ISBN 0367–8466
ИЗВЕСТИЯ КРЫМСКОЙ АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 118, № 1, 12–17 (2022) doi:10.31059/izcrao-vol118-iss1-pp12-17

УДК 523.982

Некоторые нерешенные проблемы солнечного динамо

Д.Д. Соколов[1,2,3]

[1] Физический факультет МГУ, Москва, 119991
sokoloff.dd@gmail.com
[2] ИЗМИРАН, Калужское шоссе, 4, г. Троицк, 1421980, Россия
[3] Центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, 119991

Поступила в редакцию 27 сентября 2021 г.

Аннотация. В изучении работы солнечного динамо сейчас намечается переход к задачам прогноза солнечной активности. При этом важно сохранить тематику изучения основ солнечного динамо. В этой связи дается обзор некоторых задач по выяснению основ работы солнечного динамо, которые остаются до настоящего времени недостаточно исследованными. Эти задачи важны для понимания не только природы магнитной активности Солнца, но и ее эволюционного статуса среди подобных звезд.

Ключевые слова: солнечная активность, солнечный цикл, звездная активность, звездные циклы, генерация магнитных полей

1 Введение

В последние годы в работах по природе магнитной активности Солнца наблюдается хорошо заметная конвергенция точек зрения различных исследователей. Мнения различных групп исследователей относительно основных черт механизма, вызывающего магнитную активность Солнца, заметно сближаются. Кажется вероятным, что этот раздел науки готов к разработке проблем предсказания циклической активности Солнца и к постепенному переходу к более прикладному взгляду на актуальность своих задач. Подобную трансформацию прошли многие другие разделы науки, на опыте которых заметно, что при переходе от выяснения основных черт явления к его детальному описанию в прикладном аспекте возникает искушение перестать думать об оставшихся нерешенными фундаментальных проблемах. Говоря менее формальным языком, коллеги начинают спрашивать, зачем вообще люди продолжают строить модели солнечного динамо различной степени сложности, когда есть возможность перейти к ассимиляции данных в наиболее продвинутых моделях. Видимо, есть необходимость ответить на этот законный вопрос не в общем виде, – в любой проблеме остаются недоисследованные вопросы – а более конкретно, в рамках научной публикации. Формат статьи по материалам доклада на конференции представляется адекватным в этом случае.

Естественно, предлагаемая статья выражает личное мнение автора. Другие, вероятно, назвали бы несколько иной список вопросов, ждущих своего решения. Сформулированное мнение опирается на многочисленные дискуссии с коллегами, которые так или иначе выразили свое мнение в виде разнообразных замечаний в своих публикациях. Однако выделить эти замечания из конкретных работ очень непросто, поэтому в работе приведены только те литературные ссылки, которые непосредственно поддерживают высказанные мысли.

2 Характеристики магнитного поля Солнца на поверхности и в области работы динамо

Согласно сложившимся представлениям, генерация магнитного поля Солнца механизмом солнечного динамо происходит не на поверхности Солнца, а в его недрах. Вопрос о том, насколько глубоко под

поверхностью Солнца расположена эта область, еще не вполне выяснен. Возможно, она находится не (или не только) в инверсном слое вблизи внутренней границы конвективной зоны, а существенно выше, сравнительно недалеко от поверхности Солнца. Однако нет сомнений, что область работы динамо непосредственно не наблюдаема с помощью подавляющего числа поверхностных трассеров солнечной активности, по которым нам приходится судить о распределении магнитного поля в глубине Солнца. Специалисты по солнечной активности находятся в положении слепых мудрецов из известной притчи, которые описывают слона, ощупывая его различные части. Естественно, описания конфигурации магнитного поля в глубине Солнца у специалиста по солнечному динамо, по оптическим наблюдениям поверхности Солнца или по данным о солнечном ветре оказываются сильно различными – каждый выделяет наиболее важные для него черты явления. Сближение точек зрения экспертов в этой области представляется очень важной, но трудной задачей. К сожалению, в ее решении трудно опираться только на результаты прямого численного моделирования. Дело в том, что характерные безразмерные числа, описывающие амплитуды источников генерации магнитного поля, очень сильно отличаются от единицы, что делает задачу прямого численного моделирования чрезвычайно трудной, а наши знания о деталях движений внутри Солнца очень неполны. Видимо, необходимо существенное расширение набора трассеров солнечной активности, привлекаемых для решения этой задачи. В частности, в этом плане мне кажется перспективным изучение статистики групп солнечных пятен, нарушающих правила симметрии магнитного поля Солнца (см., например, Zhukova et al., 2020).

