САМООРГАНИЗОВАННАЯ КРИТИЧНОСТЬ СОЛНЕЧНОГО МАГНЕТИЗМА

Абраменко В.И.

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Крым, Россия

SELF-ORGANIZED CRITICALITY OF SOLAR MAGNETISM

Abramenko V.I.

Crimean Astrophysical Observatory of RAS, Nauchny, Crimea, Russia

Self-organization is a property of any non-linear dynamical dissipative system evolving under a driving force and positive feedback reaction. Self-organization leads to creation of order from chaos, thus, diminishing the entropy of the system. As a result, numerous tiny entities (or short events) form structures of large spatial and/or temporal scales. One of very important properties of non-linear dissipative system is intermittency in time and space, which means that the system is capable to spontaneous transition into a critical state (so called self-organized criticality, SOC), when tiny fluctuations can provoke a catastrophic avalanche of any size. An object of our research – the continuously evolving convection zone with turbulent plasma flows and magnetic fields – is an ideal example of a self-organized non-linear dissipative system. In this review, we undertake an attempt to summarize (a small part of) efforts to investigate and to prove self-organization of processes responsible for the generation, evolution and dissipation of solar magnetic fields.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-3-6

Самоорганизация – это свойство нелинейной диссипативной системы, развивающейся спонтанно под действием внешних сил и положительных обратных связей. Самоорганизация создает порядок из хаоса и ведет к уменьшению энтропии системы, в противоположность случайному процессу. Это спонтанный процесс, не требующий какого-либо контроля со стороны внешней силы. Внешняя сила зачастую порождает случайные флуктуации, которые усиливаются положительной обратной связью. В результате из множества микроскопических взаимодействий создаются макроскопические структуры. Важное свойство нелинейной диссипативной системы – перемежаемость в пространстве (фрактальность) и во времени, что подразумевает, что система способна спонтанно переходить в состояние самоорганизованной критичности. Тогда малейший толчок способен спровоцировать взрыв-лаvinу любого масштаба. Нелинейность подразумевает взаимодействие процессов на разных масштабах: например, мелко-масштабные флуктуации (в пространстве и/или во времени) порождают крупномасштабные явления в системе. Огромный арсенал методов исследования и прогнозирования таких систем наработан в разных областях знаний (см., например, [1–3]), которые будет весьма полезно применить в изучении Солнца.

Наш основной объект исследований – постоянно развивающаяся во времени и в пространстве турбулентная замагниченная плазма фотосферы и конвективной зоны Солнца, где идет процесс генерации и диссипации магнитного поля. Такая среда, по-видимому, – идеальный пример самоорганизации со спонтанными переходами в критическое состояние, с неизбежными взаимодействиями на разных масштабах, с существенной ролью флуктуаций различных масштабов. Действительно, исследования последних лет показывают, что основные признаки самоорганизации выполняются для Солнца. Так, например, в работе [4] анализ пространственно-временного распределения площади пятен (т.е., бабочек Маундера) методом разложения по ортогональным функциям показал, что существует два режима генерации поля: режим стабильно динамо (первые две моды разложения) и режим турбулентного динамо, ответственный за стохастический характер цикличности (высокие моды). Обнаружена нелинейная связь этих двух механизмов, а именно, поля, сгенерированные турбулентным динамо – это не просто случайный шум, они промодулированы (упорядочены) 11-летним циклом глобального динамо. В работах [5, 6] показано, что основной источник флуктуаций в динамо-процессе – это α -эффект. Он обусловлен мелкомасштабным (по сравнению с Солнцем) явлением: доминирующее скручивание петель порядка активной области и меньше. Авторы полагают, что именно это звено динамо-цикла порождает флуктуации солнечной цикличности на больших временных масштабах, вплоть до тысячелетий.

Как происходит образование когерентных структур в крупномасштабном магнитном поле, сгенерированном процессом динамо среднего поля? В этом вопросе могут пролить свет только теоретические изыскания и численное моделирование. Например, в [7] показано, что неустойчивость, обусловленная отрицательным магнитным давлением, перераспределяет магнитный поток и способствует образованию когерентных структур. Другой подход предложен в работе [8]: для звезды солнечного типа, но вращающейся в 3 раза быстрее Солнца, авторы увеличили число Рейнольдса и магнитное число Рейнольдса, повысив таким образом степень турбулизации и перемежаемости сгенерированных магнитных поясов тороидального поля, что привело к филаментации поля в поясах, к формированию магнитных трубок, т.е., к появлению когерентных структур. Можно, конечно, спорить о применимости этой модели к Солнцу, но что здесь важно – самоорганизация системы: усиление турбулентного хаоса привело к появлению когерентных структур большего масштаба.

