

САМООРГАНИЗАЦИЯ НЕЖИВОЙ МАТЕРИИ И ЕЕ МЕСТО В ПРЕПОДАВАНИИ ФИЗИКИ

Д. И. ПЕННЕР, Л. И. БОГОМОЛОВА

Заглавие данного выступления могло бы звучать и так: „Реабилитация материи.” Речь идет, выражаясь образно, о преодолении „пренебрежительного отношения” к свойствам и потенциям материи (особенно неживой), установившемся с древних времен и не преодоленном до сих пор. Ограничимся крупнейшим мыслителем древности — Аристотелем. Естественным состоянием материи — по Аристотелю — является состояние абсолютного покоя и им кончается рано или поздно всякое механическое движение.

Ньютон существенно расширил диапазон свойств материи: будучи изолированным от внешних воздействий, тело („кусок” материи) находится либо в состоянии покоя, либо в состоянии равномерного прямолинейного движения. Вместе с тем тело бесконечно податливо воздействию других тел (внешних сил), приводящему к появлению ускорения. Материя выступает пассивным участником движения, что получило свое словесное выражение в термине „инерция” (от латинск. *inertia* — лень). На немецком языке закон инерции так и именуется: „*Irägheitsgesetz*” — закон лени. Итак, материя инертна, ленива, пассивна, ее уделом являются косность, застылость.

Ньютон как философ высказывается еще более пренебрежительно о материи, чем Ньютон — физик. Ньютон — философ вводит пресловутую „*prima causa*” „первотолчок”; иначе говоря, наблюдаемые ныне движения материи являются „наследием” таинственного начального импульса, данного богом-творцом. Без этого импульса материя не стала бы двигаться, т. е. даже механическое движение привнесено — по Ньютону — философу — в материю извне.

Начиная с середины прошлого века, в качестве меры упорядоченности замкнутых систем служит весьма общее и глубокое понятие энтропии, введенное Р. Клаузиусом. Укоренилось убеждение в универсальности и преобладании односторонне направленных процессов диссипации, обесценения энергии, определяющих эволюцию материи во времени (ее „деградацию”). Несмотря на последовавшие за Р. Клаузиусом работы Л. Больцмана, Д. Гиббса и других, установивших ограниченность концепции Клаузиуса, значительная часть физиков все же оказалась во власти фаталистической идеи о всеобщей деградации энергии (а, соответственно, и ее носителя — материи). Незаконно экстраполируя второе начало термодинамики, эти физики, на словах отрицая

гипотезу о тепловой смерти Вселенной, допускают для окружающей нас среды мелко дозированной тепловой смерть как преобладающую тенденцию в эволюции макроскопических систем.

Больцмановская термодинамика допускает в замкнутых системах спонтанные процессы убывания энтропии и, соответственно, рост локальной упорядоченности в виде флуктуаций, величина и частота которых подчиняется вероятностным законам классической статистики. Бросается в глаза формально-феноменологический характер, „безликость” больцмановских флуктуаций: вопрос о физическом механизме спонтанных процессов убывания энтропии теория флуктуаций оставляет, конечно, совершенно открытым, а вместе с тем не выясняется и детерминация этих процессов.

В настоящее время все чаще высказывается мнение, что энтропия не является столь универсальной величиной, как это представлялось раньше. С позиций физики нет основания подвергать сомнению второе начало термодинамики; следовало бы, однако, уделить больше внимания процессам повышения уровня локальной организованности в **открытых системах** как живой, так и неживой материи.

В заложенной работами Онзагера (1931 г.) неравновесной термодинамике широко и разносторонне изучаются открытые системы, характеризующиеся обменом веществом, теплотой и работой с окружающей средой. Фактически все реальные системы являются в большей или меньшей степени открытыми. В работах Онзагера и его многочисленных последователей еще доминируют категориальный аппарат и методика исследований термодинамики замкнутых систем. Вместе с тем широким фронтом развиваются исследования локальной организованности открытых систем в отрыве от „энтропийных” представлений (Г. Хакен и др.); они более известны под названием исследований процессов самоорганизации или синэргетики (в переводе с греческого языка синэргетика означает „совместное действие”).

Задачей синэргетики является выявление общих закономерностей в процессах самоорганизации, приводящих к образованию систем с более упорядоченными пространственными и временными структурами.

