

Спонтанная потеря симметрии как механизм самоорганизации

Дельфес^а 2005г.

С.В. Чудов
научный редактор журнала «Природа», Москва
serchudov@rambler.ru

Самоорганизация как в живой, так и в неживой природе встречается гораздо чаще, чем мы привыкли думать. Наиболее общим подходом к этому явлению служит подход теории устойчивости, включающий все прочие известные подходы как частные случаи. В самом деле, самопроизвольные процессы в физических системах почти всегда сопровождаются увеличением устойчивости системы – в силу того тривиального факта, что неустойчивые состояния быстро разрушаются, а устойчивые сохраняются сравнительно долго. Это фундаментальное свойство Вселенной – статистическое преобладание в ней устойчивости над неустойчивостью – привело в XIX веке к ложному выводу об абсолютном преобладании энтропийных процессов (то есть таких, при которых структуры разрушаются) над созидательными, при которых сложность и количество информации возрастают. Но последующее развитие нелинейной динамики показало, что в эволюции даже косных систем, не говоря уже о живых, разрушительные процессы вовсе не обязаны преобладать над созидательными.

Однако в повседневном мышлении образованных людей до сих пор сплошь и рядом встречается абсолютизация второго начала термодинамики, возведение его в ранг универсального закона природы, которым он отнюдь не является. Термодинамический подход применим лишь к ограниченному подмножеству физических систем, для которых выполнены его исходные допущения, а не к физическим системам как таковым.

В самом деле, повышение устойчивости системы может быть достигнуто либо за счёт её упрощения (выравнивания градиентов и разрушения структур), либо за счёт её усложнения, становления новых структур, обеспечивающих гомеостатические свойства протекающих в ней процессов. В этом случае мы и говорим о самоорганизации. Всем известный принцип Ле-Шателье гласит, что в устойчивой системе внутренние процессы идут таким образом, чтобы противодействовать внешним воздействиям на систему. Это, однако, тоже не универсальный физический принцип, а лишь критерий отличия устойчивых систем от неустойчивых. Но неустойчивых систем сравнительно мало, так как существуют они сравнительно недолго, оттого среди наблюдаемых систем, действительно, преобладают те, что подчиняются принципу Ле-Шателье. Уже из этого факта следует, что самоорганизация должна быть в природе не исключением, а правилом: именно она порождает большинство наблюдаемых нами систем.

Прирост структурной информации, служащий основным критерием и результатом самоорганизации, практически всегда сопровождается понижением порядка симметрии системы. В самом деле, симметрия в наиболее широком смысле означает как раз отсутствие каких-то выделен-

ных направлений и масштабов; появление же неких предпочтительных пространственно-временных осей или периодичностей – это и есть возникновение форм и структур. Каким же образом могут эти формы и структуры возникнуть?

Основная причина их возникновения – неустойчивость бесструктурного (наиболее симметричного) состояния. Состояние устойчиво, если малые случайные отклонения от него (неважно, спонтанные или вызванные внешними причинами) склонны затухать, диссипировать. Именно так и обстоит дело в изолированных от притока энергии извне газах и жидкостях, и именно этот случай рассматривает классическая равновесная термодинамика. Но как только эти два условия – равновесность и изолированность – нарушаются, флуктуации уже не угасают, а разрастаются. Примеры общеизвестны: перегретая жидкость, переохлаждённый газ, пересыщенный раствор (система вдали от равновесия); горизонтальный слой жидкости, нагреваемый снизу, в котором развивается конвективная неустойчивость в форме правильных шестиугольных ячеек (неизолированная, открытая система); и, наконец, самая удивительная неравновесная открытая система, прогрессивно усложняющаяся и постоянно порождающая новые формы, – жизнь.

Стоит заметить, что равновесные изолированные системы во Вселенной – как раз экзотика, идеализированный случай, удобный для анализа и потому заполняющий все учебники, а неравновесность и открытость встречаются повсеместно. Это и Вселенная в целом, порождённая Большим Взрывом и неустойчивая к гравитационному коллапсу, и те протогалактические и протозвёздные туманности, из которых образуются галактики и звёзды, и, наконец, наша планета Земля, все оболочки которой – литосфера, гидросфера и атмосфера – подвержены конвективной неустойчивости. В гидросфере последняя порождает морские течения, в атмосфере – ветры, погоду и все метеорологические явления, в литосфере – мантийную конвекцию, движение литосферных плит, горообразовательные процессы и, в конечном итоге, все известные нам формы рельефа поверхности суши и морского дна. Но ведь конвективная неустойчивость – это типичный пример спонтанной потери симметрии: разбиение горизонтального слоя жидкости, подогреваемого снизу, на конвективные ячейки происходит из-за разрастания случайных флуктуаций плотности и приводит к возникновению устойчивых самосогласованных схем циркуляции вещества, нарушающих первоначальную трансляционную симметрию.

