

Иск. чучел "Хелюис" Нисе и Иодна Оуруисего 2006г. 2 часа

Морфодинамика – новая парадигма синергетики

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

Что такое синергетика? В настоящее время трудно однозначно ответить на этот вопрос – в ходу есть множество определений, причём очень разных по смыслу: одни авторы определяют это направление исследований через математический аппарат (нелинейная динамика, фракталы, теория катастроф, детерминированный хаос), другие – через физику процессов (неравновесная термодинамика, теория диссипативных систем), третьи просто перечисляют области знания, в которых чаще всего применяются синергетические подходы или считают синергетикой общую теорию самоорганизации сложных систем независимо от природы этих систем и способа возникновения упорядоченности. Такая неопределённость и расплывчатость терминологии подрывает репутацию этой дисциплины, вызывает у многих серьёзных учёных-физиков скептическое отношение к синергетическому подходу как модной, но, в сущности, бесплодной болтовне. Вот цитаты из одной современной работы (источник неважен, это расхожая точка зрения, и аналогичных цитат можно найти сотни).

«Синергетика представляет собой современную теорию эволюции больших, сверхсложных, открытых, термодинамически неравновесных, нелинейных динамических систем, обладающих обратной связью и существующих квазистационарно лишь в условиях постоянного обмена веществом, энергией и информацией с внешней средой. К таким системам относятся: Вселенная, саморазвивающаяся природа, человеческое общество как её (жизни) высшая форма и продукт создаваемой им самим (человечеством) материальной и духовной культуры. В этом списке находятся и бесконечно разнообразные подсистемы названных систем, характеризующиеся (на своих уровнях) перечисленными выше синергетическими признаками».

«Строго говоря, Г.Хакен придумал термин «синергетика» для обозначения теории Ильи Пригожина о диссипативных структурах и показал, что эта теория может быть применена не только в физике, она *междисциплинарна* и в равной степени доступна философам, психологам, историкам, биологам и другим учёным».

Если отнестись к этим определениям всерьёз, то получится, что синергетика – это «теория всего», во всяком случае, всего интересного и сложного: космогенеза, зарождения жизни, её дальнейшего развития вплоть до появления человека, возникновения и становления общества, культуры и так далее. Что же теперь делать обычным, традиционным физикам, лингвистам, философам, биологам и обществоведам – переучиваться в синергетиков, ликвидировать свою синергетическую безграмотность?

Однако нельзя не признать, что синергетика всё же работает: не только объясняет многое из того, что прежде казалось необъяснимым, но и предсказывает – порой поразительно точно – совсем нетривиальные, удивительные вещи, противоречащие здравому смыслу и, тем не менее, реальные. Как же это ей удаётся, несмотря на невнятность, приблизительность и даже неверность (о чём будет идти речь далее) многих её

исходных положений? Значит, какое-то рациональное зерно в этом «чучелии» всё же содержится? Тогда в чём оно состоит?

Мне кажется, что кое-что можно понять, обратившись к истории вопроса. Одной из центральных, парадигмальных задач синергетики стала знаменитая реакция Белоусова–Жаботинского: самопроизвольное возникновение автоколебаний и автоволн в гомогенном растворе реагирующих химических веществ. Она была открыта в 1951 году химиком Борисом Павловичем Белоусовым и десять лет спустя теоретически объяснена математиком Анатолием Марковичем Жаботинским. Но статью Белоусова с описанием реакции дважды отвергли два самых солидных химических журнала с характерной мотивировкой отказа: «Этого не может быть!». А ведь ещё в 1910 году другой математик, А.Лотка, доказал возможность возникновения химических колебаний в гомогенной смеси, а А.А.Андронов в 1928 году развил красивую и в определённом смысле полную теорию возникновения автоколебаний (в том числе химических!). Но химики всё равно упорно считали подобные процессы невозможными. И лишь в конце 60-х годов XX века пришло, наконец, признание: самоорганизация в гомогенных растворах возможна.