Уже проведен ряд представительных международных совещаний по синэргетике и появилось внушительное число исследований. В 1971 г. нами была предпринята (по-видимому, впервые в советской литературе) попытка анализа ряда группирующихся макроскопических систем для выявления принципов самоорганизации в неживой природе (1). Вслед затем появились другие работы авторов (2, 3), рассматривающих рост кристаллов в аспекте самоорганизации.

Для проводимых исследований характерны два аспекта: 1. поиски критериев и количественных параметров упорядоченности, более общих и универсальных, чем классическое понятие энтропии, и пригодные для характеристики открытых систем; 2. выявление **механизма** процессов самоорганизации, причем главный интерес (с методических позиций) представляют **макроскопические** процессы самоорганизации, механизм которых легко просматривается.

Наиболее примитивной формой самоорганизации в неживой при-

роде является пространственное группирование отдельных частиц (компонентов, подсистем) в более сложные системы с определенной устойчивостью. Напрашивается важное положение: группирующиеся объекты **должны быть колебательными системами.**

Рассмотрим подробнее одно явление, которое может служить моделью самоорганизующейся системы. Мы имеем в виду метод автоматической фиксации поля микрорадиоволн, разработанный В. К. Аркадьевым и Д. И. Пеннером (4, 5). Этот метод позволяет непосредственно видеть и фотографировать поле микрорадиоволн путем использования огромного числа мелких искр как массовых индикаторов этого поля. Физика данного метода такова.

Пусть на горизонтальную поверхность тонким слоем нанесены металлический порошок или мелкие опилки с естественно варьирующимися расстояниями между отдельными частицами. Такую совокупность частиц (систему) можно рассматривать как большое число линейных или квазилинейных герцевых резонаторов (подсистем), более или менее сильно расстроенных как в обычном понимании этого термина, так и в геометрическом отношении. Обычное понятие расстройки означает несоответствие индуктивности и емкости условиям резонанса. Геометрическая расстройка заключается в том, что пары близко расположенных частиц или же комплексы контактирующих частиц, рассматриваемых как „зародышевые” резонаторы, как правило, не параллельны электрическому вектору волны и расстояния между частицами (или комплексами частиц) слишком велики для образования искр. Как показывает опыт, в каждый момент времени значительное число пар частиц (или комплексов частиц) оказываются настроенными и способны поглотить энергию высокочастотного поля с образованием искр. При легком встряхивании всей массы опилок или порошка число настроенных резонаторов (а, следовательно, и искр) за конечный промежуток времени может стать очень большим. При достаточно мощном облучении возникает иллюзия сплошного свечения всей области попадания радиоволн.

Опыты показали, что при наличии порошковой массы резонируют не линейные цепочки частиц, а комплексы частиц весьма причудливой формы и размеров. Так при использовании трехсантиметровой волны резонансная длина линейного резонатора должна (с учетом особенностей резонаторов сантиметрового диапазона) составлять около одного сантиметра. Между тем удается выделить искрящиеся резонаторы в порошке, напыленном в виде квадрата 5x5 мм. Удаление отдельных час-

Авторы этого метода иногда в шутку заявляли, что радиоволна „умна” и выбирает себе из всего огромного набора зародышевых резонаторов, которые можно мысленно составить из контактирующих между собой частиц, именно те комплексы, которые по воле случая ближе всего отвечают условиям резонанса.

Назовем условно такие оптимальные комплексы „удачными”, и, соответственно, другие комплексы, более далекие от условий резонанса, „неудачными”. Как известно из радиоп физики, каждая приемная антен-

на отсасывает энергию из определенной площади волнового фронта, пропорциональной квадрату длины антенны (при линейной форме). Таким образом, можно говорить о конкуренции между зародышевыми резонаторами при поглощении энергии падающей волны: „удачные” комплексы захватывают энергию из некоторой площади и лишают „неудачные” комплексы энергии, как бы подавляя их.

Конкуренция между „удачными” и „неудачными” комплексами частиц идет, однако, дальше. Не следует считать „удачные” комплексы статическими, неизменными, и их общее число в данной порошковой массе постоянным. Пондеромоторные силы, действующие между составными частицами одного „удачного” комплекса, приводят к упорядочению его структуры. Вместе с тем они содействуют появлению „удачных” комплексов там, где их почему-то не было. В этом заключается эффект легкого встряхивания порошковой массы, после которого общее свечение усиливается: встряхивание, очевидно, содействует пондеромоторным силам в преодолении трения покоя, увеличивая подвижность частиц.

