

Авторы: Е.В. Юшков, А.С. Лукин

Название: Серия работ. Самогенерация мелкомасштабных магнитных полей в случайных средах.

Ссылки на конкурсные публикации:

Yushkov E., Lukin A., Sokoloff D. / Magnetic energy transient growth in the subcritical Kazantsev model // *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*. — 2018. — Vol. 97, no. 6. — P. 063108. DOI: 10.1103/PhysRevE.97.063108

Yushkov E., Lukin A. / Magnetic helicity generation in the frame of Kazantsev model // *Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics*. — 2017. — Vol. 111, no. 6. — P. 12–21. DOI: 10.1080/03091929.2016.1277525

Yushkov E.V., Lukin A.S. / An asymptotic analysis of a small-scale dynamo in a mirror-asymmetric random velocity field // *Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics*. — 2016. — Vol. 111, no. 2. — P. 138–148. DOI: 10.1080/03091929.2017.1388376

Связанные публикации авторов по теме:

Yushkov E.V., Lukin A.S., Sokoloff D.D. / Small-scale magnetic helicity and nonlinear stabilization of the dynamo // *Geomagnetism and Aeronomy*. — 2017. — Vol. 57, no. 7. — P. 844–848.

Yushkov E.V. / Asymptotic analysis of a kinematic dynamo in a mirror-symmetric magnetic field // *Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics*. — 2015. — Vol. 109, no. 4. — P. 450–461.

Yushkov E.V. / α 2-dynamo in a spatially homogeneous media // *Magnetohydrodynamics*. — 2014. — Vol.50, no.4. — P. 373–380.

Аннотация.

Теория самогенерации магнитных полей, определяющая процесс перекачки кинетической энергии случайных потоков в энергию магнитного поля, приобрела большую популярность с середины прошлого века. Традиционно она разделилась на два направления: первое, получившее название динамо среднего поля, занималось магнитными полями, формирующимися на масштабах, сравнимых с масштабами систем, – полями звезд, планет и галактик; второе – турбулентное динамо – работало с полями, характерный масштаб которых сравним с характерными размерами турбулентных вихрей случайной среды. В силу того, что первый подход изучал крупномасштабные явления, он допускал значительное упрощение, что привело к важным результатам, например, динамо Паркера, альфа-омега динамо или динамо Земли со случайными инверсиями. Второй подход оказался гораздо более сложен для аналитического изучения, и кроме того проблематичен с точки зрения наблюдений и практически невозможен в условиях лабораторного исследования из-за труднодостижимого порога генерации для магнитного числа Рейнольдса Rm – даже по самым мягким оценкам для запуска самогенерации требуется значение Rm более 40. Поэтому долгое время данный подход находился на периферии исследования и рассматривался как незначительный. С другой стороны, в последние годы ряд причин привел к увеличению интереса именно к мелкомасштабному механизму: во-первых, стали доступны прямые численные эксперименты по моделированию турбулентных плазменных сред, а во-вторых, в лабораториях удалось вплотную подобраться к предпороговому режиму мелкомасштабного динамо. В связи с подогретым интересом, мы обратили внимание на эту тему и постарались ответить на некоторые вопросы, интересные как с практической, так и с теоретической точки зрения для специалистов в области плазменной турбулентности.

Единственной на настоящее время аналитической моделью мелкомасштабного динамо является модель Казанцева, основная идея которой заключается в рассмотрении поля скорости для случайного течения несжимаемой проводящей среды специального вида. В первом приближении, эта модель

