

ТОНКАЯ СТРУКТУРА ФАКЕЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В СОЛНЕЧНОЙ ХРОМОСФЕРЕ

Соловьев А.А., Киричек Е.А.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

FINE STRUCTURE OF FACULAR MAGNETIC FIELDS IN SOLAR CHROMOSPHERE

Solov'ev A.A., Kirichek E.A.

Central astronomical observatory at Pulkovo of RAS, St. Petersburg, Russia

A distinctive feature of chromospheric magnetic fields in the facular regions on the Sun is their very fine spatial structure. In accordance with the observations performed in Ca II H line (it is the level of low chromosphere, about 525 km over the photosphere), the numerous "slender fibrils mapping the magnetic field" were recorded. It is noted, that "...the loops are organized in canope-like arches" (Jafarzadeh et al. 2017). We construct the model of such specific magnetic configuration in the form of a steady magnetic "fountain" with many thin strikes along which the plasma flows. The radial-azimuthal temperature profiles of the magnetic fountain are presented for the different heights of the chromosphere.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-351-356

1. Введение

Солнечные факелы, наряду с солнечными пятнами, являются важным проявлением солнечной активности в целом. Несмотря на их небольшую яркость, они благодаря своей многочисленности дают настолько существенный вклад в общую светимость Солнца, что Total Solar Irradiance (TSI) в моменты максимума пятенной активности оказывается выше (на 0.1%), чем в минимуме, т.е. повышенная светимость факелов перекрывает понижение общей светимости Солнца, вызываемое появлением тёмных пятен. Это – одна из причин, по которым в солнечной физике исследованию факелов традиционно уделяется большое внимание. Факелы, как и пятна, имеют магнитную природу, хотя их магнитные поля намного слабее, чем в пятнах. Очевидно, по этой причине факельные поля появляются в активной области раньше, чем формируются пятна, и живут дольше пятен. Факельные области на Солнце содержат три типа магнитных структур: мелкомасштабные силовые трубки гранулярных масштабов, более крупные и устойчивые светлые факельные узлы, а также темные микропоры и поры – малые пятна без полутени. Наиболее представительными элементами факельных полей на Солнце являются факельные узлы, имеющие поперечные размеры в несколько Мм, время жизни до суток и более, магнитное поле от 250 до 1200 Гс. Эти узлы, будучи более светлыми, чем фотосфера, образованиями, имеют обычно небольшой центральный провал

температурного профиля, аналог вильсоновской депрессии в солнечных пятнах. Это сближает их с порами. Вообще, четкой границы между указанными классами факельных структур не существуют, они могут перемешиваться, перетекать друг в друга. Так, факельный узел можно рассматривать как значительное сгущение мелкомасштабных факельных гранул, возникающее, скорее всего, в местах пересечения границ нескольких ячеек супергрануляции. Сходящиеся и нисходящие течения плазмы на этих границах, и, главное, – заметно более низкое газовое давление в межгранульных и межсупергранульных промежутках обеспечивают необходимые внешние условия для поддержания устойчивого существования довольно крупных магнитных факельных узлов на протяжении суток и более. Наблюдатели [Pietarila et al., 2009; Jafarzadeh et al., 2017] отмечают на снимках нижней хромосферы в линиях H и K ионизованного кальция (Ca II), которые формируются вблизи на уровня температурного минимума (около 525 км над фотосферой) чрезвычайно тонкую волокнистую структуру поля температуры, которая несомненно отражает собою тонкую структуру магнитных полей в этой области. На уровне фотосферы эта тонкая фибриллярная структура, очевидно, замывается достаточно быстрыми движениями поля грануляции, картина которого полностью меняется на масштабах 5–10 минут, а на высотах в несколько сотен км, куда фотосферная грануляция уже «не достает», это пространственное разделение магнитного массива на тоненькие волокна-фибрилы оказывается проявлено достаточно отчетливо и устойчиво. Кроме того, в окрестности факельных узлов в белом свете наблюдаются при высоком угловом разрешении (1-м Шведский телескоп) регулярные кольцевые и полукольцевые поярчания (Lites et al., 2004; Berger et al., 2007). Цель данной заметки – описать теоретически эти явления.