Таким образом, конкуренция между комплексами частиц (зародышевыми резонаторами) сводится не только к „захвату пищи” удачными комплексами, но и к улучшению их структуры, что в свою очередь способствует поглощению еще большей энергии („пищи”).

Еще одна важная особенность рассматриваемого явления заключается в том, что эффект интенсивного искрения наблюдается только при облучении порошковой массы сильно затухающими радиоволнами (такие волны на заре радиотехники назывались герцевыми волнами). Современные незатухающие волны возбуждают в порошковой массе очень малое число искр (при такой же или даже много большей мощности по сравнению с герцевыми волнами). Этот эффект находит простое физическое объяснение: сильно затухающие радиоволны производят своеобразное „ударное” действие, иначе говоря, при разложении сильно затухающего волнового импульса на его составляющие мы получаем относительно широкий спектр. В силу этого, явление не характеризуется большой остротой резонанса (как это имеет место в поле незатухающих волн), т. е. возможны довольно широкие отклонения от резонансных условий без большого снижения поглощения энергии. Высокочастотное поле затухающих волн способно (до образования искры) возбудить интенсивные колебания в одной половине резонатора и вместе с тем поддерживает колебания и тогда, когда после образования искры резонансная длина удваивается (резонируют две половинки как целый резонатор).

В данном модельном опыте отчетливо проявляется различие между бальмановской флуктуацией и явлением самоорганизации с точки зрения всего характера их детерминации, в частности — времени их образования (неопределенного для флуктуации и определенного в случае самоорганизации).

Попытаемся теперь, после выяснения физического механизма явления, установить его общие черты с точки зрения условий самоорганизации.

Исходная ситуация характеризуется по У. Р. Эшби (6) наличием пространства возможностей — набора состояний порошковой массы (системы) с ее подсистемами в виде потенциально возможных резонирующих комплексов. „Удачные“ подсистемы обладают свойством селективно поглощать энергию высокочастотного электромагнитного поля. К условиям самоорганизации относится также наличие „пищи“ в виде энергии затухающих волн, что обеспечивает достаточное разнообразие (широкий диапазон) поглощаемых частот. Для процесса самоорганизации характерно требование ограниченной „пищи“ и конкуренции подсистем за свою „долю“. Радиофизический механизм осуществления этой „борьбы за существование“ был показан выше. В процессе конкуренции улучшается структура удачных подсистем и еще больше закрепляется их преимущество перед „неудачниками“.

Как уже указывалось, данное явление заслуживает интерес, поскольку оно происходит на макрофизическом уровне. Система (порошковая система) состоит из огромного числа подсистем, относительно свободных от жестких связей (сохраняются только силы тяжести и трения), а „пища“ находится в замечательном соответствии с ассимиляционными способностями подсистем (на эту особенность излучения и поглощения затухающих волн указывал еще Г. Герц).

Ферстер (7) в его известном модельном опыте по демонстрации самоорганизации применял большое число специально сконструированных магнитов, которые при встряхивании группировались в виде упорядоченных структур, изумляющих своей правильностью. Преодолению жестких связей (которые можно было бы назвать диссипативными) помимо встряхивания способствовало помещение всей системы в мелкий гравий. „Пища“, подводимая в виде энергии беспорядочного встряхивания, носит, по выражению Ферстера, характер „шума“; из которого системы магнитных кубиков селективно отбирает упорядочивающие импульсы.

Обобщая, можно кратко сформулировать некоторые условия самоорганизации:

1. Наличие неупорядоченной системы с подсистемами, характеризующимися определенными ассимиляционными способностями, и окружения (среды), поставляющего пищу в ограниченном количестве, но с достаточно разнообразным „ассортиментом“ (в частности, с неупорядоченностью „шума“).

2. Наличие „пространства возможностей“ в виде набора потенциально возможных упорядоченных состояний системы в данной среде.

3. Наличие соответствия между ассортиментом пищи и ассимиляционными способностями подсистем. Это условие может быть модифицировано как способность селективного поглощения отдельных компонентов неупорядоченной пищи („шума“).

