Описание турбулентности плазмы: критические вопросы анализа экспериментов

В.П. Будаев

НИЦ Курчатовский институт, Москва, Россия

Многочисленные экспериментальные наблюдения свидетельствуют о сильной (развитой) турбулентности плазмы в центральных и периферийных областях токамаков и других термо-ядерных установках, а также в космической плазме, включая магнитосферу Земли и межпла-нетную плазму [1, 2]. Развитая турбулентность характеризуется большим числом степеней свободы и нелинейно взаимодействующих мод, многомасштабной структурой и случайными пульсациями скоростей и полей. Поэтому для ее описания наиболее подходят методы статис-тической физики и теории вероятностей: необходимо определить или измерить в экспери-менте функцию распределения или, что эквивалентно, все моменты функции распределения (структурные функции) и затем сравнить с теоретическими предсказаниями. Фундамент статистического исследования турбулентности на основе рассмотрения турбулентного каскада был заложен А.Н.Колмогоровым (модель К41), что позволило развить другие полуэмпирические каскадные модели, которые с успехом используются для описания гидродинамической турбулентности и турбулентности плазмы [1, 2]. Для изотропной турбулентности теория предполагает гауссовскую статистику пульсаций скоростей. Вблизи границ плазмы в термоядерных установках и турбулентных погранслоях магнитосферы Земли наблюдается перемежаемый характер флуктуаций - свойство статистической неоднородности турбулентности. Из самых общих теоретических представлений динамика такого процесса может описываться степенными законами, многомасштабной инвариантностью — специальными симметриями масштабной инвариантности статистически неоднородного турбулентного процесса. Дальние корреляции, формируемые свойством многомасштабной инвариантности и негауссовой статистикой, вызывают повышенный турбулентный перенос – аномальную диффузию. Для детального описания сильной турбулентности при анализе экспериментальных данных (обычно - это турбулентные временные сигналы) вычисляются характеристики степенных законов моментов функции распределения. Такая процедура направлена на описание наиболее важных свойств турбулентности плазмы — масштабной инвариантности (симметрии относительно масштабных пространственно-временных преобразований) и связанных с ней свойств турбулентного каскада.

В такой постановке проблемы возникает критика доминирующего во многих экспериментальных работах использования для анализа сигналов турбулентности плазмы только методов фурье-анализа: в таких работах получают фурье-спектр и сопутствующие характеристики (когерентность, линейные корреляции, спектрограммы). Дальнейшая трактовка спектров зачастую направлена на необоснованное выделение узкого диапазона частот с целью упрощенного (или неверного) рассмотрения турбулентного процесса. Как известно, фурье-анализ направлен на выявление трансляционной (сдвиговой) симметрии в сигнале, то есть наличие гармонических волн. Предположение о наличии у сильной турбулентности плазмы только трансляционной симметрии необоснованно, это не доказано ни теоретически, ни экспериментально, и дальнейшие трактовки фурье-спектра без дополнительных исследований свойств турбулентного каскада малоинформативны.

В докладе приводятся данные о наблюдениях свойств масштабной инвариантности и турбулентного каскада сильной турбулентности плазмы в токамаках, магнитосфере Земли и солнечном ветре [1, 2].

Литература

1. Будаев В.П., Савин С.П., Зеленый Л.М. УФН. 2011. Т. 181, №9, с. 905-952.
2. Budaev V.P., Zelenyi L.M., Savin S.P. J. Plasma Phys. 2015, vol. 81, 395810602