

Энтропия и эволюция

(29.11.2012. Обновлено 26.01.2013)

Необходимым условием эволюции системы является ее (системы) открытость, т.е. непрерывной приток энергии извне и отвод избыточной неупорядоченной (тепловой) энергии наружу; при этом выходной поток энтропии регулярно превышает входной поток. Однако этого достаточно *лишь для поддержания* достигнутого уровня удаленности от состояния теплового равновесия, тогда как для *усложнения* организации такой системы этого мало: требуется также, чтобы по мере эволюции системы в ней действовали определенные *правила отбора*, выделяющие некоторые устойчивые точки и области ее фазового пространства и запрещающие другие точки и области. При наличии двух указанных условий действительно происходит (и *не может не происходить*) прогрессивная эволюция системы, сопровождающаяся ее структурными изменениями и появлением (проявлением) новых правил отбора. Фундаментальными примерами подобных систем являются 1) наша Вселенная в целом и 2) Земля.

Эволюция *материальной* системы основана, таким образом, на законах природы, которые, будучи объективными, как таковые *не являются материальными*, т.е. не обладают атрибутами пространства-времени и не являются носителями импульса и/или энергии. Сам факт существования таких законов заставляет предположить наличие другого уровня реальности, в определенном смысле *внешнего* по отношению к нашей Вселенной.

Введение

Наряду с ростом неупорядоченности в различных системах, деградации организации материи, повсеместно наблюдаются проявления противоположной тенденции. Это непосредственно можно видеть на Земле (включая проявления человеческой деятельности), но и вся Вселенная является ярким примером длительной тенденции, совершенно противоположной стремлению к так называемой “тепловой смерти”. Физика зачастую и до сих пор исходит из представления о нашей Вселенной как о термодинамически изолированной системе, полагая, что в ней заключено все сущее, поэтому энергия и материя не могут ниоткуда поступать в нее, как не могут и никуда исчезать. Соответственно, следует неизбежный вывод о глобальной справедливости второго начала термодинамики, что приводит к разительному расхождению с реальной эволюцией Вселенной.

Впрочем, широко распространено утверждение, что в силу *гравитационных* факторов Вселенную нельзя считать термодинамически изолированной системой, поэтому мы и наблюдаем сложно организованные структуры и процессы, явно противоречащие второму началу. К сожалению, это утверждение скорее служит, используя яркую метафору Фейнмана, “ковром, под который можно заматать мусор”, оно ничего не проясняет и не может стать компасом для построения моделей эволюции, ибо взамен ничего не предлагает.

Как меняется энтропия Вселенной?

Хотелось бы иметь представление об общей тенденции изменения энтропии в процессе эволюции Вселенной. Мне кажется, что здесь следует признать очевидный факт и согласиться с тем, что *энтропия Вселенной с течением космологического*

времени убывает. Вопрос состоит “лишь” в том, как это можно теоретически обосновать.

С 1993 года я развиваю отличную от стандартной космологическую модель нашей Вселенной, см. [Шульман, 2011]. В этой новой модели наша Вселенная представляет собой черную дыру (одним из первых, насколько мне известно, на подобную возможность указывал Дж. Уилер, см. [Smolin, 1994]), которая *необратимо* (как и положено черной дыре) расширяется вследствие поглощения материи и энергии из внешнего (4-мерного) Мира. Само течение времени в этой модели фактически сводится к изменению радиуса Вселенной, который маркирует хронологию событий подобно радиусу годичных колец дерева.

Таким образом, в предложенной модели по крайней мере учитывается регулярный *приток* энергии во Вселенную. Но модель в общем случае должна предусматривать и противоположный процесс – *отвод* избыточной энергии. Казалось бы, для черной дыры это неосуществимо по определению. Однако ситуацию меняют *внутренние* черные дыры, существующие в нашей Вселенной. Несколько десятилетий назад астрофизики обнаружили, что внутри нашей Вселенной в ядрах галактик расположены сверхмассивные черные дыры, суммарная энтропия которых на 20 порядков превышает суммарную энтропию всех прочих элементов Вселенной (см. [Egan and Lineweaver, 2009]). Расчеты показывают, что температура поверхности (т.е. горизонта событий) этих дыр практически равна абсолютному нулю, т.е. заведомо меньше средней температуры во Вселенной. Они являются идеальными и исключительно мощными поглотителями тепла. Учитывая все это, примем, что “оставшаяся часть” нашей Вселенной представляет собой не изолированную, но термодинамически *открытую* систему.

В качестве основания полагать, что *выходной* поток энтропии через нашу Вселенную *превышает* *входной* поток, можно высказать следующую гипотезу. Энтропия каждой внутренней черной дыры пропорциональна числу ее степеней свободы, т.е. безразмерной площади – числу ячеек планковского размера, уместяющихся на ее *поверхности*. Если наша Вселенная является черной дырой во *внешнем* 4-мерном мире, то ее энтропия пропорциональна числу планковских ячеек, заполняющих ее 3-мерный *объем*. С течением времени рост энтропии нашей Вселенной будет, следовательно, пропорционален 3-й степени роста ее размера, а убыль энтропии будет пропорциональна всего лишь 2-й степени роста среднего размера черных дыр. Однако вполне возможно, что при этом с течением времени растет и *число* черных дыр; если, например, оно пропорционально текущему объему Вселенной, то темп роста энтропии в ней будет уже *отставать* от темпа убыли энтропии. Следовательно, *отрицательная* разность энтропий будет нарастать, хотя для внешнего (по отношению к нашей Вселенной) наблюдателя полная энтропия будет увеличиваться.