4. Малая величина диссипативных связей, наложенных на подсистемы.

5. Наличие конкуренции между подсистемами в борьбе за пищу. Легко реализуемой самоорганизующейся системой, позволяющей вести наблюдения на макрофизическом уровне, является аргументный

маятник (8, 9, 10). Аргументным маятником называют линейную или нелинейную механическую систему, которая возбуждается внешней периодической силой, действующей на части траектории движения (рис. 1.) В качестве колеблющегося груза здесь служит постоянный магнит небольшой длины, один из полюсов которого обращен вниз. При прохождении положения равновесия магнит движется параллельно оси плоского соленоида, питаемого от городской сети переменного тока через балластное омическое или емкостное сопротивление. Питание соленоида может быть осуществлено и через автотрансформатор. Плоский соленоид должен быть расположен перпендикулярно плоскости качаний симметрично относительно положения равновесия маятника (как это показано на рис. 1.). Его ширина может быть выбрана от 9 до 12 мм. Нижний полюс колеблющегося магнита вблизи соленоида движется вдоль силовых линий поля, и поэтому испытывает либо ускоряющее, либо замедляющее воздействие со стороны поля соленоида.

Из теории колебаний известно, что при действии гармонической силы на линейную колебательную систему с трением собственные колебания с течением времени затухают и реализуются колебания системы на частоте, близкой к частоте ее собственных колебаний. В общем случае возбуждение низкочастотных колебаний на частоте, близкой к собственной, возможно лишь в том случае, когда в спектре внешней высокочастотной силы имеется спектральная составляющая („субгармоника“), близкая к частоте возбуждаемых колебаний.

Рассмотрим условия поддержания незатухающих колебаний маятника. Первоначально маятник отклоняют от положения равновесия на определенный угол (в общем случае имеется несколько таких углов отклонения) и отпускают. Если, не зная точных значений этих углов, отклоняют маятник на произвольный угол, то возможны один-два (редко три) неудачных исхода, когда маятник не входит в режим устойчивых незатухающих колебаний.

Введем следующие обозначения. Период внешней силы, равный периоду переменного тока сети, обозначим буквой $T = \frac{1}{f}$ где f — частота внешней силы; период собственных малых колебаний маятника (при отсутствии поля) равен $T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} = \frac{1}{f_0}$ где l — длина маятника, g — ускорение силы тяжести, f_0 — собственная частота. Период и частоту возбуждаемых колебаний с амплитудой a обозначим соответственно через T_a и f_a . При аргументных колебаниях T и T_0 могут быть не равными, не кратными и значительно отличающимися друг от друга, однако T и T_a должны быть или кратными или равными между собой, т. е. должны выполняться условия:

$$T = \frac{1}{2m+1} T_0 \quad (1)$$

где $m = 0, 1, 2, 3, \dots$,
или

$$f_a = \frac{f}{2m+1} = f_n,$$

эти $n = 2m + 1 = 1, 3, 5, \dots$

Пусть, например, длина маятника $l = 0,5$ м и $g = 9,807 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$,

тогда $T_0 = 2\pi \cdot \frac{0,5}{9,807} = 1,419$ с (апериод внешней силы $T = 0,02$ с).

При рассмотрении режима возбуждений незатухающих колебаний с амплитудами, превышающими 5° , период собственных колебаний маятника T_a выражается более сложной приближенной формулой:

$$T_a = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \frac{a^2}{8}}} = T_0 \left(1 + \frac{a^2}{16}\right), \quad (2)$$

где a — амплитуда колебаний маятника в радианах.

Предположим, что амплитуда колебаний маятника равна 90° , тогда по формуле (2) нетрудно определить период колебаний маятника; он составляет 1,706 с.

Решающим условием возбуждения колебаний является подбор ширины соленоида, который определяет время эффективного взаимодействия магнита с полем соленоида, называемое временем пролета. Понятно, что резких границ у зоны взаимодействия не существует. Примем за ширину области взаимодействия условно сумму ширины соленоида и толщины магнита, которую обозначим через d . Время пролета маятником области взаимодействия τ_0 (при отсутствии поля) зависит от угла отклонения маятника от положения равновесия и равно $\tau_0 = \frac{v}{d}$ (v — скорость влета маятника в зону взаимодействия).

