

УДК 523.9

UDC 523.9

01.00.00 Физико-математические науки

Physics and mathematics

О ЯВЛЕНИИ РЕКОННЕКЦИИ В НИЖНИХ СЛОЯХ МАГНИТНОЙ ТРУБКИ. ТЕОРИЯ**ABOUT RECONNECTION PHENOMENON IN THE LOWER LAYERS OF A MAGNETIC TUBE. THEORY**

Бегларян Маргарита Евгеньевна
к.ф.-м.н., доцент

Beglaryan Margarita Evgenievna
Candidate in Physics and Mathematics., associate professor

РИНЦ SPIN-код = 4297-1850
СКФ ФГБОУВО «Российский государственный университет правосудия», г. Краснодар, ул. Леваневского, 187/1.

RSCI SPIN-code = 4297-1850
NCB FSBEIHE "Russian State University of Justice", Krasnodar, Levanevskogo st., 187/1.

Rita_beg@mail.ru

Rita_beg@mail.ru

Ранее было показано [1,2], что вариации интенсивности γ -квантов аксионного происхождения, индуцированные вариациями магнитного поля в тахоклине вследствие термомагнитного Эттинсгаузена–Нернста эффекта, непосредственно вызывают вариации светимости Солнца и, в конечном счете, характеризуют изменения активного и спокойного состояний Солнца. В данной статье показано, каким образом области солнечных пятен генерируются действием глобального динамо в конвективной зоне, или, иначе говоря, какие фундаментальные физические процессы связывают солнечные пятна и солнечные циклы с крупномасштабным магнитным полем Солнца

It was shown before [1,2], that variants of intensity of γ -quanta of axion origin, induced by the variants of the magnetic field in the the tacho wedge through the termomagnetic Ettinshausen-Nernst effect, cause variations of solar luminance and ultimately characterise the changes of active and calm state of the Sun. It is shown in the article in which way the areas of sunspots are generated by the action of global dynamo in the convective zone, or in other words, which fundamental processes connect the sunspots and solar cycles with the large-scaled magnetic field of the Sun

Ключевые слова: ДИНАМО, МАГНИТНАЯ ТРУБКА, МАГНИТОКОНВЕКЦИЯ, РЕКОННЕКЦИИ, СОЛНЕЧНЫЕ ПЯТНА, СОЛНЕЧНЫЕ ЦИКЛЫ, ТАХОКЛИН

Keywords: DYNAMO, MAGNETIC TUBE, MAGNETOCONVECTION, SUN SPOTS, SOLAR CYCLES, TACHOCLINE

Doi: 10.21515/1990-4665-127-047

Одним из главных проявлений солнечной активности является возникновение солнечных пятен на поверхности Солнца, демонстрирующее циклическое поведение с периодом ~ 11 лет (см., например, [3]). В солнечных пятнах наблюдается высокая концентрация магнитного поля, подавляющая конвективный перенос тепла от внутренней части Солнца к его поверхности [4–6]. Поэтому солнечные пятна холоднее и выглядят тёмными на фоне солнечного диска. Более ста лет назад Хэйл [7] обнаружил существование вертикальных “вихрей” магнитных полей в солнечных пятнах. Год спустя, британский астроном

Эвершед [8], проводивший наблюдения в Kodaikanal (Тамиланд, Индия), обнаружил, что вопреки вертикальным “вихрям” Хэйла [7], поле в полутени солнечного пятна расходится радиально от центра пятна. Тем не менее, механизм образования солнечных пятен с тенью и полутенью, а также эффект Эвершеда всё ещё остаются предметом активных дискуссий и исследований, при этом до настоящего времени ряд фундаментальных вопросов остается без ответа [9–12].

С другой стороны, ясно [13], что полное понимание происхождения тонкой структуры солнечных пятен (таких явлений, как яркие точки на фоне тёмной тени, нитевидная структура полутени и мощные радиальные потоки, открытые Эвершедом) (рис. 1), должно быть связано с двумя важнейшими экспериментальными и теоретическими результатами:

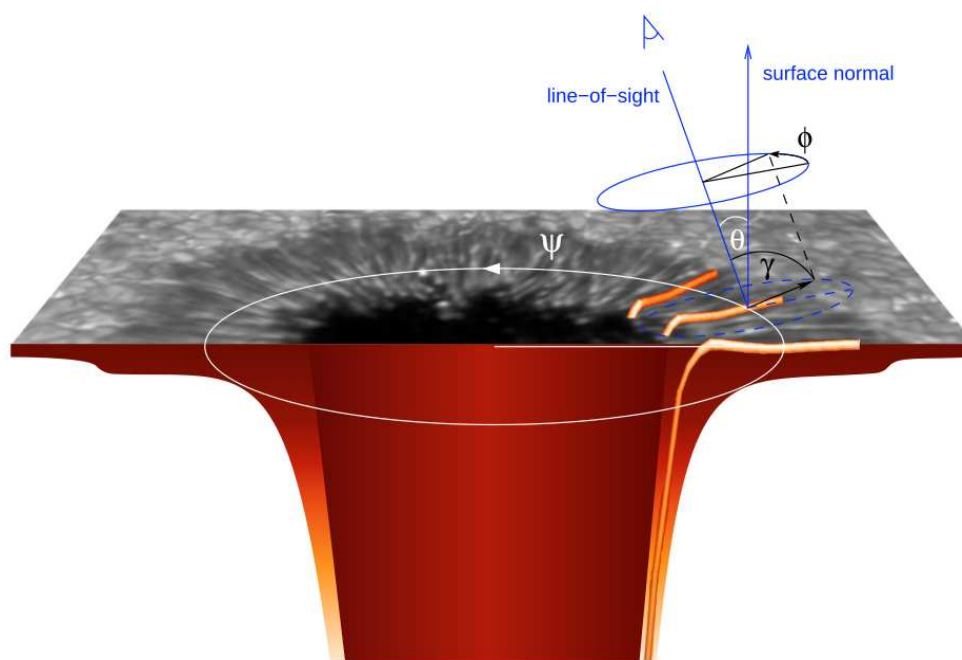


Рис. 1 Магнитный поток трубки в полутени (пенумбра), содержащей светлые волокна, которые тесно связаны с наблюдаемым потоком характерного газа, т.е. потоком Эвершеда (см., например, [10]). Гелиоцентрический угол θ , азимут ϕ и наклонение γ магнитного поля изменяются в зависимости от положения потока трубки в солнечном пятне, выраженного углом ψ . Адаптировано из [14].

– улучшение пространственной разрешающей способности солнечных телескопов, развитие спектрополяриметров, способных формировать трёхмерное представление деталей тонкой структуры Солнца, а также методы инверсии, разработанные для интерпретации таких данных;

– возможность реалистичного моделирования таких структур при помощи численного трёхмерного расчёта магнитогидродинамики, магнитоконвекции и действия солнечного динамо.

Например, результаты моделирования [13] в настоящее время однозначно показывают, что происхождение тонкой структуры солнечного пятна и потоков Эвершеда является следствием конвективных процессов, действующих под видимой поверхностью в сильных магнитных полях, которые либо почти вертикальны (в области тени), либо более горизонтальны (в области полутени). Такая же связь была найдена в результате моделирования потока Эвершеда в рамках магнитоконвекции, как результат опрокидывающей конвекции в присутствии наклонного магнитного поля [15–22]. При этом численное моделирование [23] подтверждает эти ожидания и для слоёв ниже поверхности, но предсказывает сильную анизотропию в пользу горизонтальных полей в фотосфере (т. е. конвективно стабильных слоев) как для мелкомасштабного динамо [24, 25], так и для магнитоконвекции со средним вертикальным полем [26, 27].