Можно ли диагностировать работу динамо в конвективной зоне по данным наблюдений? Недавние исследования [9] скорости вращения пятен по данным длинных рядов наблюдений показали, что существуют две популяции солнечных пятен: крупных с сильным магнитным полем и мелких со слабым магнитным полем. Вращение популяции мелких групп быстрое

и одномодальное, тогда как вращение популяции крупных групп бимодально с медленной и быстрой компонентами. Если принять, что генерация тороидального поля из полоидального происходит там, где дифференциальное вращение наиболее сильное (это две зоны – вблизи тахоклина и вблизи поверхности), то получается, что работает распределенное динамо: крупные группы генерируются и в тахоклине, и вблизи поверхности, а мелкие – только вблизи поверхности.

Другой оригинальный подход к диагностике динамо был предложен Д.Д. Соколовым с соавторами [10]. Генерируемое динамо-процессом магнитное поле состоит из трех частей: зависящее от цикла среднее поле; результат его фрагментации (также зависит от цикла); и произведенные безотносительно к среднему полю и не зависящие от цикла флуктуации, обусловленные действием флуктуационного (турбулентного) динамо. Предполагается, что активные области-перевертыши, т.е. те, у которых полярность лидирующего пятна не соответствует закону полярностей Хейла (анти-Хейлы), сгенерированы флуктуационным динамо и число их не зависит от фазы цикла. Тогда в периоды минимума активности относительное число анти-Хейлов должно быть повышенным, поскольку общее число пятен мало. Именно такая картина и следует из наблюдений [10], что подтверждает наличие флуктуационного динамо.

Фрактальная природа солнечных магнитных полей – это классический аргумент в пользу самоорганизации. Этому вопросу посвящено множество научных трудов, начиная с эвристических работ Э.И. Могилевского [11]. Ввод в действие новых солнечных инструментов [12–15], равно как и разработка новых математических подходов [16], убеждают нас в сложной мульти-фрактальной организации магнитного поля на поверхности Солнца. Степень мульти-фрактальности может служить мерой сложности магнитного поля и коррелирует со вспышечной продуктивностью активных областей [15]. Предстоит еще выяснять, как мульти-фрактальность взаимосвязана с переходом в критическое состояние (вспышку), но уже сейчас ясно, что роль процессов перколяции (тепловой энергии, магнитной энергии, электрических токов) весьма существенна [17, 18]. А это тоже атрибут самоорганизации.

Суммируя, можно сказать, что единый подход: «солнечный (и звездный) магнетизм как самоорганизованная система» еще далеко не исчерпал себя.

Многое будет зависеть и от новых солнечных инструментов, и от особенностей непредсказуемого грядущего солнечного цикла.

Литература

1. *Feder, J.*, Fractals. – New York, London: Plenum Press, 1988, 672 p.
2. *Baryshev Yu., Teerikorpi P.* – Discovery of cosmic fractals, World Scientific, 2002, 373 p.
3. *Aschwanden, M. J., Scholkmann, F., Béthune, W., Schmutz, W., Abramenko, V., and 10 co-authors* // Space Sci. Rev., 2018, 214, 55.

4. Consolini, G., Tozzi, R., P. De Michelis, P. // *Astron. & Astrophys.* 506, 1381, 2009.
5. Olemskoy, S.V., A.R. Choudhuri, A.R., Kitchatinov, L.L. // *Astronomy Reports*, 57, 458, 2013.
6. Kitchatinov, L.L. // *Geomagnetism & Aeronomy*, 2014, 54, 867.
7. Kapyla, P.J., Brandenburg, A., Kleeorin, N., et al. // *MNRAS*, 2012, 422, 2465.
8. Nelson, N.J., Brown, B.P., Brun, A.S., et al. // *ApJ*, 2013, 762, 73.
9. Nagovitsyn, Yu.A., Pevtsov, A.A., Osipova, A.A. // *Astron. Lett.*, 2018, 44, 202.
10. Sokoloff, D., Khlystova, A., Abramenko, V. // *MNRAS*, 2015, 451, 6040.
11. Krishan, V., Mogilevskij, E. International Centre for Theoretical Physics, Trieste (Italy), Aug 1989.
12. Lawrence, J., Ruzmaikin, A., Cadavid, A. // *ApJ*, 1993, 417, 805.
13. Abramenko, V., Yurchyshyn, V., Wang, H., et al. // *ApJ*, 2002, 577, 487.
14. McAteer, R.T.J., Gallagher, P., Ireland, J. // *ApJ*, 2005, 631, 628.
15. Abramenko, V.I., Yurchyshyn, V.B. // *ApJ*, 2010, 722, 122.
16. Knyazeva, I.S., Makarenko, N.G., Makarenko, I., et al. // *Journal of Physics: Conference Series* 738, 012070, 2016.
17. Гершберг Р.Е. Активность солнечного типа звезд Главной последовательности, Гл. 2.5.1. Симферополь: Антика, 2015. – 613 с.
18. Pustil'nik, L.A. // *Astrophys. and Space Sci.*, 1999, 264, 171.