Пусть, например, время пролета маятником зоны взаимодействия в отсутствие силы равно периоду внешней силы $\tau_0 = T$; тогда никакой по величине амплитудой внешней силы нельзя возбудить колебаний маятника, т. к. сила, ускоряющая маятник, будет в среднем равняться силе, тормозящей его.

При условии что $\tau_0 = \frac{3}{4} T$ и $T = 0,02$ с, время пролета составит 0,015 с. Взаимодействие тока, текущего по соленоиду, с полем магнита приводит к тому, что на протяжении части времени пролета сила ускоряет маятник, а в другую часть времени — тормозит. Преобладание тормозящего или ускоряющего взаимодействия зависит от фазы влета магнита в поле соленоида. В качестве примера на рис. 2а изображен случай, когда магнит влетает при фазе силы $\psi = 0$. По оси абсцисс откладывается время, по оси ординат — мгновенное значение силы,

с которой магнитное поле соленоида действует на магнит. Пусть при влете мгновенные значения силы растут в „положительном” направлении, при котором магнит ускоряется, т. е. его скорость возрастает, затем значение силы меняет знак и начинает тормозить магнит: при этом магнит отдает часть энергии полю. В целом при пролете преобладает ускоряющее воздействие, а реальное время пролета $\tau_1 < \tau_0$.

Согласно рис 2а за первый полупериод происходит вклад энергии в колебания магнита, изображенное площадью, равной половине синусоиды, далее магнит испытывает торможение. В итоге за пролет происходит вклад энергии, показанный заштрихованной площадкой со знаком „+”.

При наиболее „неудачном” пролете через область взаимодействия (рис. 2б) на протяжении полупериода магнит тормозится и лишь затем ускоряется: при этом время пролета $\tau_2 > \tau_0$. Ясно, что итогом такого пролета является торможение магнита. Заштрихованной площадкой изображен отрицательный энергетический баланс при таком пролете.

На рис. 2в и 2г изображены случаи $\psi = 60^\circ$ и $\psi = 60 + \pi = 240^\circ$. Итогом таких двух пролетов является положительный вклад энергии.

Опыты подтвердили, что при $\tau_0 = \frac{3}{4} T$ или близких к ним значений, маятник совершает устойчивые колебания, хотя в отдельные полупериоды и преобладает торможение.

Закономерности колебаний аргументного маятника (макроскопического тела) и закономерности автофазировки заряженных частиц в ускорителях (системы микрочастиц) формально-математически характеризуются колебательным и стохастическим подобием. Объектом статистики в случае маятника являются варьирующиеся значения времени пролета маятника через пространство взаимодействия (или фаз его влета в это пространство), у системы заряженных частиц — их распределение по фазам.

Другой варьирующейся величиной в колебаниях аргументного маятника является амплитуда колебаний, входящая известным образом в выражения для периода колебаний.

Используя сформулированные выше принципы самоорганизации, можно предположить, что в колебаниях аргументного маятника происходит суперпозиция двух „пространств возможностей” — наборов значений фаз влета и амплитуд.

Большой интерес представляет процесс вхождения аргументного маятника в режим стационарных колебаний, когда на протяжении ряда периодов колебаний наблюдаются флуктуации амплитуды, и маятник как бы припасовывается к условиям нечетной кратности и „удачной” фазы влета.

Замечательной особенностью аргументного маятника является и то, что **хотя в схеме нет явного устройства обратной связи, в самом процессе аргументных колебаний действует четкий динамический механизм обратной связи.** Маятник берет от сети ровно столько энергии, сколько требуется для компенсации потерь при колебаниях с данной дискретной амплитудой.

В своем интересном труде „Введение в синэргетику” Г. Хакен (II) вводит в качестве „параметра порядка” самоорганизующейся системы наличие набора мод амплитуды колебаний системы и возможность конкуренции между ними. Сформулированные нами выше условия самоорганизации совпадают с критериями Г. Хакена.

Кибернетика ввела понятие самоорганизации в сферу исследуемых сложнейших материальных систем. Нам представляется (и будущие исследования это несомненно подтвердят), что самоорганизация присуща (в разной степени) любым материальным системам. Тенденция к самоорганизации макроскопических систем, однако, обычно подавляется сильно выраженными диссипативными связями, такими, как, например, силы трения, особенно — трения покоя.

