

Эссе “Основные физические критерии в описании живых систем”

В этом эссе будет проведен краткий обзор понятий и представлений, отражающих важнейшие физические принципы, которые составляют основу организации, развития и функционирования живых систем. Будут рассмотрены следующие вопросы:

1. дискретность и термодинамическая неравновесность живых систем;
2. линейные и нелинейные системы;
3. типы симметрий в квазикристаллах и живых системах;
4. синергетика, самоорганизация, диссипативные системы и диссипативные структуры;
5. точечные (сосредоточенные) и распределенные системы в природе;
6. пассивные и активные среды в неживой и живой природе, волны и автоволны.

Дискретность и термодинамическая неравновесность живых систем. Линейные и нелинейные системы

Классическая термодинамика изучает термодинамические равновесные, обратимые процессы. Для неравновесных процессов она устанавливает лишь неравенства, которые указывают возможное направление этих процессов. Фундаментальными работами И.Р.Пригожина установлено, что вся термодинамика делится на три большие области: равновесную, в которой производство энтропии, потоки и силы равны нулю, слабо неравновесную, в которой термодинамические силы «слабы», и энергетические потоки линейно зависят от сил, и сильно неравновесную, или нелинейную, где энергетические потоки нелинейны, а все термодинамические процессы носят необратимый характер. Основная задача неравновесной термодинамики - количественное изучение неравновесных процессов, в частности определение их скоростей в зависимости от внешних условий.

Слабо неравновесная (линейная) термодинамика рассматривает термодинамические процессы, происходящие в системах в состояниях, близких к равновесию. Таким образом, линейная термодинамика описывает стабильное, предсказуемое поведение систем, стремящихся к минимальному уровню активности. В слабо неравновесной области практически действуют законы равновесной термодинамики, система ни к чему не стремится и ее поведение в большинстве случаев вполне предсказуемо.

Сильно неравновесная термодинамика рассматривает процессы, происходящие в системах, состояние которых далеко от равновесия.

Когда термодинамические силы, действуя на систему, становятся достаточно большими и выводят ее из линейной области в нелинейную, устойчивость состояния системы и ее независимость от флуктуации значительно уменьшается. В таких состояниях определенные флуктуации усиливают свое воздействие над системой, вынуждая ее при достижении точки бифуркации – потери устойчивости, эволюционировать к новому состоянию, который может быть качественно отличным от исходного. Происходит самоорганизация системы. Причем считается, что развитие таких систем протекает путем образования нарастающей упорядоченности. На этой основе и возникло представление о самоорганизации материальных систем. Все материальные системы, от самых малых до самых больших, считаются открытыми, обменивающимися энергией и веществом с окружающей средой и находящимися, как правило, в состоянии, далеком от термодинамического равновесия.

Над проблемами законов термодинамики применительно к биологии в начале 20-го века занимался биолог-теоретик Эрвин Симонович Бауэр. Основной задачей, которую поставил перед собой Э. Бауэр - определить основные термодинамические свойства живых веществ, за которое он принимал молекулы белков в особом, неравновесном состоянии. Принципиальным научным достижением Э. Бауэра в этой работе является неопровержимое доказательство того, что живые организмы могут находиться только в устойчивом неравновесном термодинамическом состоянии.

Э. Бауэром был сформулирован «Всеобщий закон биологии» в следующей редакции: «Все и только живые системы никогда не бывают в равновесии и исполняют за счет своей свободной энергии постоянную работу против равновесия, требуемого законами физики и химии при существующих внешних условиях»

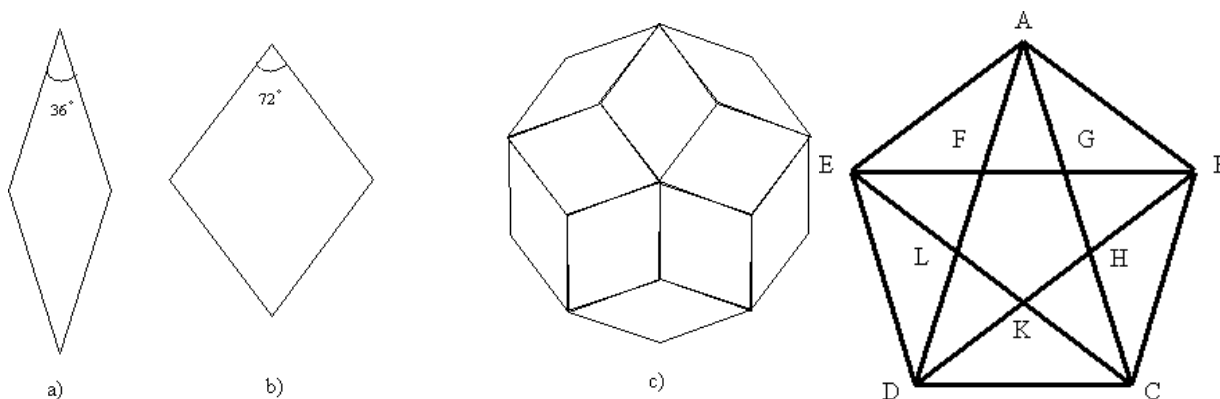
Типы симметрий в квазикристаллах и живых системах