2. Модель магнитного фонтана с тонкими струями

Рассмотрим нескрученную вертикальную магнитную силовую трубку, в которой азимутальный компонент поля отсутствует, а два других компонента, вертикальный и радиальный, зависят от всех трех переменных (r, φ, z) в цилиндрической системе координат:

$$\mathbf{B} = \{B_r(r, \varphi, z)\mathbf{e}_r, 0 \cdot \mathbf{e}_\varphi, B_z(r, \varphi, z)\mathbf{e}_z\} \quad (1)$$

Ось z направим вертикально вверх. В цилиндрической системе координат уравнение соленоидальности $\operatorname{div}\mathbf{B} = 0$ для поля (1) имеет вид:

$$\frac{\partial B_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r B_r = 0, \quad (2)$$

Продольное и радиальное поле можно выразить через функцию потока

$$A(r, z) = \int_0^r b_z r dr \quad (3)$$

и некоторую произвольную безразмерную функцию этого же потока и угловой координаты $F(A, \varphi)$ следующим образом:

$$\begin{aligned} B_z(r, \varphi, z) &\equiv B_0 F(A, \varphi) b_z(r, z); & b_z(r, z) &= \frac{1}{r} \frac{\partial A(r, z)}{\partial r}; \\ B_r(r, \varphi, z) &\equiv B_0 F(A, \varphi) b_r(r, z); & b_r(r, z) &= -\frac{1}{r} \frac{\partial A(r, z)}{\partial z}. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь $B_0 = const$ – единица измерения напряженности магнитного поля. Подстановкой (4) в (2) убеждаемся, что (2) тождественно удовлетворяется при любом выборе дифференцируемой функции $F(A, \varphi)$.

Этот простой результат чрезвычайно важен не только при моделировании активных солнечных образований, но и в общезначимом смысле. Он означает, что в любую нескрученную магнитную силовую трубку можно ввести произвольную угловую вариацию магнитного поля. Это, в частности, позволяет *разделить* единую трубку магнитного потока на ряд параллельных, сколь угодно тонких волоконцев, в каждом из которых будет циркулировать кольцевой электрический ток, который может дать (наряду с диссипацией МГД волн) заметный вклад в нагрев плазмы за счет джоулевых потерь.

Зависимость произвольно назначаемой функции F от угловой координаты можно выбрать, например, в следующем простом виде:

$$F^2(A, \varphi) = 1 + f(A, \varphi) = 1 + k^2 \left| A \cdot \sum_i a_i \sin(m_i \varphi) \right|, \quad (5)$$

где $f(A, \varphi)$ положительная осциллирующая функция с убывающей по высоте амплитудой за счет убывания потока A . В (5) a_i, m_i – некоторые положительные коэффициенты, k – обратный масштаб длины.

Выбирая различные значения углового параметра m , мы можем получить ряд интересных эффектов. Так, при малом его значении ($m < 1$) имеем сильную боковую деформацию магнитного поля и соответствующего ему температурного профиля. Большие m дают тонкую филаментарную структуру поля. Если $F = 1$, угловой зависимости нет.

Для описания магнитной структуры факельного узла используем решение Schatzman [1965] в его потенциальном пределе:

$$\begin{aligned} B_z &= B_0 J_0(kr) \exp(-kz), \\ B_r &= B_0 J_1(kr) \exp(-kz), \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь $J_0(kr), J_1(kr)$ – Бесселевы функции нулевого и первого порядка, B_0 – магнитное поле на фотосфере $z = 0$. Потенциальное поле не возмущает среду, в которую оно погружено. Для того чтобы магнитное поле стало наблюдаемым, оно должно вызывать отклонения параметров плазмы от гидростатики, поэтому следует ввести в (6) некоторые «силовые» поправ-