рассматривает изотропную зеркально-симметричную дельта-коррелированную по времени турбулентность, а дальнейшие трансформации модели позволяют изучать как среды без зеркальной-симметрии, так и не дельта-коррелированные и не изотропные течения. В 80-ых годах прошлого века было показано, что режим мелкомасштабной самогенерации имеет пороговый характер, так что плотность магнитной энергии начинает расти экспоненциально по времени только при больших значениях чисел Рейнольдса, но так быстро, что скорость роста оказывается много больше характерных скоростей генерации среднего поля. Сразу возникает множество вопросов, с тех пор так и оставшихся открытыми: например, происходит ли генерация не в зеркально-симметричной, а в асимметричной среде при наличии ненулевой потоковой спиральности? Увеличивается или уменьшается при этом порог генерации и можно ли его зафиксировать в эксперименте? Генерируется ли при этом магнитная спиральность, если в начальный момент она была нулевая? Переносится ли эта спиральность по спектру с диссипативных на большие масштабы, где она, как известно, играет роль интеграла сохранения и обеспечивает подавление крупномасштабных процессов? Что происходит при докритическом режиме, можно ли зафиксировать эффект Зельдовича докритического роста поля? Описывает ли мелкомасштабная модель, как более общая и крупномасштабные характеристики? Генерируется ли она в согласии с результатами численных экспериментов и важно ли ее влияние на крупномасштабный процесс? Чтобы ответить на эти вопросы мы, используя численный и асимптотический анализ системы Казанцева и системы Вайнштайна-Кичатинова, исследуем свойства корреляционного тензора магнитного поля в g - и k -пространствах, анализируем зависимость скорости генерации от R_m , и динамическое поведение плотности магнитной энергии в докритических режимах.

В начальных работах совместный численно-аналитический анализ уравнения Казанцева позволил показать, что при достаточно больших значениях магнитного числа Рейнольдса (для зеркально симметричного случая была получена оценка на пороговое значение $R_m=53$) магнитное поле растет в областях со средним корреляционным масштабом много меньшим, чем средний корреляционный масштаб для поля скорости [2015GAFD_Yushkov]. При этом были получены зависимости характерного масштаба корреляций магнитного поля и скорости от R_m , которые можно трактовать таким образом, что поля нарастают в тем более узких жгутках и с тем большей экспоненциальной скоростью, чем больше значение R_m . В случае зеркальной асимметрии потока проводящей среды, было показано, что наравне с энергией поля начинает расти магнитная спиральность, скорость генерации вырастает, а порог генерации снижается с ростом асимметрии [2016GAFD_Yushkov], что облегчает возможность фиксации данного процесса в лабораторном эксперименте. Аналитически и численно удалось подтвердить, что при добавлении асимметрии наравне с мелкомасштабным начинает генерироваться магнитное поле и на больших масштабах. При этом многие свойства, такие как характерные области перемежаемости и характерные скорости соответствуют свойствам динамо среднего поля [2014MHD_Yushkov]. Важным является и то, что генерируемая магнитная спиральность не является при этом локализованной, достаточно большой ее вклад можно наблюдать на больших масштабах, что до настоящего времени никогда не учитывалось в моделях с нелинейным подавлением среднего поля, основанным на квазисохранении спиральности [2017GaA_Yushkov]. Не менее важным является тот факт, что мелкомасштабная характеристика не является знакопостоянной функцией от k , в отличие от энергии поля, и таким образом для мелкомасштабных процессов может работать механизм стабилизации, основанный на ее балансе и рассматриваемый ранее только в плане подавления среднего поля. При этом, мы показали, что не исключен перенос спиральности с малых масштабов на большие, требующий проверки и пересмотра вопросов нелинейной стабилизации. Интересно, что полученные спектральные характеристики дают спектр, отличный от спектра Колмогорова для развитой турбулентности, что, однако соответствует представлениям о модели Казанцева, полученным в сериях предыдущих работ. В последних работах по докритическим режимам численный анализ динамической задачи подтвердил возможности транзиентного, правда только при наличии дополнительных условий, таких, например, как поддержка мелкомасштабной генерации крупномасштабным внешним полем или наличие начального случайного распределение магнитного поля с характерным корреляционным масштабом большим, чем характерный масштаб поля скорости потока [2018GAFD_Yushkov]. Без сомнения, полученные результаты требуют проверки лабораторными и спутниковыми методами, а также сравнения с DNS-моделями, однако в случае их подтверждения они потребуют пересмотра важности мелкомасштабных процессов в механизме работы квазистационарных магнитных структур всех объектов от планет до звезд и галактик.