Квазикристаллы были открыты Шехтманом в экспериментах по дифракции электронов на быстроохлажденном сплаве $\text{Al}_{86}\text{Mn}_{14}$ (алюминия и марганца). Первый открытый им квазикристаллический сплав получил название «шехтманит».

Наличие резких дифракционных максимумов свидетельствовало о присутствии в структуре дальнего порядка в расположении атомов, характерного для кристаллов, поскольку это означает, что атомы в разных участках образца одинаково отражают пучок электронов. Дифракционная картина имела точечную симметрию икосаэдра (двадцатигранника), то есть обладала осью симметрии пятого порядка, невозможной в трехмерной периодической решетке. Дальнейшие исследования показали, что в новом материале реализуется новый тип порядка, некристаллический и неаморфный. Поэтому данное вещество было названо квазикристаллом.

Некоторое время спустя были найдены другие металлические сплавы с дальним порядком, но имеющие оси симметрии седьмого, восьмого, десятого, двенадцатого и т.д. порядков, запрещенные для кристаллов. В связи с этим расширилось и понятие квазикристаллов: в настоящее время под квазикристаллами принято понимать твердые металлические сплавы с дальним порядком, дифракционные пики которых расположены с некристаллографической симметрией.

В 1976 году английский математик Роджер Пенроуз дал математическое описание так называемой мозаики Пенроуза, позволяющей с помощью всего лишь двух плиток весьма простой формы замостить бесконечную плоскость никогда не повторяющимся узором. Именно это и наблюдается в квазикристаллах. В своей простейшей форме "плитки Пенроуза" представляют собой неслучайный набор ромбовидных фигур двух типов, одни с внутренним углом 36° , другие - 72° .



У биологических объектов встречаются следующие типы симметрии:

- сферическая симметрия — симметричность относительно вращений в трёхмерном пространстве на произвольные углы;
- аксиальная симметрия (радиальная симметрия, симметрия вращения неопределённого порядка) — симметричность относительно поворотов на произвольный угол вокруг какой-либо оси;
- симметрия вращения n -го порядка — симметричность относительно поворотов на угол $360^\circ/n$ вокруг какой-либо оси;
- двусторонняя (билатеральная) симметрия — симметричность относительно плоскости симметрии (симметрия зеркального отражения);

- трансляционная симметрия — симметричность относительно сдвигов пространства в каком-либо направлении на некоторое расстояние (её частный случай у животных — метамерия (биология));
- триаксиальная асимметрия — отсутствие симметрии по всем трём пространственным осям.

Синергетика, самоорганизация, диссипативные системы и диссипативные структуры;

Самоорганизация - процесс, в ходе которого создается, воспроизводится или совершенствуется организация сложной динамической системы. Процессы самоорганизации могут иметь место только в системах с большим количеством элементов, связи между которыми имеют не жесткий, а вероятностный характер. Эти процессы происходят за счет перестройки существующих и образования новых связей между элементами системы. Отличительная особенность процессов самоорганизации – их целенаправленный, но вместе с тем и естественный, спонтанный характер: эти процессы, протекающие при взаимодействии системы с окружающей средой, в той или иной мере автономны, относительно независимы от нее. Различают три типа процессов самоорганизации. Первый – это самозарождение организации, т.е. возникновение из некоторой совокупности объектов определенного уровня новой целостной системы со своими специфическими закономерностями. Второй тип – процессы, благодаря которым система поддерживает определенный уровень организации при изменении внешних и внутренних условий ее функционирования (гомеостатические механизмы, в частности действующие по принципу обратной связи). Третий тип связан с совершенствованием и с саморазвитием таких систем, которые способны накапливать и использовать прошлый опыт.

Синергетика - возникшее в середине 70-х гг. новое междисциплинарное направление научных исследований, ставящее задачей выявление и познание общих закономерностей, управляющих процессами самоорганизации в системах различной природы. Синергетику часто определяют как науку о самоорганизации.