Очень важно, что результаты моделирования магнетоконвекции с учётом важнейших физических процессов, ответственных за конвекцию у поверхности Солнца, указывают на действие турбулентного мелкомасштабного динамо, т.е. наблюдаемое турбулентное поле действительно может быть результатом действия мелкомасштабного динамо, приводимого в движение межгранулярными нисходящими потоками [28–30]. Таким образом, наблюдение сильных горизонтальных

полей в средней фотосфере [24], а также слабые сигналы магнитного поля, зарегистрированные чувствительными поляриметрами [31–33], могут быть объяснены характерными особенностями магнитного поля, генерируемого мелкомасштабным динамо. Поэтому наблюдения таких особенностей магнитных полей в спокойных межгранулярных областях на Солнце согласуются с действием мелкомасштабного турбулентного динамо.

С другой стороны, известно [29, 34, 35], что интерпретация наблюдений позволяет сделать предположение о том, что мелкомасштабные магнитные поля вызываются турбулентностью, действующей на крупномасштабные магнитные поля из глобального солнечного динамо, и связаны с периодичным 11-летним циклом колебаний числа солнечных пятен с [36–41]. В то же время понятно (см. [42–44]), что астрофизическая значимость действия мелкомасштабного динамо практически не оспаривается даже в ситуациях, когда крупномасштабное динамо возможно в конвективной зоне (как, например, на Солнце), мелкомасштабные магнитные поля наблюдаются повсеместно даже в спокойной фотосфере, где нет никаких признаков проявления крупномасштабных полей [28, 29, 46–48].

Нас особенно интересуют те факты, которые современные теории, предполагающие, что области солнечных пятен создаются действием динамо у дна конвективной зоны, не могут убедительно доказать и объяснить механизмы действия динамо в объёме конвективной зоны. Более того, проблема отсутствия таких доказательств усиливается еще тем, что при прямом численном моделировании солнечного динамо на основе наблюдательных данных, с одной стороны, потоки тонких трубок сопоставимой магнитной напряженности до сих пор вообще не найдены (см., например, [49–51]), а с другой стороны, из гелиосейсмологии также не следует никаких убедительных доказательств существования

восходящих магнитных потоков трубок [52–53]. Это особенно важно, если принять во внимание недавние результаты гелиосейсмологических исследований, которые устанавливают строгие эмпирические ограничения на амплитуду скоростей крупно-масштабной конвекции в недрах Солнца, и тем самым, показывают несоответствие с результатами глобального магнитоконвективного моделирования [52–58].

Отсюда возникает главный вопрос: “Каким образом области солнечных пятен генерируются действием динамо в конвективной зоне, или иначе говоря, какие фундаментальные физические процессы связывают солнечные пятна и солнечный цикл с крупно-масштабным магнитным полем Солнца?”

Существует два ответа на этот вопрос. Свойства тахоклины, определяющие принципиальную динамическую важность термомагнитного эффекта Эттингсгаузена-Нернста, во-первых, играют ключевую роль в процессе вариации сильного магнитного поля и, во-вторых, по меньшей мере, частично отвечают за управление циклами солнечной [59–66]. Несколько ниже покажем это.

Важным результатом, который мы получили, является теоретическое доказательство существования сильного полоидального магнитного поля $B_{от} \sim 4100$ Тл в тахоклине в силу термомагнитного эффекта Эттингсгаузена-Нернста (см. уравнения (11)–(27) в [1]). Переход полоидального магнитного поля в тороидальное через радиальный сдвиг в тахоклине [66] является результатом образования Ω -подобной петли сверхсильного магнитного поля. При этом эффект охлаждения Ω -подобной петли является основным фактором, ответственным за концентрацию магнитного потока. Это происходит вследствие хорошо известного подавления конвективного теплопереноса в сильном магнитном поле [4]. Это означает, что хотя основной азимутальный магнитный поток располагается в сдвиговом слое, он определяет дополнительный

локальный сдвиг, порождая значительное охлаждение внутри Ω -подобной петли.

Из множества известных концепций, играющих заметную роль в понимании связи между переносом энергии и темнотой солнечных пятен, рассмотрим, по нашему мнению, наиболее значительную. Она основана на эффекте охлаждения Паркера-Бирмана [4, 6], который объясняет высокую концентрацию магнитного поля, подавляющего конвективный теплоперенос изнутри Солнца к его поверхности, предоставляя таким образом прямое объяснение и пониженной температуре этой области на видимой поверхности Солнца (см., например, рис.5а и уравнение (31) в [1]). Из рис. 5а и уравнения (28) в [1] следует, что самые холодные области вдоль всей конвективной зоны, сформированные под действием охлаждающего эффекта Паркера–Бирмана, имеют сильное магнитное давление в скрученных магнитных трубках, которое можно оценить из условия для относительно холодной тени (умбра) (рис. 1 и рис. 2а):

$$p_{ext} = \left[p_{int} + \frac{B^2}{8\pi} \right]_{penumbra} = \left[\frac{B^2}{8\pi} \right]_{umbra}, \quad (1)$$

где закреплённые магнитные трубки формируют на поверхности Солнца пару солнечных пятен с тенью (умбра) и полутенью (пенумбра). При этом существование нейтральной плавучести потока магнитной трубки подразумевает, что при условии равенства внешней и внутренней плотности ($\rho_{ext}=\rho_{int}$) температура внутри трубок ниже, чем температура во внешней среде (см. рис.5а в [1] и рис. 2а) и тем самым порождает подъем движения трубки на поверхности Солнца. Таким образом, параметры нейтральной плавучести, такие как плотности

$$\rho_{ext} = (\rho_{int})_{penumbra} \gg (\rho_{int})_{umbra}, \quad (2)$$

внешние и внутренние давления газа

$$P_{ext} \gg (p_{int})_{penumbra} \geq (p_{int})_{umbra}, \quad (3)$$

плазма β - параметр (отношение внешнего давления газа и магнитного давления)

$$\left(\frac{B_0^2}{8\pi p_{ext}} \right) \equiv \frac{1}{\beta} \sim 1 \gg \left(\frac{B_{eq,0}^2}{8\pi p_{ext}} \right) \sim 10^{-7}, \quad (4)$$

и тороидальное магнитное поле в тахоклине

$$(B_0)_{umbra} \gg B_{eq,0} \sim 10^4 G, \quad (5)$$

являются основными параметрами практически пустой магнитной трубки (см. рис. 2a), где также $B_{eq,0}$ – напряженность магнитного поля в тахоклине (т.е. при $z=0$), при которой плотность магнитной энергии находится в равнораспределении с плотностью кинетической энергии конвективных нисходящих потоков.

