

УДК 537.84

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОЙ И ПЕРЕКРЕСТНОЙ СПИРАЛЬНОСТИ НА СВОБОДНОЕ ВЫРОЖДЕНИЕ МГД-ТУРБУЛЕНТНОСТИ

© 2011 г.

Р.А. Степанов

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

rodion@icmm.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Изучается долговременное свободное вырождение магнитогидродинамической (МГД) турбулентности при больших числах Рейнольдса с использованием каскадных моделей. Статистические свойства численных решений получены на основе моделирования 128 реализаций процесса вырождения продолжительностью, превышающей время оборота крупномасштабного вихря на 5 порядков. Результаты расчетов демонстрируют возможность реализации двух сценариев эволюции системы при слабой вариации начального состояния. Ранее известный первый сценарий, характерный для большинства реализаций, соответствует быстрому накоплению перекрестной спиральности, что приводит к состоянию полной коррелированности магнитного поля и поля скорости. Следуя второму, более редкому, сценарию вырождения, система остается при слабом уровне перекрестной спиральности и достигает существенно более низкого значения кинетической энергии. Впервые удалось установить, что второй сценарий вырождения обусловлен влиянием магнитной спиральности, которая блокирует часть магнитной энергии в крупномасштабной части спектра.

Ключевые слова: магнитная гидродинамика, теория турбулентности, свободное вырождение, каскадные модели, законы сохранения.

Введение

Свободное вырождение МГД-турбулентности представляет интерес по двум основным причинам. Во-первых, оно имеет отношение к физике межзвездного пространства и космологии в контексте проблем эволюции начального магнитного поля и его вклада в наблюдаемые магнитные поля во Вселенной. Во-вторых, МГД-турбулентность отличается от обычной турбулентности своими законами сохранения, что может приводить к принципиально иному характеру эволюции турбулентности в электропроводящей среде. В пределе идеальной МГД-системы имеется три закона: сохранения полной энергии $E = E^u + E^b$, перекрестной спиральности $H^c = \iiint \mathbf{v} \cdot \mathbf{b}$ и магнитной спиральности $H^b = \iiint \mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$, где \mathbf{v} – поле скорости, \mathbf{b} – магнитное поле, \mathbf{a} – векторный потенциал ($\text{rot } \mathbf{a} = \mathbf{b}$).

Первая попытка моделирования поведения МГД-турбулентности на поздних стадиях вырождения с помощью каскадных моделей была предпринята в работе [1], где и было показано, что, несмотря на общую тенденцию к росту со временем степени корреляции поля скорости и магнитного поля, существуют отдельные реализации с сильно отличающейся скоростью диссипации энергии пульсаций. В настоящей работе пробле-

ма исследуется с упором на выявление роли спиральностей в формировании конкретного сценария эволюции системы.

Результаты численного моделирования

Эффективным инструментом исследования статистических свойств развитой мелкомасштабной турбулентности зарекомендовали себя каскадные модели (см., например, [2]), описывающие процессы спектрального переноса в развитой турбулентности с помощью небольшого числа переменных, каждая из которых является коллективной характеристикой амплитуд пульсаций поля скорости и магнитного поля в некотором интервале волновых чисел. Уравнения для коллективных переменных записываются так, чтобы они воспроизводили «базовые» свойства исходных уравнений движения, а именно имели те же интегралы движения и тот же вид нелинейности. В настоящем исследовании использовалась каскадная модель, предложенная в [3], отличающаяся более адекватным способом описания магнитной спиральности.

Уравнения каскадной модели численно интегрировались при гидродинамическом и магнитном числах Рейнольдса, равных 105. В начальный момент времени энергия была сконцентрирована

на самом крупном масштабе, а затем, в процессе каскада по спектру, достигала диссипативного масштаба. Во всех реализациях начальные состояния отличались на некоторую случайную величину, так что $E^u \approx E^b \approx 1$, $|H^c| \leq 10^{-4}$, $|H^b| \leq 10^{-4}$.

Эволюция системы отслеживалась по изменению полной энергии и нормированной перекрестной спиральности $C = H^c/E$, которые показаны соответственно на рис. 1а, б. Выделяются реализации, где C не достигает предельных значений.

