

БИБЛИОГРАФИЯ

Хаотическая динамика и перенос в жидкости и плазме

PACS numbers: 01.30.Tt, 47.20.T, 51.10, 52.25.Fi

Chaotic Dynamics and Transport in Fluids and Plasmas (Ed. Prigogine I.) (New York: American Institute of Physics, 1993).

Целью конференции, материалы которой представлены в этой книге, можно было бы назвать восстановление связей между тремя отраслями современной физики: хаотической динамикой, гидродинамической турбулентностью и плазменной турбулентностью. Узкая специализация современных ученых, связанная со все возрастающей сложностью методов исследования, приводит к тому, что, хотя в развитии математического формализма нелинейной динамики были достигнуты существенные успехи, тем не менее, в теории развитой турбулентности, которая, собственно, породила нелинейную динамику, заметного прогресса в понимании фундаментальных проблем пока не произошло. Очевидно, что качественный сдвиг в понимании природы турбулентной динамики возможен только с появлением нового языка описания, т.е. с развитием непертурбативных методов описания хаоса. Главный редактор представляемой книги — лауреат Нобелевской премии Илья Пригожин — приложил немало усилий к тому, чтобы включить в парадигму современного научного сознания концепции, известные как "самоорганизация", или "возникновение порядка из хаоса". Воплощением этих идей стали его работы по термодинамике неравновесных систем, которые применимы даже к таким экзотическим проблемам, как возникновение заторов в уличном движении, устойчивость популяций насекомых, развитие упорядоченных биологических структур, в том числе раковых клеток. Материалы, представленные в сборнике, дают возможность во всей полноте почувствовать плодотворность синергетического подхода к рассмотрению хаотической динамики жидкости и плазмы. Далее приводится обзор идей и результатов, которые кажутся наиболее конструктивными для дальнейших исследований.

В работе Л.А. Бунимовича "Пространственно-временной хаос, когерентные структуры и узоры в распределенных системах" вниманию читателя предлагается новый математический объект — решетки связанных отображений (coupled map lattices — CML). Дело в том, что идея конечномерного странного аттрактора типа Лоренца, конструктивная для понимания динамики диссипативных систем, оказывается недостаточной для описания реальной полностью развитой турбулентности, которая требует пространственно-временного, а не только временного рассмотрения. CML — обобщение известной модели связанных осцилляторов

такое, что, во-первых, вместо осциллятора можно рассмотреть конечномерную динамическую систему любой природы, а во-вторых, каждая такая система имеет пространственную координату. Основываясь на CML, впервые удалось дать строгое определение появления когерентной структуры в хаотической среде как фазового перехода в модельной спиновой решетке. Хотя CML с успехом применяется в численном моделировании, необходимо строгое аналитическое рассмотрение хотя бы простейшей модели, чтобы выделить существенные свойства этого объекта и развить правильное интуитивное понимание пространственно-временной динамики распределенных систем.

Механизм возникновения пространственно-временного хаоса в ограниченной турбулентной среде предлагается в работе К.А. Горшкова и др. "Частицы — античастицы". Стохастическое взаимодействие локализованных состояний нелинейных полей". Для достаточно большой энергии возбуждения нелинейное поле в "большом резонаторе" можно представить в виде набора локализованных состояний типа квазичастиц, динамика которых становится хаотической подобно тому, как появляется детерминированный пространственно-временной хаос в бильярдах Синая. Такое описание проведено для поля, описываемого двумерным нелинейным уравнением в частных производных. Показано, что из-за крайней чувствительности угла рассеяния к прицельному параметру в таком "физическом" бильярде легко возникает стохастичность, причем как в координатном пространстве, так и в пространстве скоростей.

В работе А.Б. Речестера и Р.Б. Уайта "Статистическая механика с использованием символической динамики" на примере расчетов отображений Хенона и Чирикова–Тэйлора показано, что применение хаотической динамики существенно ускоряет процесс вычисления статистических характеристик хаотических систем, не нарушая при этом их динамических свойств.

Ряд статей посвящен удивительным свойствам квантового хаоса. Заглавие статьи Б.В. Чирикова "Линейный хаос" звучит парадоксально. Ведь в классической физике хаос возникает только в сильно нелинейных системах, когда, во-первых, траектории линеаризованной системы экспоненциально неустойчивы, а во-вторых, фазовое пространство системы ограничено. Оказывается, роль нелинейности ограничивается тем, что она обеспечивает замкнутость энергетической поверхности системы. В квантовом случае ограниченный во времени хаос возможен даже в системе волновых решений линейного уравнения Шрёдингера. Однако настоящий квантовый хаос наиболее ярко проявляется в процессе измерения, когда

происходит редукция волновой функции. Примечательно, что работа "Комплексное спектральное представление и квантовый хаос", в которой Т. Петровский и И. Пригожин предлагают альтернативную формулировку квантовой механики для неустойчивых систем с учетом необратимости (например, задача о трехчастичном рассеянии), приводит к решению важнейшего эпистемологического вопроса о дуализме квантовой механики. Бор подчеркивал невозможность описания измерительного прибора как квантового объекта в терминах уравнения Шрёдингера. Альтернативный же подход предлагает описание самой системы в терминах несводимой матрицы плотности, у которой существует классический аналог — несводимый оператор Лиувилля, т.е. появляется возможность единообразно описывать классическую и квантовую подсистемы в процессе измерения.

