ОСОБЕННОСТИ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ ФОТОСФЕРЫ ПРИ ВЫСОКОМ ПРОСТРАНСТВЕННОМ РАЗРЕШЕНИИ

Ефремов В.И., Парфиненко Л.Д., Соловьев А.А.

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

FEATURES OF THE FINE STRUCTURE OF THE PHOTOSPHERE AT HIGH SPATIAL RESOLUTION

Efremov V.I., Parfinenko L.D., Solov'ev A.A.

Central (Pulkovo) astronomical observatory of RAS, St. Petersburg, Russia

The small-scale elements observed in the solar photosphere at high resolution are discussed: granules, faculae, micropores. As a separate element of the fine structure, a continuous network formed by dark intergranular lanes is considered. The results of image processing of micropores and facular knots obtained using modern adaptive telescopes are presented. For intergranular lanes and micropores, a stationary regime is determined, when the horizontal-vertical plasma flows converging to the lanes (and to the micropores) compensate the dissipative spreading of the magnetic flux on a given scale. A theoretical evaluation of the characteristic scales of these structures in the photosphere gives: 20–30 km for the thickness of dark intergranular spaces and 200–400 km for the diameter of micropores.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-157-160

1. Введение

На снимках фотосферы в континууме, получаемых с высоким угловым разрешением, поле солнечной грануляции предстает как сложная, мультимасштабная структура (см. рис. 1). Наиболее устойчивым и ярко выраженным масштабом тонкой структуры фотосферы является гранулярная сетка размером $1.5'' - 2.4''$. Амплитуды более высокочастотных гармоник ниже уровня доверия 2σ и соответствующие им образования носят в значительной степени случайный характер [1]. С элементами тонкой фотосферной структуры, наблюдаемой в белом свете, тесно связана тонкая структура магнитного поля [2]. Проблема скрытых магнитных полей, невидимых на магнитограммах, детально обсуждалась в [3]. Мелкомасштабные магнитные элементы содержат большое количество свободной (связанной с электрическими токами) энергии, которая может вносить значительный вклад как в нагрев солнечной атмосферы, так и во вспышечное энерговыделение. В 1973 г. был запущен стратосферный телескоп с диаметром зеркала 100 см. Тогда на нескольких фотографиях фотосферы было достигнуто дифракционное разрешение объектива – $0''.12$ [5]. Даже сегодня, спустя более 45 лет, это является очень хорошим результатом.

За последние 10 лет применение новых технологий привело к революции в качестве получаемых наземных изображений Солнца. Главные из

Рис. 1. Снимок грануляции вблизи центра солнечного диска, получен 30.06.1970 г. на Пулковском стратосферном телескопе (stratospheric balloon-borne observatory, Krat et al., 1970). Время экспозиции 1 мсек, высота полета 21 км. Фильтром выделена полоса длин волн 4380–4800 Å (эффективная $\lambda = 4600\text{Å}$). Использована 80-мм фотопленка FT30, откалиброванная 9-ти ступенчатым ослабителем, что сводило к минимуму искажения контраста грануляции. Достигнуто угловое разрешение $0''.24$, соответствующее дифракционному разрешению 50 см объектива телескопа.

них: а) адаптивная оптика [6], б) многокадровая деконволюция (multi-object multi-frame blind deconvolution, MOMFBD) [7], в) реконструкция спеклов [8]. Сейчас несколько наземных солнечных телескопов, оснащенных системами адаптивной оптики, позволяют систематически выполнять наблюдения с высоким разрешением. Они оснащены большими легкими зеркалами, изготовленными по новым технологиям. Таковы, например, 1.6-метровый рефлектор GST (<http://www.bbso.njit.edu>), снабженный адаптивной оптикой и спекл-реконструкцией изображения, New Vacuum Solar Telescope (NVST) в Китае (<http://fso.ynao.ac.cn/index.aspx>) и др. Эти телескопы в наземных условиях обеспечивают пространственное разрешение лучше достигнутого из стратосферы и даже из космоса. Мощные спектрографы позволяют исследовать тонкую структуру магнитных полей.

2. Основные элементы тонкой структуры солнечной фотосферы

В спокойной солнечной фотосфере основным структурным элементом является грануляция, имеющая характерный пространственный масштаб около 1 Мм и время жизни от 5 до 15 минут. Фотосферная гранула представляет собою характерное проявление «переворачивающей» (overturning) конвекции, дополненное разнообразными волновыми процессами, при которой более горячее вещество (и магнитное поле) из центральной части конвективной ячейки сносится за время оборота на её охлаждающуюся периферию. Здесь необходимо отметить особую роль нисходящих течений, возникающих оттого, что в слое, где наблюдается солнечная грануляция, большую роль начинает играть лучистый перенос, и возникает переход от почти адиабатической конвекции к слою со свободными течениями, нисходящими на периферии в виде струй (plumes) [9].

Особой мелкомасштабной структурой фотосферы, производной от явления overturning конвекции, является сетка темных межгранульных промежутков DIL (the net of dark intergranular lanes). Она представляет собою единое, непрерывное физическое образование, изменяющее свою геомет-

рическую конфигурацию с тем же характерным временем, что и паттерн гранулярного узора, но никогда не исчезающее. Поперечный размер DIL составляет менее $0''.3$. В активных областях средняя ширина промежутков, оцениваемая на уровне современного разрешения, составляет $0''.1$, (т.е. 70 км) и даже менее [10]. Важно подчеркнуть, что для межгранульных промежутков характерно не только резко пониженное вследствие падения температуры, газовое давление, но и достаточно сильное, $\geq 1kG$, магнитное поле, которое обеспечивает поперечный баланс давлений. В них также наблюдаются нисходящие ламинарные потоки плазмы, усиливающие и упорядочивающие структуру вертикального магнитного поля в этих областях.