3 Два механизма восстановления тороидального магнитного поля

Важным элементом солнечного динамо является процесс восстановления тороидального магнитного поля из полоидального. С середины пятидесятых годов ясно, что без такого восстановления солнечная динамо-машина не может работать. Выяснено, что это восстановление так или иначе происходит за счет зеркальной асимметрии солнечной конвекции. Эта зеркальная асимметрия может быть вызвана действием силы Кориолиса, а может определяться силой Лоренца, пропорциональной уже существующему магнитному полю. Первая возможность связывается с именем Паркера, а вторая – с именами Бэбкока и Лейтона. В настоящее время вторая возможность считается существенно более важной, чем первая. Вполне вероятно, что именно она вносит решающий вклад в восстановление тороидального магнитного поля. Во всяком случае считается, что действие магнитной силы достаточно для возникновения цикла магнитной активности Солнца. Однако подобная постановка вопроса не кажется достаточной. Хотелось бы получить более квантифицированную версию этого представления. В простейшем случае хотелось бы знать, сколько процентов восстановления тороидального магнитного поля связано со вторым механизмом, а сколько – с первым. Возможно, такая прямолинейная постановка вопроса по каким-то причинам неадекватна (хотя эта возможность не поддержана сейчас никаким конкретным исследованием). В этом случае представляется интересным выяснить, какова роль обоих механизмов в общей работе солнечного динамо. В этом направлении можно назвать работу Choudhuri, Karak (2012), но представляется необходимым более детальное исследование. Возможно, что вклады обоих механизмов практически неразделимы, однако этот вывод нуждается в научном обосновании.

Очевидно, что эту проблему можно рассматривать как один из аспектов предыдущей, однако кажется, что этот аспект наиболее близок к выяснению. Видимые здесь затруднения имеют, вероятно, не столько концептуальный, сколько психологический характер.

4 Солнечное динамо в ряду звездных динамо

При построении моделей солнечного динамо их авторы, естественно, стремятся воспроизвести солнечную феноменологию. При организации наблюдений звездной активности наблюдатели тоже ориентируются прежде всего на хорошо исследованную магнитную активность Солнца. Поэтому создается впечатление, что солнечную активность можно до определенной степени рассматривать как типичную модель магнитной активности по крайней мере для звезд поздних спектральных классов. В то же время еще с 90-х годов прошлого века известно, что при свободной игре с амплитудами источников генерации магнитного поля, т. е. с дифференциальным вращением и зеркальной асимметрией, в моделях динамо в сферической оболочке возникает много непохожих друг на друга магнитных