ки. В нашем случае это будут: (i) угловая зависимость в виде функции F (см. [5] и рис. 1), (ii) – замена экспоненты в (6) выражением:

$$Z(z) = \frac{2}{\exp(kz) + 1}, \quad (7)$$

которое описывает размытую ступеньку Ферми-Дирака. При $z > 0$ эта функция стремится к $2\exp(-kz)$, т.е. поле приближается к потенциальному, а при $z < 0$ магнитное поле, идущее вниз, стремится к $2B_0 = const$. Таким образом, вместо (6) мы будем иметь:

$$\begin{aligned} B_z &= B_0 F(A, \varphi) Z(z) J_0(kr), \\ B_r &= B_0 F(A, \varphi) Z(z) J_1(kr). \end{aligned} \quad (8)$$

Мы предполагаем, что факельный узел погружен в гидростатическую внешнюю среду, которая задается моделью атмосферы Avrett & Loeser [2008]. В этой модели уровень с параметрами плазмы

$$T(0) = 6583\text{K}, P(0) = 1.228 \times 10^5 \text{ dyn/cm}^2, \rho(0) = 2.87 \times 10^{-7} \text{ g/cm}^3$$

принят за основание фотосферы, а уровень с $T = 5800\text{K}$, которая обычно считается фотосферной, располагается в этой модели выше на 50 км.



3. Температурные профили факельного узла

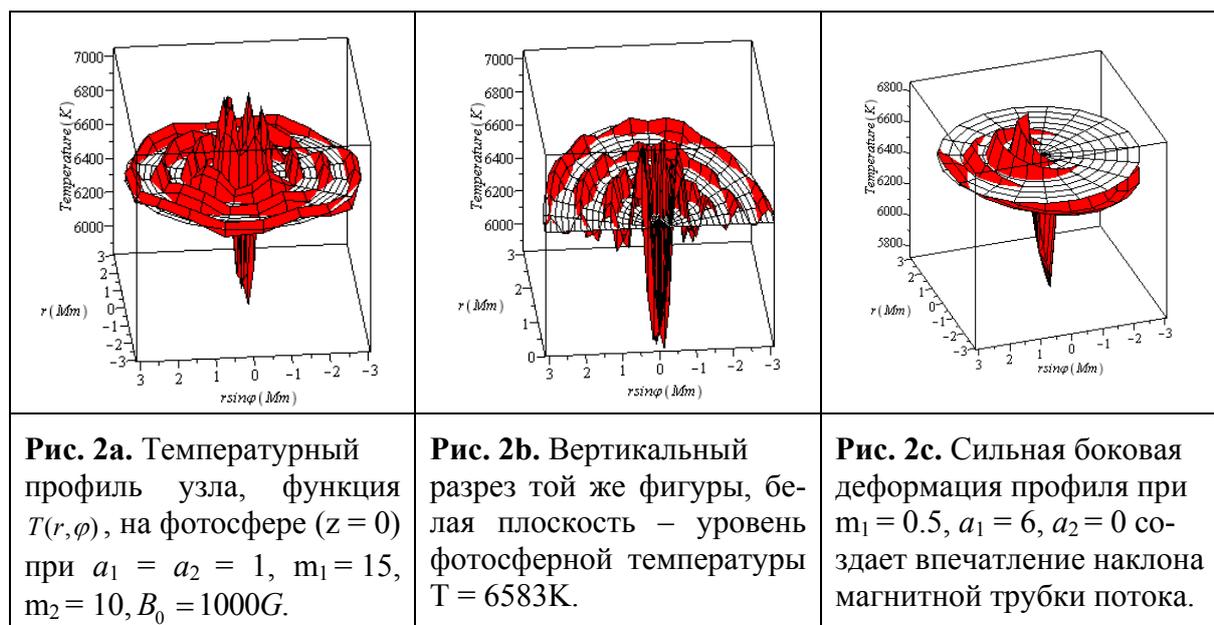
Развитые нами аналитические методы [Solov'ev&Kirichek, 2016] позволяют по заданной структуре магнитного поля рассчитывать давление, плотность, температуру и скорость плазмы в каждой точке изучаемой магнитной конфигурации.