Вопрос о проявлениях хаоса в динамике квантовой системы, классический аналог которой ведет себя стохастически, обсуждается также в работе Р. Ронсальи и др. "Классический хаос: квантовая неопределенность и необратимость".

Конечно, особенный интерес вызывают процессы самоорганизации в природных системах. В работе Г. Холлоуэй "Океан как статистическая система: о циркуляции без предубеждения" приведен поразительный результат: хаотически распределенные вихри, нелинейно взаимодействующие над поверхностью с заданной топографией, эффективно генерируют крупномасштабное среднее течение. Хотя на первый взгляд этот факт кажется противоречащим второму началу термодинамики, оказывается, что именно такое течение соответствует максимуму энтропии при сохранении энергии и завихренности. Обсуждаются следствия этого эффекта при моделировании течения Гольфстрим, Арктического полярного течения и др.

В работе Ч. Менева "Физика фрактальности и скейлингов в гидродинамической турбулентности" обсуждаются проблемы самоподобия турбулентности применительно к процессу переноса энергии по спектру, а также с точки зрения динамики вихревой пелены. Предлагаются наглядные математические модели формирования вихревой пелены, т.е. способы получения сильно "измятой" фрактальной поверхности из первоначально гладкой. Пролить свет на физический механизм "измятия" поверхности может решение задачи о движении отдельных вихревых нитей, чему и посвящена работа Й. Ичикавы и др. "Солитоны на тонкой вихревой нити". Методом обратной задачи рассеяния найдено точное решение локального уравнения индукции для вихревой нити и показано, что на вихревой нити могут образовываться солитоны в виде петель подобно тому, как это происходит на обычной упругой веревке.

Строгое решение проблемы переноса пассивного скаляра в заданном поле скоростей обсуждается в работах П. Калугина и др. "Эффективная диффузия в

стационарном периодическом течении как мероморфная функция комплексного числа Пекле". Доказано, что на больших пространственно-временных масштабах процесс переноса описывается анизотропным коэффициентом диффузии, и найдена верхняя граница для эффективного коэффициента диффузии.

Роль вихревых структур в турбулентных переносах в плазме подчеркивается в работе В. Хортона и др. "Турбулентность на дрейфовых волнах и вихри в трехмерном магнитном поле с широм". Рассматривается неустойчивость на ионном градиенте температуры в замагниченной плазме (в геофизике ей соответствует бароклинная неустойчивость). Показано, что как в тороидальной геометрии, так и в плоской геометрии с широм на стадии нелинейного насыщения неустойчивости в плазме формируются вихревые структуры, движущиеся в несколько раз быстрее, чем линейные волны. Долгоживущие вихревые структуры нарушают быструю каскадную перекачку энергии по спектру и вместо колмогоровского спектра дают спектр, резко спадающий на малых длинах волн. Переносы при этом определяются пограничными слоями между вихрями и захватом тепла и частиц в вихри.

Попытка строгого решения задачи о диффузии частиц в стохастическом магнитном поле для простейшей модели столкновительного оператора и магнитных флуктуаций предпринята в работе Г. Лаваля "Переносы в плазме во флуктуирующем магнитном поле". Найденные выражения для коэффициента диффузии для всех столкновительных режимов воспроизводят ранее известные результаты и позволяют установить их область применимости.

В случайном магнитном поле существенно меняется и характер распространения волн. В работе Р. Судан "Распространение шировых альвеновских волн в стохастическом магнитном поле" показано, что из-за быстрой филаментации волнового фронта альвеновская волна быстро затухает.

Из неупомянутых работ, направленных на решение более конкретных проблем, несомненно, можно почерпнуть массу полезных ассоциаций, касающихся как численного моделирования, так и аналитического рассмотрения процессов перехода порядков — хаос. При отборе статей для публикации в сборнике предьявлялось два критерия: прикладной характер исследования и общезначимость результатов для смежных областей. Поэтому предлагаемое издание является, по существу, документом, констатирующим достижения последних исследований в области хаотической динамики. По прочтении сборника возникает ощущение, что хаос — только внешнее проявление скрытого порядка. В рамках языка науки "порядок" и "хаос" можно рассматривать, как дополнительные (по Бору) способы описания нашего самоорганизующегося мира.

М.В. Осипенко