конфигураций (Jennings, Weiss, 1991). В частности, кроме магнитных конфигураций дипольного типа, характерных для Солнца, возникают магнитные конфигурации квадрупольной симметрии, с нулевым дипольным магнитным моментом. Для перехода от режима с возбуждением дипольной к режиму с возмущением квадрупольной конфигурации достаточно умеренного изменения амплитуд генераторов магнитного поля. Трудно поверить, чтобы среди огромного набора звезд не случались такие, в которых возбуждается магнитная конфигурация, кардинально отличающаяся от солнечной. Наблюдатели регулярно отмечают, что, например, карлики спектрального класса M обнаруживают активность, которая чем-то заметно отличается от солнечной активности, но затрудняются четко сформулировать, в чем проявляются эти отличия. Возможно, на таких звездах образуется совершенно иная магнитная конфигурация, чем на Солнце. В то же время имеющиеся данные о магнитной активности звезд как правило не дают оснований для подобных сопоставлений. Дело в том, что имеющиеся длинные временные ряды наблюдений обычно недостаточно характеризуют магнитные конфигурации на звездах, а те данные, которые их характеризуют, представляют собой в лучшем случае небольшой набор мгновенных изображений звезды. В то же время в арсенале астрономии уже около 40 лет есть инструменты, позволяющие строить карты запятненности по крайней мере для некоторых типов звезд. Для наблюдений, проведенных в небольшом числе спектральных линий, существуют длинные временные ряды, позволяющие выделить звезды с циклической магнитной активностью, сопоставимой с солнечной. Это, прежде всего, организованный О.Вильсоном знаменитый H–K проект. Для выделения звездных циклов с выяснением конфигурации магнитного поля с помощью картирования температурного распределения на звездах методом обратных доплеровских изображений нужны длительные временные ряды в сотнях спектральных линий. Это представляет собой потенциально разрешимую задачу, однако многолетний мониторинг ограниченной выборки звезд с помощью наблюдений на многих длинах волн плохо вписывается в рамки грантовой науки. В современных условиях проще заниматься всесторонним развитием методов наблюдения и списка звезд, для которых есть хотя бы мгновенные данные о распределении магнитного поля. Эти данные представляют несомненный интерес, но не ведут прямо к решению обсуждаемой задачи. Представляется, что мировое астрономическое сообщество в состоянии разрешить эту организационную проблему, так что через несколько десятков лет наши знания о месте солнечной магнитной активности среди различных типов магнитной активности звезд должны кардинально улучшиться.

5 Непрерывные компоненты спектра активности Солнца

Перейдем теперь к более частным проблемам. Усилия специалистов по солнечному динамо традиционно ориентированы на объяснение основного 11-летнего (или, с учетом полярности, 22-летнего) цикла (цикл Швабе) магнитной активности. Напомним, что физическая идея этого объяснения состоит в том, что в уравнениях, описывающих в линейном по магнитному полю приближении поведение среднего (крупномасштабного) магнитного поля Солнца, возникает собственное решение, собственное число которого комплексно и имеет положительную действительную часть, т. е. происходит сопровождающийся колебаниями рост магнитного поля. Естественно, этот рост со временем насыщается в результате обратного влияния растущего магнитного поля на движение солнечного вещества. Из-за этого длина номинального 11-летнего цикла и его форма несколько меняются от цикла к циклу. Важно, однако, что цикл Швабе не исчерпывает всего спектра магнитной активности Солнца. Исследователи выделяют разнообразные существенно менее стабильные колебания, среди которых наиболее известна т. н. “квазидвухлетка”, само название которой указывает на отличие этого явления от цикла Швабе. В недавней работе Frick et al. (2020) показано, что эти колебания образуют непрерывную компоненту вейвлет-спектра магнитной активности Солнца. Полученные там вейвлет-спектры магнитной активности Солнца очень похожи на хорошо известные в оптической астрономии непрерывные спектры, на фоне которых выделяется ясно выраженный максимум, соответствующий 11-летнему циклу. В подобных случаях в оптической астрономии говорят о спектральной линии на фоне непрерывного спектра. В данном случае мы имеем дело с существенно другим диапазоном частот, другими уравнениями, но строение спектров в самом деле оказывается очень похожим. Подчеркнем, что речь не идет о том, что квазидвухлетние колебания не существуют. Важно то, что в спектре не выделяется четко связанная с ними частота.

Кажется необходимым как-то вписать представление о непрерывном спектре в комплекс понятий теории солнечного динамо. С одной стороны, непрерывный спектр колебаний магнитного поля

действительно возникает в достаточно сложных моделях солнечного динамо просто в результате различных нелинейных эффектов (Sokoloff et al., 2020). В то же время так естественно объяснять происхождение колебаний, период которых меньше номинального периода цикла Швабе, однако не очевидно, что так можно объяснить более долгопериодические колебания типа цикла Гляйсберга (около 100 лет). Более того, существуют звезды (например, V833 Tau, Stepanov et al., 2020), для которых вейвлет-анализ фиксирует наличие непрерывного спектра, но не показывает наличия выделенной частоты, которую можно было бы считать аналогом цикла Швабе. Конечно, можно стоять на прагматической точке зрения – раз численное моделирование воспроизводит некоторое явление, то этого достаточно для его описания. Однако кажется предпочтительным так развить основные представления солнечного динамо, чтобы они в принципе включали бы описание непрерывной компоненты спектра солнечной активности. Одним из возможных путей появления непрерывного спектра является предложенная Charbonneau et al. (2005) картина множественных бифуркаций, возникающих при увеличении интенсивности работы солнечного динамо. Это объяснение аналогично известному сценарию Ландау перехода к турбулентности и предполагает описание исследуемого явления с использованием очень большого числа степеней свободы. Сейчас в теории турбулентности считаются предпочтительными идеи, связанные с понятием странного аттрактора, которые позволяют ограничиться описанием в рамках небольшого числа степеней свободы. Возможно, нечто подобное происходит и в солнечном динамо.

