5. С. 389.
- Гопасюк С.И., Гопасюк О.С. // *Кинематика и физика небес. тел.* 2002. Т. 18. N. 4. С. 341.
- Джордан (Jordan C.) // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 1969. V. 142. P. 501.
- Кингстон и др. (Kingston A.E., Doyle J.G., Dufton P.L., Gurman J.B.) // *Solar Phys.* 1982. V. 81. N. 1. P. 47.
- Койпер Дж. // *Солнце.* М.: Изд-во иностр. лит-ры. 1957.
- Лайтс (Lites B.W.) // *Solar Phys.* 1980. V. 68. N. 2. P. 327.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. // *Механика сплошных сред.* М.: ГИТТЛ. 1954.
- Маттиг (Mattig W.) // *Z. Astrophys.* 1962. V. 56. N. 3. P. 161.
- Маттиг (Mattig W.) // *Solar Phys.* 1969. V. 8 N. 2. P. 291.
- Мейн и др. (Mein P., Simon G., Vial J.C., Shine R.A.) // *Astron. Astrophys.* 1982. V. 111. N. 1. P. 136.
- Николас и др. (Nicolas K.R., Kjeldseth-Moe O., Bartoe J.D.F., Bruecner G.E.) // *Solar Phys.* 1982. V. 81. N. 2. P. 253.
- Тамм И. Е. // *Основы теории электричества.* М.: ГИТТЛ. 1956.
- Хагъярд и др. (Hagyard M.J., Teuber D., West E.A., Tanberg-Hanssen E. et al.) // *Solar Phys.* 1983. V. 84. N. 1/2. P. 13.