Этого далеко не полного перечня достаточно, чтобы признать спонтанную потерю устойчивости одним из важнейших механизмов самоорганизации и формообразования. Но здесь возникают новые вопросы: при каких условиях эти вновь

возникающие формы с пониженным порядком симметрии сами являются устойчивыми? Это происходит, когда форма как таковая является определяющим параметром устойчивости, организующим потоки вещества, энергии и информации так, чтобы теперь уже отклонения от этой устойчивой формы «рассасывались», диссипировали, подобно тем флуктуациям от исходного бесформенного состояния, разрастание которых породило рассматриваемую форму. Здесь возникают новые условия устойчивости. Пригожинская теория диссипативных структур устанавливает критерий устойчивости этих структур: они должны минимизировать производство энтропии в системе.

Однако на практике этот критерий позволяет найти такую форму лишь в том случае, когда задача по существу одномерна или сводится к одномерной (то есть сама форма – функция одной переменной, а скорость производства энтропии – функционал от функции одной переменной). Для более сложных случаев вариационное исчисление не работает, и приходится вновь обращаться к более общему методу – анализу устойчивости форм, основанном на угадывании «естественных» мод потери устойчивости и применению теории устойчивости к каждой из них. Большинство задач этого класса относятся к некорректно

поставленным: без использования априорной информации о том, каковы эти моды потери устойчивости, они неразрешимы. Однако можно заметить, что соображения симметрии снова становятся центральными для успешного угадывания возможных форм потери устойчивости, и тем самым круг замыкается: прогрессивная эволюция предстаёт перед нами как циклический процесс нарастания неустойчивости симметричной формы, спонтанной потери её устойчивости и последующей стабилизации менее симметричных, то есть более сложных форм, с последующей их дестабилизацией и новой стабилизацией ещё более сложных форм.

Этот цикл позволяет представить прогрессивную эволюцию как фрактально организованную череду революций и стабилизаций разного масштаба, сопровождающуюся на каждом этапе приростом разнообразия и информации в системе, а в случае множественности и структурированности мод потери устойчивости на каждом этапе реорганизации – как ветвящийся случайный процесс, порождающий структурированное «дерево форм», наподобие филогенетическому дереву биологической эволюции. Дальнейшее оформление этого подхода – предмет отдельной, ещё не разработанной науки – морфодинамики – набросок основных идей которой и представлен в данном докладе.

Симметрия, энтропия, живая система

*Ю.Н.Королёв, доктор биологических наук;
О.В.Бурлакова, кандидат биологических наук;
А.Б.Бурлаков, доктор биологических наук;
В.А.Голиченков, доктор биологических наук;
МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва
burlakova@mail.ru
affen@mail.ru*

...Мёртвая материя ожила и мыслит. В моём сознании совершается таинство: материя изумлённо рассматривает самое себя в моём лице. В этом акте самосознания невозможно проследить границу между объектом и субъектом ни во времени, ни в пространстве. Мне думается, что поэтому невозможно дать раздельное понимание сущности вещей и сущности их познания. Фундаментальное решение должно быть единым и общим...

Р. Бартини

Развитие науки в XX веке породило определённые противоречия в понимании основополагающих, концептуальных понятий в естествознании.

Математическая статистика и квантовая механика допустили закономерность случая в науке. Многого, если не всё, в этом мире случайно, сам наш мир по своей сущности имеет вероятностный характер, где частицы обладают «тенденцией к существованию», а события – «тенденцию происходить».

Вероятность как характеристика нашего мира является причиной того, что, пожалуй, любое научное исследование даёт некоторое количество данных, не укладывающихся на теоретические

кривые – это есть характеристики нашего мира в данном месте и в данный момент времени, полученные данным наблюдателем.

Исследования распределения вероятностей явлений в самых разнообразных областях естествознания показали, что эти вероятности представляются, как правило, похожими кривыми. По-видимому, всё множество явлений нашего мира или наш мир в целом может быть описан такой волнообразной кривой. И нам кажется, что это носит мировоззренческий характер в большей степени, нежели предлагают теории жёсткого детерминизма.

Проблема, которую мы затронем в данном докладе, вписывается в проблему единого знания о мире. Жизнь не должна рассматриваться в отрыве от эволюции целостного космоса: «поскольку пространство и время как абсолютные факторы материального мира имели место во все времена преобразования Вселенной, то в масштабе нашей планеты они являлись изначальной структурой материального мира Земли и имели свои абсолютные свойства задолго до появления и развития живой материи. Отсюда с неизбежностью следует, что уже первые формы