Что же мешало признанию *очевидных* – в буквальном смысле слова – фактов? Ведь эта реакция проста и доступна, хорошо воспроизводима и визуально очень красива. А мешало убеждение, что в косной природе самопроизвольно могут идти лишь энтропийные процессы дезорганизации, роста беспорядка, но никак не его убывания, возможно лишь разрушение структур, но невозможно их становление. Любое количество фактов может оставаться без внимания, без попыток объяснения, если уже сложилось и стало всеобщим убеждением, что «этого не может быть».

Заслуга синергетики в том, что она смогла опрокинуть, смести эту плотину сложившихся предрассудков и тем открыла для изучения целый мир «новых» явлений (на самом деле вовсе не новых); и этот мир оказался столь широк и необъятен, что никакая конкретная методология не может охватить его целиком.

Что же касается перечисленных в приведённом выше определении «синергетических признаков», то нетрудно убедиться, что ни один из них не является обязательным для самоорганизации. Так, реакционную смесь Белоусова–Жаботинского никак нельзя назвать не только «сверхсложной», но даже и хоть сколько-нибудь сложной системой; однако она действительно диссипативная. «Большой» она тоже не является, разве что состоит из большого числа молекул; но под «большими системами» обычно понимают нечто совсем другое. Она также вовсе не «открытая»; в запаянной и теплоизолированной колбе она тоже работает, как часы, без энерго- и массообмена с окружающей средой. А ведь есть к тому же системы, в которых самопроизвольное формообразование происходит без всякой диссипации – и именно благодаря, а не вопреки отсутствию диссипации: это консерватив-

ные (гамильтоновы) системы с солитонными решениями (например, уединённые волны, наподобие волны цунами, недавно опустошившей побережья Южной Азии). Такие волны разрушаются, лишь выходя на мелководье, а перед этим проходят тысячи километров в открытом океане, сохраняя свой характерный профиль и почти не теряя энергии первоначального импульса, с чем и связана их чудовищная разрушительная сила.

Особенно примечательны примеры самоорганизации в таких явлениях, как сверхтекучесть и сверхпроводимость. Они ведь возможны исключительно благодаря самопроизвольно возникающему упорядоченному поведению потоков частиц (электронов или атомов гелия) в условиях полного отсутствия диссипации! Ток в замкнутом сверхпроводящем контуре может циркулировать неограниченно долго, пока поддерживаются условия, обеспечивающие сверхпроводимость. А для этого система должна быть вовсе не «открытой», а, напротив, полностью закрытой – теплоизолированной от внешнего мира, притом сама она никакого тепла не генерирует! В сверхтекучем жидком гелии к тому же при определённых условиях возникают сложные упорядоченные макроскопические движения, вроде взаимосвязанных вихрей и волн. Впрочем, это тоже примеры уже упомянутых солитонных решений.

И, наконец, такой «синергетический признак», как термодинамическая неравновесность, совершенно неприменим к системам, которые просто не могут описываться в терминах термодинамики и статистической физики, – таким, например, как популяционная динамика систем «хищник–жертва», описываемых уравнениями Лотки–Вольтерры. Конечно, зверей, численности которых описываются этими уравнениями, можно (для каких-то иных целей) считать термодинамическими неравновесными системами – только вот в уравнениях от самих зверей остаются только их численности, так что к свойствам решений этих уравнений термодинамика никакого отношения не имеет. А уж о развитии материальной и духовной культуры человеческих обществ в терминах термодинамики рассуждать давно не смеют даже самые закоренелые сторонники доктрины исторического материализма. Что же тогда осталось от приведённого выше определения синергетики, такого, что было бы действительно присуще всем без исключения явлениям самоорганизации?

Кое-что всё же осталось, и оно настолько важно, что обо всём прочем лучше просто сразу забыть, как о признаках случайных и несущественных. Это кое-что – *нелинейность*, и без неё ни о какой самоорганизации речи быть не может. При определённых, весьма специфических условиях нелинейность сама по себе приводит к «самоорганизации», хотя последний термин мне очень хочется взять в кавычки: я употребляю его только для того, чтобы хоть как-то очертить круг явлений, действительно относящихся к компетенции синергетики.