6 Долговременная история солнечного цикла

Инструментальные данные о наблюдениях солнечной активности по солнечным пятнам доступны приблизительно за все время существования телескопов, т. е. примерно за 400 лет. Конечно, за столетия стандарты и качество наблюдений не оставались постоянными, так что имеющиеся реконструкции поведения солнечной активности за это время подвергаются естественной критике, но в целом можно скорее удивляться тому, что основные черты этих реконструкций оказываются устойчивыми. Солнечные пятна иногда можно наблюдать и простым глазом. Сведения об этих наблюдениях, а также о наблюдениях других трассеров солнечной активности (например, полярных сияний), есть и за более длительное время, однако качество этих данных несопоставимо хуже, чем данные инструментальных наблюдений. Временное разрешение изотопной геохимии зависит от периода циркуляции изотопов, что для C^{14} составляет несколько лет. Поэтому методы изотопной геохимии не могут достигнуть временных разрешений прямых наблюдений пятен (день). Временное разрешение значительно ухудшается с увеличением возраста анализируемого изотопного образца. Непросто обосновать и то, что наблюдаемая изотопная вариация имеет не локальный, а планетарный характер, поэтому можно надеяться, что она связана с изменением активности Солнца.

Тем не менее данные изотопной геохимии (откуда, в частности, проникает в физику Солнца термин “трассер”) позволяют продлить (Wu et al., 2018) запись эволюции солнечной активности до примерно 10 тыс. лет (по измерениям содержания радиоактивных изотопов углерода и бериллия). Качество этих данных постепенно приближается к качеству инструментальных наблюдений солнечных пятен. Постепенно формирующаяся перспектива изучать историю солнечной активности не на протяжении нескольких десятков циклов Швабе, а на протяжении нескольких тысяч таких циклов выдвигает вопросы, которые до этого не привлекали особого внимания исследователей, поскольку казались неактуальными. В настоящее время происходит самое первоначальное формирование этой тематики, поэтому многие постановки вопросов кажутся рискованными и не всегда адекватными. Например, предсказание с не очень высокой точностью времени наступления следующего солнечного цикла не вызывает особых проблем, поскольку длина цикла не сильно меняется от цикла к циклу. Конечно, можно ошибиться сильно, не предусмотрев наступление нового глобального минимума типа минимума Маундера, но в целом эта возможность не кажется особенно актуальной. Вопрос о том, в какой степени можно предсказывать времена наступления циклов через несколько столетий, намного менее ясен. Хочется думать, что отклонения длительности циклов от номинального 11-летнего значения можно рассматривать как случайные блуждания, так что возникает предельное время предсказуемости начала циклов. Однако в литературе обсуждается представление о синхронизации работы солнечного динамо, при котором некоторые предсказания можно делать и на существенно более длинном интервале времени. Видимо, не стоит заранее отбрасывать эту возможность, и исследования такого рода имеют право на существование.