Примечательной особенностью самоорганизующихся систем в неорганической природе является, по-видимому, отсутствие фактов, иллюстрирующих их дальнейшую эволюцию в „вертикальном” направлении, т. е. переход на качественно более высокий уровень. Основная причина — гибель под действием деструктивных диссипативных факторов.

Констатируя тот факт, что эволюция самоорганизовавшихся систем „вверх” в неорганической природе еще не наблюдалась, мы должны остерегаться поспешных выводов о невозможности такой эволюции. По-видимому, такая эволюция предполагает наличие исключительных условий, „экзотических” по сочетанию различных факторов (одноместных и одновременных), экстремальных по своим абсолютным значениям и градиентам.

С методологических позиций исследование самоорганизующихся систем в неживой природе приобретает особое значение. Если в нашей научной и учебной литературе уже преодолено метафизическое представление о косности и инертности материи и прочно усвоен тезис Ф. Энгельса о движении как форме существования всей материи, как ее неотъемлемого атрибута, то явления самоорганизации до последнего времени считаются в какой-то мере монополией одной только живой природы. Эта точка зрения ошибочна: гениальные положения Ф. Энгельса о **самодвижении материи включают ее самоорганизацию на всех уровнях организации материи (включая и неорганическую).**

Исследования процессов самоорганизации в неживой природе покажут, что самоорганизация является универсальным атрибутом материальных систем, что, по образному выражению В. И. Кремянского, в материи как бы дремлют способности к самоорганизации, ожидая подходящих условий для их реализации (12).

Процессы самоорганизации в неживой природе, на наш взгляд, должны стать объектом изучения в курсе физики в вузе и найти себе место как в термодинамике, так и в обобщающих лекциях по современной физической картине мира..

ЛИТЕРАТУРА

1. ПЕННЕР Д. И., ДУБОШИНСКИЙ Я. Б. О самоорганизующихся системах в неорганической природе. В сб. „Ученые записки“, т. 32, серия „Физика“, вып. 5, изд-во Владимирского пед. ин-та, 1971 и в сб. „Философские проблемы естествознаний“, изд-во Киевского университета, вып. 12, 1971.
2. ГОНЧАРОВ А. В. Кристалл — самообразовавшаяся система. В сб. „Ученые записки“, т. 32, серия „Физика“, вып. 5, изд-во Владимирского пед. ин-та, 1971.
3. Процессы реального кристаллообразования. Под ред. акад. Н. В. Белова. „Наука“, М. 1977.
4. АРКАДЬЕВ В. К., ПЕННЕР Д. И. Видение и фотографирование поля герцевых волн. ДАН СССР, т. 21, 1940, с. 316.
5. ПЕННЕР Д. И. Видение сантиметровых волн. В сб. „Ученые записки МГУ“, вып. 134, 1949, с. 153.
6. ЭШБИ У. Р. Принципы самоорганизации. „Мир“, М., 1968, с. 316.
7. ФЕРСТЕР Г. Самоорганизующиеся системы. В сб.: „Самоорганизующиеся системы“. „Наука“, М., 1964.
8. ПЕННЕР Д. И., ДУБОШИНСКИЙ Д. Б., ДУБОШИНСКИЙ Я. Б., КОЗАКОВ М. И. Колебания с саморегулирующимся временем взаимодействия. ДАН СССР, т. 204, № 5, 1972.
9. ПЕННЕР Д. И., ДУБОШИНСКИЙ Д. Б., КОЗАКОВ М. И., ВЕРМЕЛЬ А. С., ГАЛКИН Ю. В. Асинхронное возбуждение незатухающих колебаний, УФН, т. 109, вып. 2, 1973.
10. ПЕННЕР Д. И., КОЗАКОВ М. И., ДУБОШИНСКИЙ Я. Б., ДУБОШИНСКИЙ Д. Б. Аргументный маятник. „Физика в школе“, № 3, 1981.
11. ХАКЕН Г. Введение в синергетику. „Мир“, М. 1980.
12. КРЕМЯНСКИЙ В. И. Возникновение организации материальных систем. „Вопросы философии“ № 3, 1967, с. 56.