Диссипативная система (или диссипативная структура, от лат. dissipatio — «рассеиваю, разрушаю») — это открытая система, которая оперирует вдали от термодинамического равновесия. Иными словами, это устойчивое состояние, возникающее в неравновесной среде при условии диссипации (рассеивания) энергии, которая поступает извне. Диссипативная система иногда называется ещё стационарной открытой системой или неравновесной открытой системой.

Диссипативная система характеризуется спонтанным появлением сложной, зачастую хаотичной структуры. Отличительная особенность таких систем — несохранение объёма в фазовом пространстве, то есть невыполнение Теоремы Лиувилля. Простым примером такой системы являются ячейки Бенара. В качестве более сложных примеров называются лазеры, реакция Белоусова — Жаботинского и биологическая жизнь.

Точечные (сосредоточенные) и распределенные системы в природе. Пассивные и активные среды в неживой и живой природе, волны и автоволны.

Многие динамические системы, независимо от того являются ли они физическими, химическими или биологическими, могут быть описаны в традиционных терминах “реакция – диффузия”. Пусть в какой-то области пространства протекает некий процесс (“реакция”) со своим характерным временем. Между соседними областями происходит перенос – диффузия – компонентов или продуктов процесса. Если характерное время основного процесса значительно больше времени переноса, то мы имеем дело с сосредоточенной, или точечной, системой (или с идеальным точечным реактором). Процессы в такой системе синхронны (синфазны). Со стороны она выглядит, как единое целое, хотя ее параметры могут изменяться со временем, например, осциллировать. Когда же времена переноса сопоставимы с характерными временами самих процессов или превышают их, система становится распределенной. Таким системам свойственно или образование регулярной, согласованной в пространстве и времени структуры, или хаотическое чередование процессов в различных точках.

Распределенные системы являются пассивной средой, когда перенос массы или какого-либо возмущения, например, волны, направляется из определенной точки (точек) и оттуда же

питается энергией. Сама же среда пассивно относится к переносу, не поддерживая его энергией и допуская явление интерференции, т.е. сложения и взаимопропускания волн. Примером образования регулярных структур являются диссипативные системы, исходно термодинамически неравновесные и рассеивающие энергию. Запас свободной энергии может быть, к примеру, обеспечен градиентом концентрации какого-либо компонента смеси, а его диффузия может сопровождаться образованием нерастворимого осадка. Известно образование регулярных равновесных структур – слоев Лизеганга (“ритмических осадков”) в виде колец или спиралей. В какой-то мере эти известные с прошлого века структуры могли служить упрощенной моделью биологического морфогенеза. Способность к более высокому уровню самоорганизации распределенные системы приобретают, когда они становятся активной средой.

Важнейшей особенностью активной среды является ее способность подпитывать энергией идущие в системе процессы в каждой точке пространства. После завершения процесса в каждой малой области системы идет процесс самовосстановления – локальное накопление энергии, способной обеспечить следующую фазу процесса. В основе процесса лежит гомогенная окислительно-восстановительная реакция – переход от 3-валентного церия к 4-валентному и обратно в присутствии серной кислоты, малоновой кислоты, бромата калия. Эта реакция по своей природе такова, что в каждой точке реактора происходят самопроизвольные осцилляции, сопровождающиеся изменением цвета раствора. Если весь объем реактора быстро перемешивается, система ведет себя, как точечная – осцилляторы связаны перемешиванием. В этом случае во всем объеме наблюдаются синфазные самоподдерживающиеся осцилляции – автоколебания – раствор периодически изменяет цвет.

При отсутствии перемешивания в тонком слое жидкости реакция Белоусова–Жаботинского–Заикина становится распределенной системой – двумерной активной средой, в которой точечные осцилляторы последовательно взаимодействуют друг с другом, что сопровождается появлением распространяющихся концентрических 4 цветных пространственных структур – автоволн. Эти кольцевые волны распространяются вокруг так называемых водителей ритма – спонтанно возникающих центров колебаний. Водитель ритма с самой высокой собственной частотой постепенно “съедает” всех своих конкурентов и втягивает всю систему в работу со своей частотой вплоть до полного истощения запаса свободной энергии в системе. Распространяясь, автоволны не изменяют своей амплитуды, как это бывает с волнами в пассивной среде, где они затухают (как, например, звуки в воздухе). Автоволны не проходят друг сквозь друга, а аннигилируют при столкновении. Таким образом, реакция в точечной системе протекает как автоколебательный процесс, а в распределенной – как автоволновой.