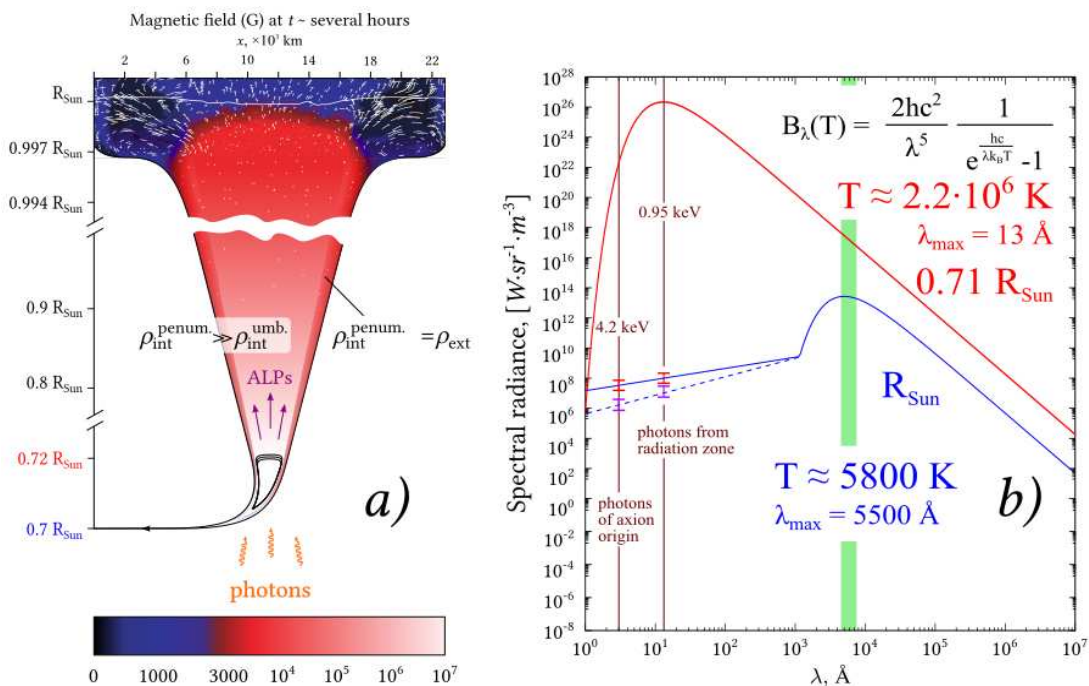


Рис. 2 (а) Практически пустая магнитная трубка, которая рождается закрепленной на тахоклине и с помощью нейтральной плавучести ($\rho_{int}^{penum} = \rho_{ext}$) поднимается до поверхности Солнца. Сильное подавление конвекции магнитного поля вызывает быстрое падение температуры и плотности ($\rho_{int}^{penum} \gg \rho_{int}^{umbra}$), что приводит к сильному снижению давления

газа над умброй. Верхняя часть (фотосфера, синий цвет) показывает напряженность магнитного поля и потока поля (светлые стрелки (адаптировано из [15, 67])). Вблизи пограничного слоя между овершутным слоем и подстилающей радиационной области, т.е. вблизи тахоклина, фотоны, появляющиеся из приповерхностной радиационной области и проходящие через горизонтальное магнитное поле О-петли (см. рис. рис.5а в [1]), конвертируются в аксионы и, тем самым, практически полностью подавляют радиационный нагрев в почти пустой магнитной трубке. Однако, небольшой поток фотонов все-таки проходят через “кольцо” магнитной трубки, т.е. проходящие слева и справа между О-петлей и стенками трубки (рис.5а в [1]), и доходят до полутени (полумбра). **(b)** Спектр абсолютно чёрного тела с температурой $2.22 \cdot 10^6$ К на уровне $0.71 R_{Sun}$ (см. рис. 7 в [1] и [68]). Рентгеновская светимость определяется только средней энергией ~ 0.95 keV тепловых фотонов в тахоклине [69]. Эти фотоны превращаются в аксионы на ”магнитных ступеньках” на уровне $0.72 R_{Sun}$, и поэтому не входят в спектр более высоких слоёв, хотя немалый поток фотонов, проходящих слева и справа между О-петлей и стенками трубки (см. рис. 5а в [1] и рис. 2а), доходят до полутени, где помимо кэВ-фотонов, существует немало видимых фотонов (см. зелёную линию на рис. 2б). Как и ранее, синяя линия представляет спектр абсолютно чёрного тела с температурой солнечной поверхности.

Наши результаты подтверждают (см. уравнение (1) для тени (умбра), что когда β -параметр плазмы ($\beta = 8 \mu p_{ext} / B^2$) стремится к единице, т.е. когда магнитное давление доминирует над внутренним давлением газа, конвективный перенос энергии значительно затруднён по всей конвективной зоне, начиная от тахоклина и до тени включительно (рис. 2). Стоит подчеркнуть также тот факт, что подавление конвекции проявляется сильнее для горизонтального магнитного поля, так как сила Лоренца в этом случае противодействует вертикальным магнитным потокам. Иначе говоря, превышение некоторой напряжённости магнитного поля (см., например, (1) и (5)), по всей видимости, приводит к глобальному подавлению конвекции [4, 6, 70–73].

При этом, как известно (см., например, [35, 74]), обратная связь силы Лоренца приводит к значительному подавлению турбулентного α -эффекта для большого магнитного числа Рейнольдса R_m , которое может быть связано с ближайшим (например, фотосфера) сохранением магнитной

спиральности. Генерация спиральных потоков порождает образование мелкомасштабной спиральности в противоположном “направлении”, которая может заглушить крупномасштабное динамо, если только она не рассеивается или не будет вынесена из этой области посредством потока магнитной спиральности (см., например, [74]). Важно понимать, что физика подавления конвекции от тахоклина до фотосферы, с одной стороны, интерпретируется как подавление крупномасштабного динамо (см. рис. 5а в [1] и рис. 3а), а, с другой стороны, учитывая магнитоконвекцию в полутени (1) для полутени, определяет тот факт, что солнечные пятна (через действие мелкомасштабного динамо) и солнечный цикл связаны с крупномасштабным магнитным полем Солнца. Покажем это.

Для того, чтобы понять физику происхождения и вариаций солнечных циклов (см. рис. 9 и 17 в [3]), будем исследовать их с использованием трехмерного моделирования динамо на основе модели Karak–Brandenburg [75], которая предопределяет простую модель турбулентного динамо в сдвигающей коробке-ячейке, управляемой посредством спирально вынужденной турбулентности. При обсуждении моделирования динамо при различных параметрах, мы выделяем одно из решений на основе простой модели [75], в которой мелкомасштабное магнитное поле, генерируемое через расщепление и запутывание крупномасштабных магнитных полей, положительно коррелирует с глобальным магнитным циклом [75].

Однако, как ни удивительно, рассмотренное решение явно зависит от времени, т.е. от времени жизни магнитных трубок, поднимающихся от тахоклина до поверхности Солнца, и поэтому в силу эффекта магнитной реконнекции на нижних слоях (см. рис. 4 в [76] не является конечным этапом моделирования. При этом магнитная Ω -петля (рис. 3а), образующая умбру солнечного пятна через не прямое подавление конвекции от

тахоклина до фотосферы, порождает конвективный восходящий поток вокруг Ω -петли, образуя полутень солнечного пятна. В силу эффекта предреконнекции (рис. 3) одновременно не только сталкиваются “ножки” Ω -петли (рис. 3b), но и генерируется конвективный поток у основания конвективной зоны. Ниже на основе процессов магнетоконвекции, т. е. взаимодействия магнитного поля с конвективными потоками, мы покажем, что с помощью результатов трехмерного моделирования динамо на основе модели Karak –Brandenburg крупномасштабное динамо наблюдается тогда, когда существует механизм подавления мелкомасштабных флуктуаций.