Нелинейность действительно обладает одним важным свойством, объясняющим, почему инерция мышления так долго и упорно сопротивлялась признанию реальности синергетических феноменов. Дело в том, что *нелинейная динамика контринтуитивна*. Я многократно убеждался в этом, пытаясь отыскать решения нелинейных динамических задач или объясняя некоторые хорошо известные выводы этой науки незнакомым с ней людям, в том числе, с изрядной математи-

ческой подготовкой. Можно сформулировать это и по-другому: наша повседневная интуиция автоматически, не раздумывая, пользуется линейными представлениями, линейными интерполяциями и линейными экстраполяциями. Вот почему существенно нелинейные явления почти всегда кажутся нам неожиданными и невероятными. К тому же мир нелинейных задач очень долго не поддавался какому-либо систематическому математическому описанию, общему подходу или методу решения. Среди ведущих математиков мира очень долго преобладало мнение, что такого метода (или группы методов) вообще быть не может. Всякая не поддающаяся линеаризации задача должна, они полагали, рассматриваться как отдельная головоломка: способ её аналитического решения иногда удаётся угадать, но применить его к какой-то другой нелинейной задаче нельзя.

Второе общее свойство самоорганизующихся систем, ныне уже достаточно общепризнанное, но не упомянутое в приведённом выше определении, состоит в том, что интересные формы и структуры развиваются из флуктуаций, причём тогда, когда система переходит из состояния, в котором флуктуации затухают, в состояние, когда они начинают усиливаться; эти два разных режима можно назвать устойчивым и неустойчивым состояниями, а тот момент во временной эволюции системы, когда она теряет устойчивость, – кризисом, или катастрофой, или точкой бифуркации. С прохождением через кризис и связана необратимость, которую с древних времён принято считать необходимым признаком всякого подлинного развития. Раздел математики, изучающий такие критические явления, – теория катастроф или теория устойчивости и бифуркаций, – стал первым разделом нелинейной динамики, в котором были сформулированы достаточно общие результаты, позволявшие классифицировать нелинейные динамические системы и вскрывать некоторые фундаментальные механизмы морфогенеза (это работы Пуанкаре, Андронова, Рене Тома, Арнольда и других).

И, наконец, третье свойство, которое, в сущности, и представляет собой рабочий механизм самоорганизации, – это зависимость устойчивости системы в точке бифуркации от её (системы) геометрии, некая обратная связь между ростом флуктуации и силами, вызывающими этот рост. Устойчивость означает, что флуктуации угасают, то есть эта обратная связь в целом отрицательна, а неустойчивость – что она положительна. Для процессов самоорганизации типично одновременное наличие как положительной, так и отрицательной обратных связей, порождаемых противоположно направленными процессами, более или менее сбалансированными, но сам этот баланс в точке бифуркации становится неустойчивым и зависящим от текущей формы системы и масштаба (размера) флуктуации. Как правило, достаточно малые отклонения от равновесия угасают, но если они становятся достаточно большими, то усиливаются. Это характерно, например, для ситуаций, описываемых теорией катастроф; в точке катастрофы система скачком переходит от одного устойчивого состояния к другому, иногда – к структурно более сложному, с другим типом симметрии.

Для объяснения морфогенетических процессов необходимо предполагать наличие целой последовательности таких критических точек, разделённых зона-

ми устойчивости, и, соответственно, целой серии последовательных бифуркаций, каждая из которых вызывает новые осложнения формы (организации) системы. Если бифуркационным параметром служит, скажем, размер или масса образующейся структуры, то можно говорить о содержательной аналогии с морфогенетическими процессами индивидуального развития в биологии – эмбрионального развития, например.

Важно также подчеркнуть, что это относится не только к системе в целом, но и к её отдельным частям – точкам роста, ветвления, закладкам новых «органов» и «частей тела». Последние термины я беру в кавычки, так как они описывают не только биологические объекты, но и, например, рост дендритных кристаллов, «космотических водорослей», космических структур вроде спиральных рукавов галактик, тропических ураганов, разных форм облаков, рост оврагов и горных

долин, многих форм рельефа поверхности Земли и других небесных тел, структуризации конвективных ячеек бенаровской конвекции – она служит основой геодинамических процессов тектоники плит, – и множество иных природных явлений, делающих наш мир таким, каким мы его знаем.