7 Резонансы волн активности

Еще один вопрос из физики солнечного цикла с тяжелой историей – это вопрос о возможности резонансов динамо волн. Он исторически связан с замечательным совпадением номинальной длины солнечного цикла с орбитальным периодом Юпитера. Трудно представить себе, что это совпадение действительно важно для формирования солнечного цикла, как такая связь может реализоваться – расстояние от Солнца до Юпитера очень велико по сравнению с расстояниями, на которые может проникать магнитное поле, а воздействия Юпитера на солнечную гидродинамику невелики. Однако в контексте изучения магнитной активности звезд тесных двойных систем эта возможность совсем не кажется малореальной. Другое дело, что существенно изменить работы динамо в недрах одной звезды за счет воздействия звезды-компаньона достаточно сложно (Moss et al., 2002). Однако главное, что вызывает беспокойство и подогревает интерес к вопросу – качественные свойства резонансных эффектов для динамо-волн очень слабо исследованы. Попытки применить стандартные представления о резонансе более обычных колебательных систем, которые описываются уравнениями второго порядка, плохо согласуются с данными численного эксперимента с уравнениями динамо, которые представляют собой систему уравнений четвертого порядка (Kalinin, Sokoloff, 2019). Возможно, на эти нестыковки можно закрыть глаза, но кажется, что это не лучшая линия поведения.

8 Выводы

Мы проследили некоторый субъективно отобранный ряд задач физики солнечной активности – от задач, актуальность которых кажется очевидной, до гораздо более частных вопросов, которые могут оказаться важными в ходе дальнейшего развития физики Солнца, а могут и остаться маргинальными вопросами, интересными лишь для небольшого количества энтузиастов. Большинство из этих задач не требуют или не ограничиваются построением детальных моделей солнечного динамо в рамках все более прямого численного моделирования. Представляется, что и в эпоху перехода к разработке методов предсказаний поведения солнечного цикла остается значительное число интересных задач, доступных для решения методами традиционной теоретической физики, что не исключает, конечно, и разумного использования компьютеров. В рамках отдельного доклада трудно объять необъятное, поэтому за бортом нашего обсуждения остались такие важные вопросы, как наличие (или отсутствие) памяти динамо-циклов (проблема синхронизации), важность стохастической компоненты, магнитная спиральность и другие. Ответы на эти вопросы могут определить, насколько звездные циклы предсказуемы.

Автор благодарен Фонду развития теоретической и математической физики БАЗИС (грант 21-1-1-4-1) и Министерству науки и высшего образования (соглашение 075-15-2019-1621) за финансовую поддержку работы.

Литература

Charbonneau P., St-Jean C., Zacharias P., 2005. Astrophys. J., vol. 619, no. 1, p. 613.
Choudhuri A.R., Karak B.B., 2012. Phys. Rev. Lett., vol. 109, no. 17, id. 171103.
Frick P. et al., 2020. Mon. Not. Roy. Astron. Soc., vol. 491, p. 5572.
Jennings R.L., Weiss N.O., 1991. Mon. Not. Roy. Astron. Soc., vol. 252, pp. 249–260.
Kalinin A., Sokoloff D., 2019. Magnetohydrodynamics, vol. 55, no. 1–2, p. 193.
Moss D. et al., 2002. Astron. Astrophys., vol. 396, p. 885.
Sokoloff D. et al., 2020. Mon. Not. Roy. Astron. Soc., vol. 497, no. 4, p. 4376.
Stepanov R. et al., 2020. Mon. Not. Roy. Astron. Soc., vol. 495, no. 4, p. 3788.
Wu C.J. et al., 2018. Astron. Astrophys., vol. 615, id. A93.
Zhukova A. et al., 2020. Solar Phys., vol. 295, p. 165.

ISBN 0367–8466
IZVESTIYA KRYMSKOI ASTROFIZICHESKOI OBSERVATORII

Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ. 118, № 1, 12–17 (2022) doi:10.31059/izcrao-vol118-iss1-pp12-17

Some unresolved problems in solar dynamo

D. Sokoloff[1,2,3]

[1] Moscow State University, Moscow 119991, Russia
sokoloff.dd@gmail.com
[2] IZMIRAN, Kaluzhskoe shosse 4, Troitsk 1421980, Russia
[3] Moscow Center of Fundamental and Applied Mathematics, Moscow 119991, Russia

Abstract. Contemporary solar dynamo theory is now transiting to the solar activity forecast problems. It looks important however to keep in mind foundations of solar dynamo theory. It is why we consider here some unresolved problems in these foundations. The problems are important for understanding solar activity as well as activity of stars similar to some extent to the Sun.

Key words: solar activity, solar cycle, stellar activity, stellar cycles, magnetic field generation