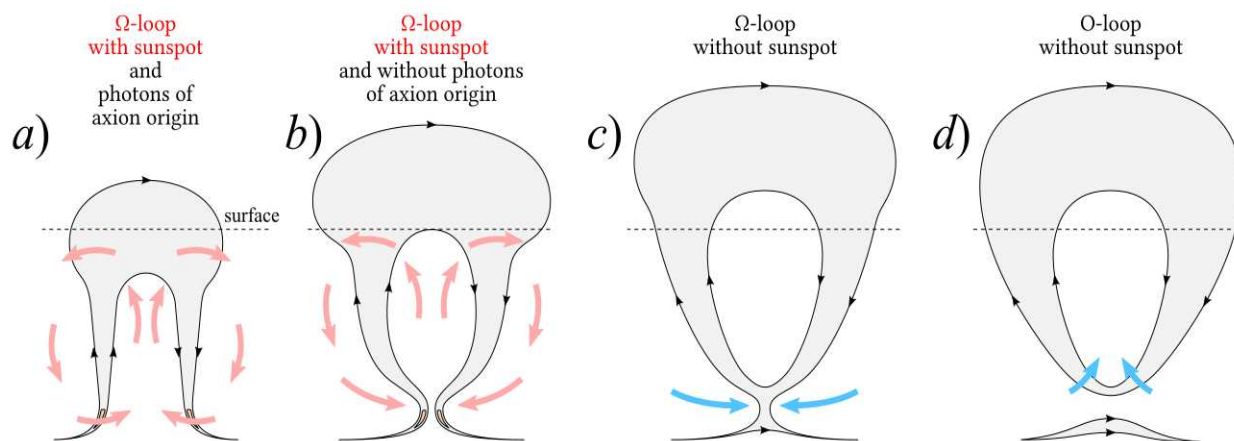


Рис. 3 Схема явления магнитной реконнекции в области токового слоя между магнитными полями противоположной полярности вблизи тахоклина. (a) Ω -петля образует тень солнечного пятна (с участием фотонов аксионного происхождения (см. рис. 5a в [1])) через не прямой термомагнитный эффект Эттингсхаузена-Нернста; (b) Ω -петля с солнечным пятном (без участия фотонов аксионного происхождения); розовые стрелки показывают восходящий конвективный поток внутри “ножек” Ω -петли во время её подъёма от тахоклина к видимой поверхности; (c) Ω -петля с реконнекцией и без солнечного пятна; (d) O-петля без солнечного пятна. При прохождении стадий (a), (b), (c), (d) (слева направо) конвекция вокруг поднимающейся Ω -петли “закрывает” её у основания, и путём реконнекции формируется свободная O-подобная петля, а также восстанавливается исходная конфигурация азимутального поля у дна рассматриваемой области. Стрелки показывают движение вещества, приводящее к соединению “ножек” петли.

Известно, что в работах [76–79] утверждалось, что восходящий конвективный поток вокруг поднимающейся Ω -петли сталкивает её ”ножки” вместе таким образом, что происходит реконнекция магнитного поля поперёк этой петли, отсекающая её от азимутального магнитного поля и превращающая её в O -петлю (см. рис. 4 в [76] и рис. 3 в [77]). После этого азимутальное магнитное поле принимает свою исходную форму и готово повторить процесс с Ω -петлей.

Образовавшиеся O -петли могут вращаться под действием кориолисовой силы и давать вклад в среднее полоидальное поле при слиянии друг с другом, порождая α -эффект глубоко в конвективной зоне [76]. По мере того, как действие конвективного динамо в сочетании с меридиональной циркуляцией поля со скоростями порядка $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ выносит азимутальное поле в направлении экватора, отдельные волокна (фибриллы) азимутального поля становятся всё более и более плотными с накоплением газа, извлечённого из внутренних слоёв ниже тахоклина. Это можно назвать Ω -накачкой [76]. Накачка плазмы из азимутального поля в Ω -петлю повторяется снова и снова. Как отмечается в [80], повторное появление новых Ω -петель с интервалом в 5-8 дней свидетельствует о продолжающейся конвективной накачке плазмы.

Рассматривая Ω -петли с солнечным пятном, которые связаны с условием магнитной реконнекции при нижних слоях (см. рис. 3b), мы используем решение, основанное на простой модели Karak–Brandenburg, где одновременно действуют оба динамо: мелкомасштабное и крупномасштабное. Причём, мелкомасштабное поле происходит как от мелкомасштабного динамо, так и от запутывания крупномасштабного поля. В случае, когда крупномасштабное поле сильнее значения равномерного распределения, т.е. $(B_0)_{umbra} \gg B_{eq.,0} \sim 10^4 \text{ G}$ (см. уравнение (5)), в работе [75] наблюдают антикорреляцию между мелкомасштабным полем и крупномасштабным магнитным циклом.

Отсюда получается интригующий результат. Помня о том, что среднее время жизни солнечного пятна ($\tau_{\text{spot}} < 1$ для [9, 81]) можно оценивать суммой времён наблюдений солнечных пятен с участием (см. рис. 3a) и без участия (см. рис. 3b) фотонов аксионного происхождения, из двух независимых теоретических заключений о корреляции (рис. 3a) и антикорреляции (рис. 3b) между мелкомасштабным полем и крупномасштабным магнитным циклом можно сделать вывод, что как это ни удивительно, но среднее мелкомасштабное магнитное поле никак не коррелирует с глобальным циклом солнечных пятен.

Поскольку мелкомасштабное динамо может производить межсетевое горизонтальное магнитное поле на спокойном Солнце [24, 82], важным экспериментальным доказательством данных исследований является то, что различие между крупномасштабным динамо, которое создаёт цикл солнечных пятен, и мелкомасштабным динамо, которое не зависит от цикла солнечных пятен, даёт экспериментальное свидетельство происхождения солнечного межсетевого горизонтального поля, которое не зависит от солнечного цикла (см. рис. 4 в [47]), и, как следствие, свидетельствует о существовании циклического крупномасштабного турбулентного динамо.

Отсюда главный ответ на известный вопрос о связи между вариациями солнечных пятен и солнечных циклов с крупномасштабным магнитным полем Солнца. Итак, показано, что практически пустая магнитная трубка (рис. 5a в [1] и рис. 2a)) под воздействием магнитной реконнекции преобразует появление мелкомасштабного динамо (рис. 3), которое не зависит от цикла солнечных пятен (см. усреднение корреляций (рис. 3a) и антикорреляций пятен (рис. 3b)), и крупномасштабного динамо (рис. 3b), которое связано с циклом солнечных пятен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V.D. Rusov, I.V. Sharph, M.V. Eingorn, V.P. Smolyar, M.E. Beglaryan. Thermomagnetic Ettingshausen-Nernst effect in tachocline and axion mechanism of Sun luminosity: arXiv:1508.03836.
2. M. Giannotti, I. J. Redondo, A. Ringwald. Cool WISPs for stellar cooling excesses. *JCAP* 05 (2016) 057.
3. D. H. Hathaway, The Solar Cycle. *Living Rev. Solar Phys.*, 12, (2015), 4.
4. L. Biermann, Der gegenwärtige Stand der Theorie konvektiver Sonnenmodelle. *Vierteljahres-schrift Astron. Gesells.* 76, 194–200 (1941).
5. T.G. Cowling, 1953, in *The Solar System, Vol 1: The Sun*, ed. G. P. Kuiper (Chicago: University of Chicago Press), 532.
6. E.N. Parker, The formation of sunspots from the solar toroidal field. *ApJ* 121, 491, 1955.
7. G.E. Hale, On the probable existence of a magnetic field in sunspots. *Astrophys. J.* 28, 315–8. 343 (1908).
8. J. Evershed, Radial movement in sun-spots, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 69, 454–457 (1909).
9. S.K. Solanki, 2003, Sunspots: An overview, *Astron. Astrophys. Rev.*, 11, 153–286.
10. J.M. Borrero, K. Ichimoto, Magnetic Structure of Sunspots. *Living Rev. Solar Phys.*, 8, (2011), 4.
11. S.K. Tiwari, M. van Noort, S.K. Solanki, A. Lagg, Depth-dependent global properties of a sunspot observed by Hinode using the Solar Optical Telescope/Spectropolarimeter. *A&A* 583, A119 (2015).
12. S.E. Pozuelo, L. R. Bellot Rubio, J. de la Cruz Rodriguez, Lateral downflows in sunspot penumbral filaments and their temporal evolution. *The Astrophysical Journal*, 803:93, 2015
13. G. B. Scharmer, Response to “Stray-light correction in 2D spectroscopy” by R. Schlichenmaier and M. Franz (Research Note). *A&A* 561, A31 (2014).
14. D. A. N. Müller, R. Schlichenmaier, G. Fritz, C. Beck. The multi-component field topology of sunspot penumbrae: A diagnostic tool for spectropolarimetric measurements. *A&A* 460, 925–933 (2006).
15. T. Heinemann, A. Nordlund, G. B. Scharmer, H. C. Spruit. MHD simulations of renumbra fine structure. *The Astrophysical Journal* , 669:1390Y1394, 2007.
16. G. B. Scharmer, A. Nordlund, T. Heinemann. Convection and the origin of Evershed flows in suspot penumbrae. *The Astrophysical Journal*, 677: L149–L152, 2008.
17. M. Rempel, M. Schüssler, R. H. Cameron, M. Knölker. Penumbral Structure and Outflows in Simulated Sunspots. *Science* 325 (2009) 171-174.
18. M. Rempel, M. Schüssler, M. Knölker. Radiative magnetohydrodynamic simulation of sunspot structure. *The Astrophysical Journal* , 691:640–649, 2009.
19. I. N. Kitiashvili, A. G. Kosovichev, A. A. Wray, N. N. Mansour. Traveling waves of magnetoconvection and the origion of the Evershed effect in sunspots. *The Astrophysical Journal*, 700:L178–L181, 2009.
20. M. Rempel. Penumbral fine structure and driving mechanisms of large-scale flow in simulated sunspots. *The Astrophysical Journal* , 729:5, 2011.
21. M. Rempel. Numerical sunspot models: robustness of photospheric velocity and magnetic field structure. *The Astrophysical Journal*, 750:62, 2012.
22. M. Rempel. Numerical simulations of sunspot decay: on the penumbra – Evershed flow – moat flow connection. *The Astrophysical Journal*, 814:125, 2015.