В данной модели скорость стационарных течений плазмы вдоль магнитных силовых линий, выражаемая через альвеновское число Маха, связана с угловой зависимостью соотношением:

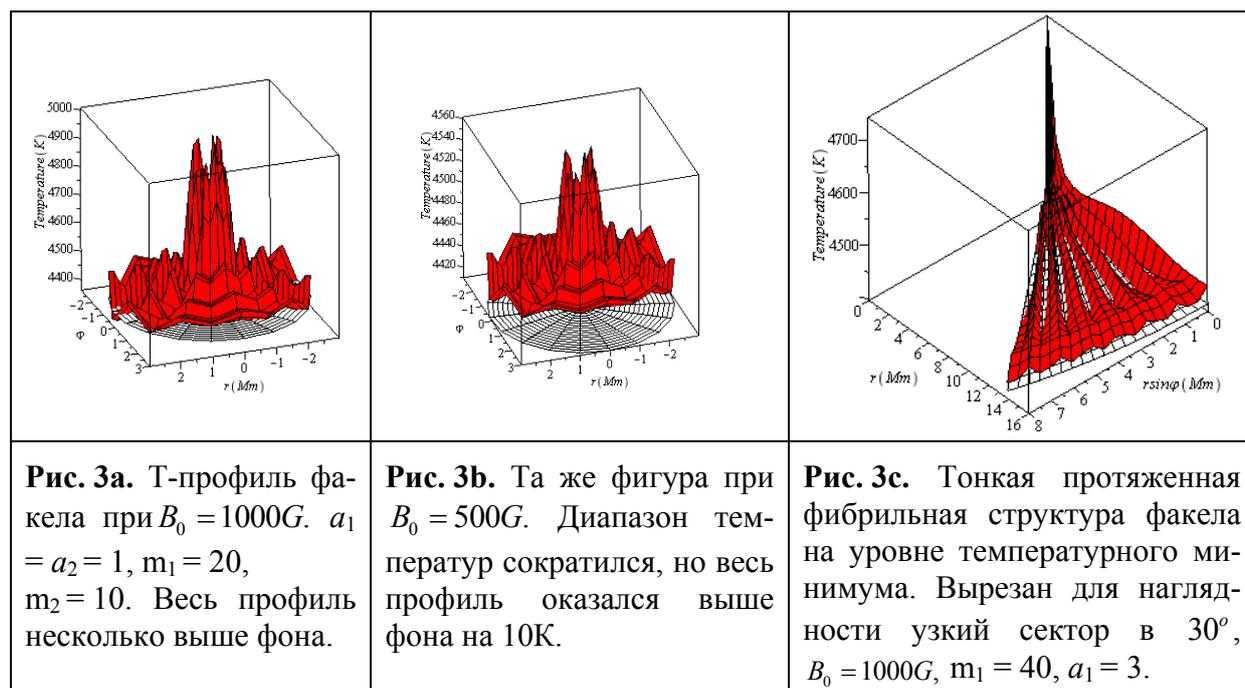
$$M_A^2 \equiv (V \cdot V_A^{-1})^2 = 1 - F^{-2} = f(1 + f)^{-1} > 0. \quad (9)$$

Объем заметки не позволяет описать процедуру расчета плазменных параметров факела. Мы приведем лишь ряд рисунков, изображающих температурные профили факельного узла для различных напряженностей поля и на разных высотах атмосферы.