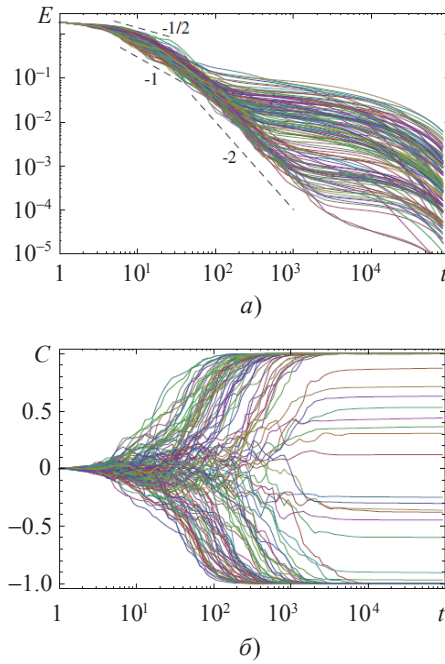


Рис. 1

Распределение состояний по значениям нормированной перекрестной C и магнитной спиральности $C^b = H^b/E^b$, а также по уровням магнитной и кинетической энергии показано на рис. 2. Выясняется, что второе предельное состояние характеризуется максимальным уровнем магнитной спиральности. На рисунках обозначено: крестики – $t = 100$, кружочки – $t = 1000$, точки – $t = 10^4$. Также следует отметить, что кинетическая энергия по-прежнему способна переноситься по спектру и диссипировать.

Можно выделить два сценария свободного вырождения МГД-турбулентности: в первом слу-

чае система стремится к предельному значению нормированной перекрестной спиральности $C = \pm 1$, а во втором – к предельному значению нормированной магнитной спиральности $C^b = \pm 1$. При этом наступление первого сценария даже при начально нулевой перекрестной спиральности наиболее вероятно за счет ее генерации вблизи диссипативного масштаба и последующего обратного каскада. Реализация второго сценария связана с законом сохранения магнитной спиральности, которой не свойственен прямой каскад. Магнитная спиральность, которая имеется изначально или возникает за счет диссипации, приводит к задержке части магнитной энергии.

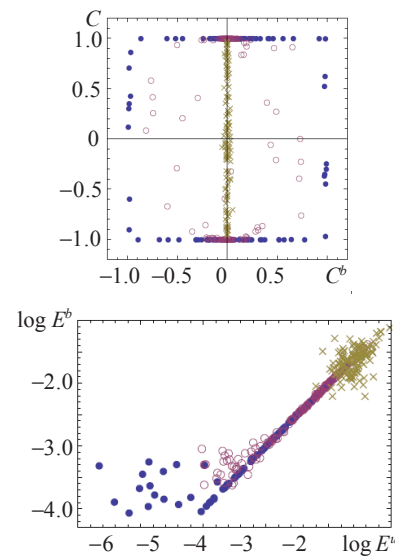


Рис. 2

В настоящем исследовании также принимал участие П.Г. Фрик.

Список литературы

1. Антонов Т.Ю., Фрик П.Г., Соколов Д.Д. // Вычислительные методы и программирование. 2000. Т. 1, №1. С. 14–18.
2. Фрик П.Г. Турбулентность: подходы и модели. М.-Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2010. 332 с.
3. Мизева И.А., Степанов Р.А., Фрик П.Г. // Докл. РАН. 2009. Т. 424, №4. С. 479–483.

THE EFFECT OF MAGNETIC AND CROSS HELICITIES ON THE FREE DECAYING MHD TURBULENCE

R.A. Stepanov

Free decay of MHD turbulence for large Reynolds numbers is studied numerically using a shell model. The statistical properties are studied based on a representative sample of realizations (128 realizations for each type of initial conditions) over the period of 5 times the order of magnitude of large-scale turbulence turnover times. The performed simulations show that the free-decaying non-helical MHD turbulence can demonstrate two different scenarios of evolution in spite of similar initial conditions. According to the first scenario, the cross-helicity accumulation is so fast that the energy cascade vanishes before

any significant magnetic energy dissipates. Then the system approaches the state of maximal cross-helicity. In the second scenario, the cascade process remains active until the time 10000 in the units of the large-scale turnover time. Then the magnetic field becomes vastly helical due to magnetic helicity conservation. Thus, the magnetic energy does not dissipate with kinetic energy.

Keywords: magnetohydrodynamics, theory of turbulence, free decay, shell models, conservation laws.