23. J. M. Borrero, S. Jafarzadeh, M. Schüssler, S. K. Solanki. Solar magnetoconvection and small-scale dynamo. Recent developments in observation and simulation. *Space Science Reviews*, 1–42 (2015).
24. M. Schüssler, A. Vögler. Strong horizontal photospheric magnetic field in a surface dynamo simulation. *A&A* 481, L5–L8 (2008).
25. M. Rempel. Numerical of quiet Sun magnetism: on the contribution from a small-scale dynamo. *The Astrophysical Journal*, 789:132, 2014.
26. O. Steiner, R. Rezaei, W. Schaffenberger, S. Wedemeyer-Böhm, The Horizontal Internetwork Magnetic Field: Numerical Simulations in Comparison to Observations with Hinode. *Astrophys. J.* 680, 85–88 (2008). doi:10.1086/589740.
27. O. Steiner, R. Rezaei, Recent Advances in the Exploration of the Small-scale Structure of the Quiet Solar Atmosphere: Vortex Flows, the Horizontal Magnetic Field, and the Stokes- V Line-ratio Method, in Fifth Hinode Science Meeting, ed. by L. Golub, I. De Moortel, T. Shimizu Astronomical Society of the Pacific Conference Series, vol. 456, 2012, p. 3.
28. A. Vögler and M. Schüssler. A solar surface dynamo. *A&A* 465, L43–L46 (2007).
29. J.P. Graham, R. Cameron, M. Schüssler. Turbulent small-scale dynamo in solar surface simulations. *The Astrophysical Journal* , 714:1606–1616, 2010.
30. R. Moll, R. H. Cameron, M. Schüssler. Vortices in simulations of solar surface convection. *A&A* 533, A126 (2011).
24. M. Schüssler, A. Vögler. Strong horizontal photospheric magnetic field in a surface dynamo simulation. *A&A* 481, L5–L8 (2008).
31. J.P. Graham , S. Danilovic, M. Schüssler. Turbulent magnetic field in the quiet Sun: implications of *Hinode* observations and small-scale dynamo simulations. *The Astrophysical Journal* , 693:1728–1735, 2009.
32. S. Danilovic, B. Beeck, A. Pietarila, M. Schüssler , S. K. Solanki, V. Martínez Pillet, J. A. Bonet, J. C. del Toro Iniesta, V. Domingo, P. Barthol, T. Berkefeld, A. Gandorfer, M. Knölker , W. Schmidt, and A. M. Title. Transverse component of the magnetic field in the solar photosphere observed by Sunrise. *The Astrophysical Journal Letters* , 723:L149–L153, 2010.
33. S. Danilovic, M. Schüssler, S. K. Solanki. Probing quiet Sun magnetism using MURaM simulations and Hinode/SP results: support for a local dynamo. *A&A* 513, A1 (2010).
34. Brandenburg, A., Sokoloff, D., Subramanian K. Current Status of Turbulent Dynamo Theory. From Large-Scale to Small-Scale Dynamos. *Space Sci. Rev.* (2012) 169:123–157.
35. M. Miesch, W. Matthaeus, A. Brandenburg, A. Petrosyan, A. Pouquet, C. Cambon, F. Jenko, D. Uzdensky, J. Stone, S. Tobias, Ju. Toomre, M. Velli. Large-Eddy Simulations of Magnetohydrodynamic Turbulence in Heliophysics and Astrophysics. *Space Sci. Rev.* (2015) 178:163–200.
36. E. N. Parker. Hydromagnetic dynamo models. *ApJ* 122 (1955) 293.
37. A.R. Choudhuri, M. Schüssler, M. Dikpati. The solar dynamo with meridional circulation. *Astron. Astrophys.* 303, L29–L32 (1995).
38. M. Dikpati, P. Charbonneau. A Babcock-Leighton flux transport dynamo with solar-like differential rotation. *ApJ* 518:508–520, 1999.
39. H. Hota and T. Yokoyama. Importance of surface turbulent diffusivity in the solar flux-transport dynamo. *The Astrophysical Journal* , 709:1009–1017, 2010.
40. H. Hota and T. Yokoyama. Solar parity issue with flux-transport dynamo. *The Astrophysical Journal Letters* , 714:L308–L312, 2010.