Ну и, наконец, о названии этого доклада. Во всех перечисленных выше примерах динамика морфогенетических процессов оказывалась напрямую связана с формами, которые эти процессы создавали. Это делает процессы формообразования самообусловленными и саморегулирующимися, причём именно **становящаяся форма управляет динамикой процесса**. Я считаю весьма важным подчеркнуть эту взаимосвязь, назвав очень широкий класс подобных процессов самоорганизации *морфогенетическими*, а дисциплину, изучающую механизмы этих процессов, – *морфодинамикой*.

Космический разум и эволюция Вселенной

(тезисы)

Л.М.Гиндилис,

кандидат физико-математических наук, действительный член Академии космонавтики им. К.Э.Циолковского, Москва
lmg@sai.msu.ru

1. Представления об эволюции мироздания, характерные для некоторых философских систем и уходящие корнями в мифологическое сознание, начиная с XX века, становятся достоянием науки. В научной картине мира идеи эволюции вначале были развиты и получили распространение в геологии и биологии. Частично они затронули и астрономию: происхождение Солнечной системы, эволюция звёзд и т.д. Однако это не касалось Вселенной в целом. В течение веков в европейской культуре господствовало представление о стабильности Вселенной. В отличие от изменчивого мира земной природы, Небеса представлялись эталонным неизменяемостью, царством непреходящего порядка, существующего от Вечности. Но после открытия (теоретического и экспериментального) расширения Вселенной эти представления подверглись глубочайшему изменению – астрономия стала «насквозь» эволюционной, и открылась возможность построения единой эволюционной картины всего мироздания.

2. Расширение Вселенной не сводится к чисто механической картине изменения пространственного масштаба. Физические условия в ранней Вселенной коренным образом отличались от современных, и материя находилась совершенно в ином состоянии. Следовательно, чтобы придти к наблюдаемому в настоящее время состоянию, Вселенная должна была пройти сложный путь эволюции. По современным представлениям, она возникает из вакуумно-подобного состояния и проходит несколько фаз, или стадий развития: адронная эра, лептонная эра, эра излучения и эра вещества (в которой мы живём). В процессе этой эволюции из кварк-глюонной плазмы возникают устойчивые элементарные частицы, из которых в процессе первичного нуклеосинтеза возникают ядра первых химических элементов, затем на стадии рекомбинации образуются атомы водорода и гелия, начинается

эволюция вещества во Вселенной. Формируются звёзды, в недрах которых идёт синтез более тяжелых химических элементов. В межзвёздной среде, в атмосферах звёзд образуются молекулы – открывается путь для химической эволюции и возникновения жизни. В процессе биологической эволюции появляются формы, способные нести разум. На этом эволюция, по-видимому, не заканчивается, а вступает в новую фазу – возникновения сверхразумных сил.

3. Рассматриваемая картина эволюции относится к *барионной* материи, которая составляет не более 4% – 5% материи физической Вселенной. В общей картине эволюции Мироздания необходимо учитывать и небарионную составляющую. Трудность состоит в том, что природа её до конца не ясна. Примерно 30% небарионной компоненты, как считается, приходится на так называемую «тёмную материю» (или «тёмное вещество»), состоящую, по-видимому, из очень массивных, слабо взаимодействующих частиц. А около 70% приходится на «тёмную энергию», или космологический вакуум. Тёмная материя распределена в пространстве неравномерно и, по-видимому, является той матрицей, на которой строятся структуры, состоящие из барионной материи. В отличие от тёмной материи, космологический вакуум равномерно заполняет пространство физической Вселенной. Благодаря присущему ему отрицательному давлению, порождающему антигравитацию, он является причиной того импульса, который привёл к расширению Вселенной. И он же обуславливает её *ускоренное* расширение в современную эпоху.

Пространство, из которого образуется трёхмерная физическая Вселенная, является многомерным. По-видимому, оно заполнено тёмной материей и тёмной энергией, а, возможно, и другими не известными нам формами материи. Это тоже следует учитывать в общей картине эволюции мироздания.