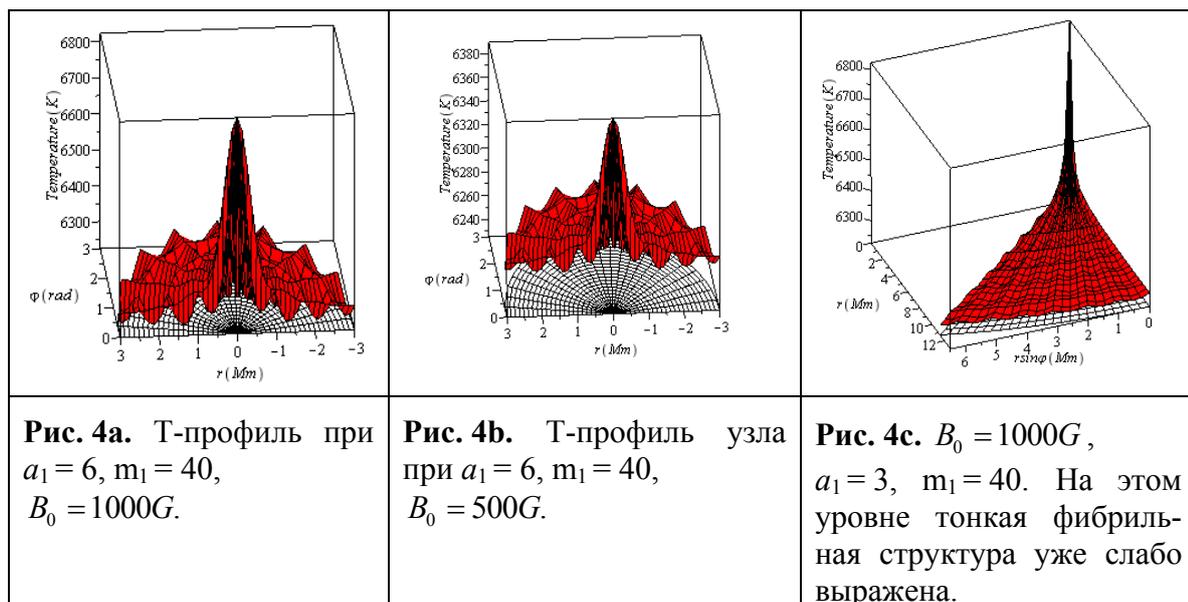
3.1. Фотосферные факелы, центральный провал температуры



3.2. Уровень температурного минимума. Температура хромосферы равна 4410K



3.3. Уровень 1003 км над фотосферой, $T = 6225K$



Заключение

Аналитическая 3D модель стационарного факельного узла в виде «магнитного фонтана» с тонкими струйками течений плазмы вдоль магнитных силовых линий хорошо описывает основные особенности факела: его тонкую фибрильную структуру, кольцевые поярчания и температурные профили на различных высотах солнечной атмосферы.

Работа поддержана РФФИ (№18-02-00168) и РНФ (№15-12-20001).

Литература

- Berger T.E., Rouppe L. van der Voort, Lofdahl M. Contrast analysis of solar faculae and magnetic bright points // *Astrophys. J.*, 2007, **661**, 1272-1288.
- Jafarzadeh S., Rutten R.J., Solanki S.K. et al. (17 authors). Slender CAII H Fibrils Mapping Magnetic Field in the Low Solar Chromosphere // *ApJ. Suppl. Ser.* 2017, 229:11 (11 pp).
- Lites B.W., Scharmer G.B., Berger T.E. and Title A.M. Three-dimensional structure of the active region photosphere as revealed by high angular resolution // *Solar Phys.*, 2004, **221**, 65-84.
- Pietarila, A.; Hirzberger, J.; Zakharov, V.; Solanki, S.K. Bright fibrils in Ca II K // *Astronomy and Astrophysics*, 2009, Vol. 502, pp. 647-660.
- Schatzman E. Model of a force free field // *IAU Symp.* 1965, **22**, 337-345.
- Solov'ev A.A., Kirichuk E.A. Analytical Model of an Asymmetric Sunspot with a steady plasma flow in its penumbra // *Solar Physics*. 2016, Vol. 291, № 6, 1647–1663.