41. H. Hotta, M. Rempel, T. Yokoyama. Large-scale magnetic fields at high Reynolds numbers in magnetohydrodynamic simulations. *Science* 351 (2016) 1427
42. A. Brandenburg. Nonlinear small-scale dynamo at low magnetic Prandtl number. *The Astrophysical Journal*, 741:92 (6pp), 2011.
43. P. Charbonneau. Dynamo Models of the Solar Cycle. *Living Rev. Solar Phys.*, 7, (2010), 3
44. P. Charbonneau. Solar Dynamo Theory. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 2014. 52:251–90.
45. Cattaneo, F., 1999, On the origin of magnetic fields in the quiet photosphere, *Astrophys. J. Lett.*, 515, L39–L42.
46. C.L. Jin, Wang, J. X., Song, Q. & Zhao, H., The Sun's small-scale magnetic elements in solar cycle 23. *The Astrophysical Journal* , 731:37, 2011.
47. C. Jin, J. Wang, Solar cycle variation of the inter-network magnetic field. *The Astrophysical Journal*, 806:174, 2015.
48. C. Jin, J. Wang, Does the variation of solar inter-network horizontal field follow sunspot cycle? *The Astrophysical Journal*, 807:70, 2015.
49. G. Guerrero, P. J. Käpylä. Dynamo action and magnetic buoyancy in convection simulations with vertical shear. *A&A* 533, A40 (2011).
50. N. J. Nelson, B.P. Brown, A.S. Brun, M.S. Miesch, Ju. Toomre. Magnetic wreaths and cycles in convective dynamos. *The Astrophysical Journal*, 762:73, 2013
51. P.J. Käpylä, M.J. Mantere, E. Cole, J. Warnecke, A. Brandenburg. Effects of enhanced stratification on equatorward dynamo wave propagation. *The Astrophysical Journal*, 778:41, 2013.
52. R.F. Stein. Solar Surface Magneto-Convection. *Living Reviews in Solar Physics* 9(4) (2012)
53. S.M. Hanasoge, T.L. Duvall, M.L. DeRosa. Seismic constraints on interior solar convection. *Astrophys J Lett* 712:L98–L102, 2010.
54. S.M. Hanasoge, T. L. Duvall, Jr. Katepalli R. Sreenivasan. Anomalously weak solar convection. *PNAS* 109 (2012) 11928–11932.
55. S.M. Hanasoge, M. S. Miesch, M. Roth, J. Schou, M. Schüssler, M. J. Thompson. Solar Dynamics, Rotation, Convection and Overshoot. *Space Sci. Rev.* (2015).
56. L. Gizon, A.C. Birch, Helioseismology challenges models of solar convection. *PNAS* 109, 11896–11897 (2012).
57. Birch, A. C., Braun, D. C., Leka, K. D., Barnes, G., Javornik, B. Helioseismology of Pre-emerging Active Regions. II. Average Emergence Properties. *The Astrophysical Journal*, 762(2): 131, 2013.
58. A.C. Birch, H. Schunker, D.C. Braun, R. Cameron, L. Gizon, B. Löptien, M. Rempel. A low upper limit on the subsurface rise speed of solar active regions. *Science Advances* 2016; 2:e1600557.
59. E.A. Spiegel, N.O. Weiss. Magnetic activity and variations in solar luminosity. *Nature* 287, 616–617, 1980.
60. R. Rosner. 1980 in: *Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun*, ed. A. K. Dupree (SAO SR-389) (Cambridge: SAO), 79.
61. G.A. Glatzmaier. Numerical simulations of stellar convective dynamos. II. Field propagation in the convective zona. *ApJ*, 291, 300, 1985.
62. N. O. Weiss. 1994, in *Lectures on Solar and Planetary Dynamos*, ed. M. R. E. Proctor & A. D. Gilbert (Cambridge: Cambridge Univ. Press), 59.
63. J. Schow et al. Helioseismic studies of differential rotation in the solar envelope by the solar oscillations investigation using the Michelson Doppler Imager. *The Astrophysical Journal*, 505:390–417, 1983.

64. T. V. Zaqarashvili, M. Carbonell, R. Oliver, J.L. Ballester. Magnetic Rossby waves in the solar tachocline and Rieger-type periodicities. *The Astrophysical Journal* , 709:749–758, 2010.
65. T.V. Zaqarashvili, R. Oliver, A. Hanslmeier, M. Carbonell, J. L. Ballester, T. Gachechiladze, I.G. Usoskin. Long-term variation in the Sun's activity caused by magnetic Rossby waves in the tachocline. *The Astrophysical Journal Letters*, 805:L14, 2015.
66. G. Guerrero, P. K. Smolarkiewicz, E. M. de Gouveia Dal Pino, A. G. Kosovichev, N. N. Mansour. On the role of tachoclines in solar and stellar dybamos. *The Astrophysical Journal*, 819:104, 2016.
67. M. Schussler, A. Vogel. Magnetoconvection in a sunspot umbra. *The Astrophysical Journal*, 641:L73–L76, 2006.
68. J. N. Bahcall, M. H. Pinsonneault. Standard solar models, with and without helium diffusion, and the solar neutrino problem. *Rev. Mod. Phys.* 64, 885 (1992).
69. J. E. Bailey, G. A. Rochau, R. C. Mancini, C. A. Iglesias, J. J. MacFarlane, I. E. Golovkin, C. Blancard, Ph. Cosse, G. Faussurier. Experimental investigation of opacity models for stellar interior, inertial fusion, and high energy density plasmas. *Phys. Plasmas* 16, 058101 (2009).
70. S. Chandrasekhar, On the inhibition of convection by a magnetic field. *Phil. Mag.* 43, 501–532 (1952).
71. T.G. Cowling. Stellar structure – stars and stellar systems. *Comp. Astron. Astrophys.* 8, 425–463 (1965).
72. G. Valyavin, D. Shulyak, G. A. Wade, K. Antonyuk, S. V. Zharikov, G. A. Galazutdinov, S. Plachinda, S. Bagnulo, L. Fox Machado, M. Alvarez, D. M. Clark, J. M. Lopez, D. Hiriart, Inwoo Han, Young-Beom Jeon, C. Zurita, R. Mujica, T. Burlakova, T. Szeifert, Burenkov. Suppression of cooling by strong magnetic fields in white dwarf stars. *Nature* 515 (2014) 88.
73. P.-E. Tremblay, G. Fontaine, B. Freytag, O. Steiner, H.-G. Ludwig, M. Steffen, S. Wedemeyer, and P.Brassard, On the evolution of magnetic whire dwarfs. *The Astrophysical Journal*, 809:108, 2015.
74. M.S. Miesch. The solar dynamo. *Phil. Trans. R. Soc. A* (2012) 370, 3049–3069.
75. B.B. Karak and A. Brandenburg. Is the small-scale magnetic field correlated with the dynamo cycle? *The Astrophysical Journal*, 816:28, 2016.
76. E.N. Parker. Theoretical proporties of W-loops in the convective zone of the Sun. I. Emerging bipolar magnetic regions. *The Astrophysical Journal*, 433:867, 1994.
77. H.C. Spruit, van Ballegooijen. Is there a weak mixed polarity background fields? Theoretical argument. *Solar Physics* 110 (1987) 115-128.
78. P.R. Wilson, N.R. Sheeley, N.B. Snodgrass. The reversal of the solar polar magnetic fields. *Sol. Phys.* 127, 1–9 (1990).
79. Parker Solar Magnetism: The State of Our Knowledge and Ignorance. *Space Science Reviews* 2009, 144, 15–24.
80. V. Gaizauskas, K.L. Harvey, J.W. Harvey, C. Zwaan. Large-scale patterns formed by solar active regions during the ascending phase of cycle 21. *Astrophys. J.* 265, 1056–1065 (1983).
81. Petrovay, K., van Driel-Gesztelyi, L., 1997, “Making Sense of Sunspot Decay. I. Parabolic Decay Law and Gnevyshev-Waldmeier Relation”, *Solar Phys.*, 176, 249–266.
82. R. Ishikawa, S. Tsuneta. Comparison of transient horizontal magnetic fields in a plage region and in the quiet Sun. *A&A* 495, 607–612 (2009).