При появлении в фотосфере магнитных полей с напряженностью больше 150–200 Гс в поле грануляции появляются факельные поля, слабо различимые на диске, но хорошо заметные у края солнечного диска, при их приближении к лимбу. Факельные поля обычно появляются в активной области раньше пятен, а исчезают позже, но каждый из мелких факелов, элементов поля, представляет собою довольно эфемерное образование со временем жизни не более 1 часа. Вообще, в факельных полях активных областей присутствуют три основных типа магнитных структур:

1). Короткоживущие мелкие факелы гранулярных масштабов со временем жизни 5–15 минут, размерами – $(0.5 - 1)''$. Напряженность магнитного поля в них близка к условию равнораспределения плотности энергий. В фотосфере $B(equipartition) = 150 - 200 \text{ Гс}$. Факельные гранулы очень динамичны, находятся в постоянном движении вследствие воздействий на них со стороны полей грануляции и супергрануляции, их яркость относительно невелика и связана она, по-видимому, с тем, что, взаимодействуя с магнитным полем, давление которого близко к динамическому давлению конвекции, гранулы поджимаются этим магнитным полем, дополнительно структурируются им, и за счет этого увеличивают несколько свою яркость, просвечивая при проворачивании (overturning) своими боковыми поверхностями сквозь окружающие их более прозрачные магнитные силовые трубки. Природа этих элементов хорошо описывается численно в рамках представлений о магнитоконвекции [11].

2). На фоне мелких факельных гранул выделяются факельные узлы (facular knots), более стабильные и крупномасштабные магнитные образования, со временем жизни от часа и более, до 1 суток, размерами до нескольких Мм и напряженностью магнитного поля от 300 до 1200 Гс. Факельные узлы имеют центральную депрессию (фактически, они содержат в своем центре стабилизирующую их микропору) и благодаря этому близки по своим свойствам к солнечным порам. По-видимому, эти объекты располагаются на стыках нескольких конвективных ячеек супергрануляции. В этих ячейках наблюдаются, как известно, радиально-горизонтальные течения плазмы, концентрирующие несколько десятков магнитных факельных

элементов, имеющих вид отдельных магнитных силовых трубок или жгутов, в межсупергранульные промежутки, сгребая их, благодаря вмерзности поля в плазму, к краям ячеек. Эти течения и, главное, значительно пониженное по сравнению с фотосферным давление газа в межгранульных промежутках и обеспечивают своим поджигающим радиальным действием достаточно высокую напряженность магнитного поля и устойчивое, длительное существование факельных узлов.

3). Поры – малые пятна без полутени, время жизни – несколько дней, поперечные размеры 2–4 Мм, иногда до 8 Мм, напряженность магнитного поля около 1500 Гс. В факельных областях наблюдается также большое количество микропор, которые отличаются от пор только меньшими размерами, < 1 Мм, но имеют такой же высокий контраст, резкие фотометрические границы и время жизни – от нескольких часов до 1 дня.

3. Оценки минимального размера структур в солнечной фотосфере

Важный вопрос: как близко современные наблюдения подошли к минимально возможному физическому размеру наблюдаемых солнечных магнитных структур, и каким он может быть? На эту оценку влияют два разнонаправленных процесса: а) расплывание магнитного поля из области его концентрации за счет омической диффузии и б) сгребание вмерзшего в плазму поля конвективными течениями на края ячеек. Баланс этих процессов, когда один уравнивает другой, дает нужную оценку размера квазистационарно существующего магнитного элемента. Проведенный нами теоретический расчет дал: 20–30 км для толщины темных межгранульных промежутков и для диаметра наиболее тонкой магнитной трубки в солнечной фотосфере, 200–400 км – для диаметра микропор.

Литература

1. *Muller, R.* // Solar Physics, 1985, vol. 100, 237-255.
2. *Rachkovsky D.N., Tsap T.T., Lozitsky V.G.* // J. Astrophys. & Astronomy, 2005, V. 26, iss. 4, p. 435-445.
3. *Stenflo, J.O.* // Astronomy & Astrophysics, 2012, Vol. 541, id.A17, 12 pp.
4. *Krat V.A. et al.* // Astronom. Tsirkulyar, 1970, No. 597, p. 1–3.
5. *Krat, V.A., Dul'kin, L.Z. et al.* // Astronom. Tsirkulyar, 1974, 807, p.1–3.
6. *Rimmele, T.R., & Marino, J.* // Solar Adaptive Optics, Living Reviews in Solar Physics, 2011, 8, Issue 1, article id. 2, 92 pp.
7. *Van Noort M., Rouppe van der Voort, Löfdahl, M.* // Sol. Phys., 2005, 228, 191.
8. *Wöger, F., von der Luhe, O., & Reardon, K.* // A&A., 2008, 488, 375.
9. *Rast, M.P.* // Ap. J. 2003, **597**: 1200-1210.
10. *Schlichenmaier, R.; von der Lühe, et al.* // A&A, 2016, 596, id.A7, 10 pp.
11. *Berger, T., Rouppe van der Voort, Löfdahl, M.* // ApJ., 2007, 661, pp. 1272-1288.