References

1. V.D. Rusov, I.V. Sharph, M.V. Eingorn, V.P. Smolyar, M.E. Beglaryan. Thermomagnetic Ettingshausen-Nernst effect in tachocline and axion mechanism of Sun luminosity: arXiv:1508.03836.
2. M. Giannotti, I. J. Redondo, A. Ringwald. Cool WISPs for stellar cooling excesses. JCAP 05 (2016) 057.
3. D. H. Hathaway, The Solar Cycle. Living Rev. Solar Phys., 12, (2015), 4.
4. L. Biermann, Der gegenwärtige Stand der Theorie konvektiver Sonnenmodelle. Vierteljahres-schrift Astron. Gesells. 76, 194–200 (1941).
5. T.G. Cowling, 1953, in The Solar System, Vol 1: The Sun, ed. G. P. Kuiper (Chicago: University of Chicago Press), 532.
6. E.N. Parker, The formation of sunspots from the solar toroidal field. ApJ 121, 491, 1955.
7. G.E. Hale, On the probable existence of a magnetic field in sunspots. Astrophys. J. 28, 315–8. 343 (1908).
8. J. Evershed, Radial movement in sun-spots, Mon. Not. R. Astron. Soc., 69, 454–457 (1909).
9. S.K. Solanki, 2003, Sunspots: An overview, Astron. Astrophys. Rev., 11, 153–286.
10. J.M. Borrero, K. Ichimoto, Magnetic Structure of Sunspots. Living Rev. Solar Phys., 8, (2011), 4.
11. S.K. Tiwari, M. van Noort, S.K. Solanki, A. Lagg, Depth-dependent global properties of a sunspot observed by Hinode using the Solar Optical Telescope/Spectropolarimeter. A&A 583, A119 (2015).
12. S.E. Pozuelo, L. R. Bellot Rubio, J. de la Cruz Rodriguez, Lateral downflows in sunspot penumbral filaments and their temporal evolution. The Astrophysical Journal, 803:93, 2015
13. G. B. Scharmer, Response to “Stray-light correction in 2D spectroscopy” by R. Schlichenmaier and M. Franz (Research Note). A&A 561, A31 (2014).
14. D. A. N. Müller, R. Schlichenmaier, G. Fritz, C. Beck. The multi-component field topology of sunspot penumbrae: A diagnostic tool for spectropolarimetric measurements. A&A 460, 925–933 (2006).
15. T. Heinemann, A. Nordlund, G. B. Scharmer, H. C. Spruit. MHD simulations of penumbra fine structure. The Astrophysical Journal , 669:1390Y1394, 2007.
16. G. B. Scharmer, A. Nordlund, T. Heinemann. Convection and the origin of Evershed flows in sunspot penumbrae. The Astrophysical Journal, 677: L149–L152, 2008.
17. M. Rempel, M. Schüssler, R. H. Cameron, M. Knölker. Penumbral Structure and Outflows in Simulated Sunspots. Science 325 (2009) 171-174.
18. M. Rempel, M. Schüssler, M. Knölker. Radiative magnetohydrodynamic simulation of sunspot structure. The Astrophysical Journal , 691:640–649, 2009.
19. I. N. Kitiashvili, A. G. Kosovichev, A. A. Wray, N. N. Mansour. Traveling waves of magnetoconvection and the origin of the Evershed effect in sunspots. The Astrophysical Journal, 700:L178–L181, 2009.
20. M. Rempel. Penumbral fine structure and driving mechanisms of large-scale flow in simulated sunspots. The Astrophysical Journal , 729:5, 2011.
21. M. Rempel. Numerical sunspot models: robustness of photospheric velocity and magnetic field structure. The Astrophysical Journal, 750:62, 2012.
22. M. Rempel. Numerical simulations of sunspot decay: on the penumbra – Evershed flow – moat flow connection. The Astrophysical Journal, 814:125, 2015.

23. J. M. Borrero, S. Jafarzadeh, M. Schüssler, S. K. Solanki. Solar magnetoconvection and small-scale dynamo. Recent developments in observation and simulation. *Space Science Reviews*, 1–42 (2015).

24. M. Schüssler, A. Vögler. Strong horizontal photospheric magnetic field in a surface dynamo simulation. *A&A* 481, L5–L8 (2008).

25. M. Rempel. Numerical of quiet Sun magnetism: on the contribution from a small-scale dynamo. *The Astrophysical Journal*, 789:132, 2014.

26. O. Steiner, R. Rezaei, W. Schaffenberger, S. Wedemeyer-Böhm, The Horizontal Internetwork Magnetic Field: Numerical Simulations in Comparison to Observations with Hinode. *Astrophys. J.* 680, 85–88 (2008). doi:10.1086/589740.

27. O. Steiner, R. Rezaei, Recent Advances in the Exploration of the Small-scale Structure of the Quiet Solar Atmosphere: Vortex Flows, the Horizontal Magnetic Field, and the Stokes- V Line-ratio Method, in Fifth Hinode Science Meeting, ed. by L. Golub, I. De Moortel, T. Shimizu Astronomical Society of the Pacific Conference Series, vol. 456, 2012, p. 3.

28. A. Vögler and M. Schüssler. A solar surface dynamo. *A&A* 465, L43–L46 (2007).

29. J.P. Graham, R. Cameron, M. Schüssler. Turbulent small-scale dynamo in solar surface simulations. *The Astrophysical Journal* , 714:1606–1616, 2010.

30. R. Moll, R. H. Cameron, M. Schüssler. Vortices in simulations of solar surface convection. *A&A* 533, A126 (2011).

24. M. Schüssler, A. Vögler. Strong horizontal photospheric magnetic field in a surface dynamo simulation. *A&A* 481, L5–L8 (2008).

31. J.P. Graham , S. Danilovic, M. Schüssler. Turbulent magnetic field in the quiet Sun: implications of *Hinode* observations and small-scale dynamo simulations. *The Astrophysical Journal* , 693:1728–1735, 2009.

32. S. Danilovic, B. Beeck, A. Pietarila, M. Schüssler , S. K. Solanki, V. Martínez Pillet, J. A. Bonet, J. C. del Toro Iniesta, V. Domingo, P. Barthol, T. Berkefeld, A. Gandorfer, M. Knölker , W. Schmidt, and A. M. Title. Transverse component of the magnetic field in the solar photosphere observed by Sunrise. *The Astrophysical Journal Letters* , 723:L149–L153, 2010.

33. S. Danilovic, M. Schüssler, S. K. Solanki. Probing quiet Sun magnetism using MURaM simulations and Hinode/SP results: support for a local dynamo. *A&A* 513, A1 (2010).

34. Brandenburg, A., Sokoloff, D., Subramanian K. Current Status of Turbulent Dynamo Theory. From Large-Scale to Small-Scale Dynamos. *Space Sci. Rev.* (2012) 169:123–157.

35. M. Miesch, W. Matthaeus, A. Brandenburg, A. Petrosyan, A. Pouquet, C. Cambon, F. Jenko, D. Uzdensky, J. Stone, S. Tobias, Ju. Toomre, M. Velli. Large-Eddy Simulations of Magnetohydrodynamic Turbulence in Heliophysics and Astrophysics. *Space Sci. Rev.* (2015) 178:163–200.

36. E. N. Parker. Hydromagnetic dynamo models. *ApJ* 122 (1955) 293.

37. A.R. Choudhuri, M. Schüssler, M. Dikpati. The solar dynamo with meridional circulation. *Astron. Astrophys.* 303, L29–L32 (1995).

38. M. Dikpati, P. Charbonneau. A Babcock-Leighton flux transport dynamo with solar-like differential rotation. *ApJ* 518:508–520, 1999.

39. H. Hota and T. Yokoyama. Importance of surface turbulent diffusivity in the solar flux-transport dynamo. *The Astrophysical Journal* , 709:1009–1017, 2010.

40. H. Hota and T. Yokoyama. Solar parity issue with flux-transport dynamo. *The Astrophysical Journal Letters* , 714:L308–L312, 2010.

41. H. Hotta, M. Rempel, T. Yokoyama. Large-scale magnetic fields at high Reynolds numbers in magnetohydrodynamic simulations. *Science* 351 (2016) 1427
42. A. Brandenburg. Nonlinear small-scale dynamo at low magnetic Prandtl number. *The Astrophysical Journal*, 741:92 (6pp), 2011.
43. P. Charbonneau. Dynamo Models of the Solar Cycle. *Living Rev. Solar Phys.*, 7, (2010), 3
44. P. Charbonneau. Solar Dynamo Theory. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 2014. 52:251–90.
45. Cattaneo, F., 1999, On the origin of magnetic fields in the quiet photosphere, *Astrophys. J. Lett.*, 515, L39–L42.
46. C.L. Jin, Wang, J. X., Song, Q. & Zhao, H., The Sun's small-scale magnetic elements in solar cycle 23. *The Astrophysical Journal*, 731:37, 2011.
47. C. Jin, J. Wang, Solar cycle variation of the inter-network magnetic field. *The Astrophysical Journal*, 806:174, 2015.
48. C. Jin, J. Wang, Does the variation of solar inter-network horizontal field follow sunspot cycle? *The Astrophysical Journal*, 807:70, 2015.
49. G. Guerrero, P. J. Käpylä. Dynamo action and magnetic buoyancy in convection simulations with vertical shear. *A&A* 533, A40 (2011).
50. N. J. Nelson, B.P. Brown, A.S. Brun, M.S. Miesch, Ju. Toomre. Magnetic wreaths and cycles in convective dynamos. *The Astrophysical Journal*, 762:73, 2013
51. P.J. Käpylä, M.J. Mantere, E. Cole, J. Warnecke, A. Brandenburg. Effects of enhanced stratification on equatorward dynamo wave propagation. *The Astrophysical Journal*, 778:41, 2013.
52. R.F. Stein. Solar Surface Magneto-Convection. *Living Reviews in Solar Physics* 9(4) (2012)
53. S.M. Hanasoge, T.L. Duvall, M.L. DeRosa. Seismic constraints on interior solar convection. *Astrophys J Lett* 712:L98–L102, 2010.
54. S.M. Hanasoge, T. L. Duvall, Jr. Katepalli R. Sreenivasan. Anomalously weak solar convection. *PNAS* 109 (2012) 11928–11932.
55. S.M. Hanasoge, M. S. Miesch, M. Roth, J. Schou, M. Schüssler, M. J. Thompson. *Solar Dynamics, Rotation, Convection and Overshoot. Space Sci. Rev.* (2015).
56. L. Gizon, A.C. Birch, Helioseismology challenges models of solar convection. *PNAS* 109, 11896–11897 (2012).
57. Birch, A. C., Braun, D. C., Leka, K. D., Barnes, G., Javornik, B. Helioseismology of Pre-emerging Active Regions. II. Average Emergence Properties. *The Astrophysical Journal*, 762(2): 131, 2013.
58. A.C. Birch, H. Schunker, D.C. Braun, R. Cameron, L. Gizon, B. Löptien, M. Rempel. A low upper limit on the subsurface rise speed of solar active regions. *Science Advances* 2016; 2:e1600557.
59. E.A. Spiegel, N.O. Weiss. Magnetic activity and variations in solar luminosity. *Nature* 287, 616–617, 1980.
60. R. Rosner. 1980 in: *Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun*, ed. A. K. Dupree (SAO SR-389) (Cambridge: SAO), 79.
61. G.A. Glatzmaier. Numerical simulations of stellar convective dynamos. II. Field propagation in the convective zona. *ApJ*, 291, 300, 1985.
62. N. O. Weiss. 1994, in *Lectures on Solar and Planetary Dynamos*, ed. M. R. E. Proctor & A. D. Gilbert (Cambridge: Cambridge Univ. Press), 59.
63. J. Schow et al. Helioseismic studies of differential rotation in the solar envelope by the solar oscillations investigation using the Michelson Doppler Imager. *The Astrophysical Journal*, 505:390–417, 1983.

64. T. V. Zaqarashvili, M. Carbonell, R. Oliver, J.L. Ballester. Magnetic Rossby waves in the solar tachocline and Rieger-type periodicities. *The Astrophysical Journal* , 709:749–758, 2010.
65. T.V. Zaqarashvili, R. Oliver, A. Hanslmeier, M. Carbonell, J. L. Ballester, T. Gachechiladze, I.G. Usoskin. Long-term variation in the Sun's activity caused by magnetic Rossby waves in the tachocline. *The Astrophysical Journal Letters*, 805:L14, 2015.
66. G. Guerrero, P. K. Smolarkiewicz, E. M. de Gouveia Dal Pino, A. G. Kosovichev, N. N. Mansour. On the role of tachoclines in solar and stellar dybamos. *The Astrophysical Journal*, 819:104, 2016.
67. M. Schussler, A. Vogel. Magnetoconvection in a sunspot umbra. *The Astrophysical Journal*, 641:L73–L76, 2006.
68. J. N. Bahcall, M. H. Pinsonneault. Standard solar models, with and without helium diffusion, and the solar neutrino problem. *Rev. Mod. Phys.* 64, 885 (1992).
69. J. E. Bailey, G. A. Rochau, R. C. Mancini, C. A. Iglesias, J. J. MacFarlane, I. E. Golovkin, C. Blancard, Ph. Cosse, G. Faussurier. Experimental investigation of opacity models for stellar interior, inertial fusion, and high energy density plasmas. *Phys. Plasmas* 16, 058101 (2009).
70. S. Chandrasekhar, On the inhibition of convection by a magnetic field. *Phil. Mag.* 43, 501–532 (1952).
71. T.G. Cowling. Stellar structure – stars and stellar systems. *Comp. Astron. Astrophys.* 8, 425–463 (1965).
72. G. Valyavin, D. Shulyak, G. A. Wade, K. Antonyuk, S. V. Zharikov, G. A. Galazutdinov, S. Plachinda, S. Bagnulo, L. Fox Machado, M. Alvarez, D. M. Clark, J. M. Lopez, D. Hiriart, Inwoo Han, Young-Beom Jeon, C. Zurita, R. Mujica, T. Burlakova, T. Szeifert, Burenkov. Suppression of cooling by strong magnetic fields in white dwarf stars. *Nature* 515 (2014) 88.
73. P.-E. Tremblay, G. Fontaine, B. Freytag, O. Steiner, H.-G. Ludwig, M. Steffen, S. Wedemeyer, and P.Brassard, On the evolution of magnetic whire dwarfs. *The Astrophysical Journal*, 809:108, 2015.
74. M.S. Miesch. The solar dynamo. *Phil. Trans. R. Soc. A* (2012) 370, 3049–3069.
75. B.B. Karak and A. Brandenburg. Is the small-scale magnetic field correlated with the dynamo cycle? *The Astrophysical Journal*, 816:28, 2016.
76. E.N. Parker. Theoretical proporties of W-loops in the convective zone of the Sun. I. Emerging bipolar magnetic regions. *The Astrophysical Journal*, 433:867, 1994.
77. H.C. Spruit, van Ballegooijen. Is there a weak mixed polarity background fields? Theoretical argument. *Solar Physics* 110 (1987) 115-128.
78. P.R. Wilson, N.R. Sheeley, N.B. Snodgrass. The reversal of the solar polar magnetic fields. *Sol. Phys.* 127, 1–9 (1990).
79. Parker Solar Magnetism: The State of Our Knowledge and Ignorance. *Space Science Reviews* 2009, 144, 15–24.
80. V. Gaizauskas, K.L. Harvey, J.W. Harvey, C. Zwaan. Large-scale patterns formed by solar active regions during the ascending phase of cycle 21. *Astrophys. J.* 265, 1056–1065 (1983).
81. Petrovay, K., van Driel-Gesztelyi, L., 1997, “Making Sense of Sunspot Decay. I. Parabolic Decay Law and Gnevyshev-Waldmeier Relation”, *Solar Phys.*, 176, 249–266.
82. R. Ishikawa, S. Tsuneta. Comparison of transient horizontal magnetic fields in a plage region and in the quiet Sun. *A&A* 495, 607–612 (2009).