В соответствии с вышесказанным, мы получаем веские предположения, что прогрессивная эволюция систем в нашей Вселенной (исключая внутренние черные дыры) обусловлена тем, что через эти системы проходят потоки отрицательной энтропии.

Эволюция изолированной и открытой системы

К эволюции состояния системы может приводить перераспределение энергии в результате взаимодействия. Связывая интенсивность и характер взаимодействий с текущим статистическим состоянием системы, мы приходим к описанию эволюции

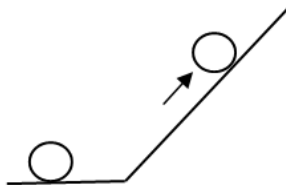
через механизмы положительной и/или отрицательной *обратной* связи, которые и определяют эту эволюцию.

Например, пусть изолированная система состоит из двух подсистем, каждая из которых в отдельности первоначально находится в состоянии теплового равновесия и характеризуется своей температурой. *Если* обе подсистемы обладают *положительной* теплоемкостью, то подсистема с более высокой температурой начнет отдавать тепло подсистеме с более низкой температурой, а температуры подсистем при этом будут *выравниваться*. Можно сказать, что такая система в целом охвачена контуром *отрицательной* обратной связи, который стабилизирует ее состояние при любом отклонении от состояния общего равновесия, т.е. максимизирует ее энтропию.

Напротив, *если* обе подсистемы обладают отрицательной теплоемкостью (например, звезды, температура которых не уменьшается, а *увеличивается* по мере излучения энергии), то в такой системе возникает контур *положительной* обратной связи, при котором отклонение системы от общего состояния равновесия может привести лишь к дальнейшему нарастанию этого отклонения. Впрочем, поскольку температура не может увеличиваться до бесконечности (так как энергия системы ограничена), наиболее общим случаем, видимо, является стабилизация состояния изолированной в целом системы (принцип Ле Шателье), т.е. ее приближение к состоянию теплового равновесия. Поэтому ее уделом действительно должна стать “тепловая смерть”.

Иное дело – *открытая* система, “включенная” в качестве промежуточного звена между источником и конечным поглотителем энергии. Энергия поступает в нашу систему от *внешнего* источника в общем случае *неравномерно*, создавая в ней локальные энергетические градиенты, т.е. выводя ее из состояния теплового равновесия. Если бы эффективный отвод энергии отсутствовал, то возникающие релаксационные потоки вернули бы нашу систему в равновесное состояние, однако наличие отвода энергии может обеспечить не только сохранение, но даже нарастание степени отклонения от состояния равновесия.

Наглядное представление о *необходимости* регулярного отрицательного потока энтропии для эволюции, связанной с удалением от состояния теплового равновесия, дает следующая иллюстрация. Положение системы в фазовом пространстве в состоянии равновесия сопоставим с шариком, лежащим у подножия горы (минимум энергии, максимум энтропии).

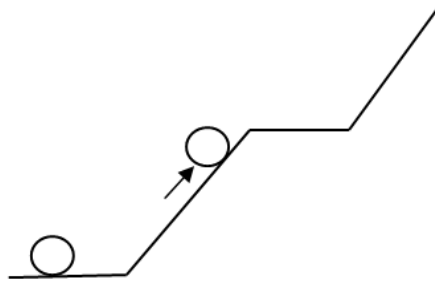


Если шарик регулярно “подталкивается” внешней энергией (как показывает стрелка), и средняя величина этой энергии достаточно велика, то он начнет взбираться на “энергетическую” горку, при этом потенциальная энергия системы будет возрастать, а ее энтропия - уменьшаться. Очевидно, характер (случайный или систематический) и необратимость подъема зависят от параметров процесса поступления энергии извне.

Таким образом, регулярный прирост отрицательной энтропии решает проблему удаления открытой системы от “тепловой смерти”, от состояния статистической

однородности. Но достаточно ли этого для повышения уровня *организованности*, упорядочения структуры материи?

На вышеприведенном рисунке связь между приращением потенциальной энергии системы и приращением ее энтропии оказывается линейной, а эволюция системы – обратимой. Стоит уменьшить энергию, накопленную системой, как эволюция пойдет вспять. Для организованных же систем характерно наличие *устойчивых* состояний, при отклонении от которых система так или иначе сопротивляется этой тенденции. При изменении потенциальной энергии энтропия таких систем (вследствие возникающих механизмов обратной связи) изменяется существенно *нелинейным* образом. Ниже приведена простая графическая иллюстрация такой возможности с *одним* промежуточным устойчивым состоянием в виде горизонтальной “полочки”, однако в действительности их может быть сколь угодно много, и форма их может быть существенно более сложной. Стабильность состояний может поддерживаться благодаря возникновению многообразных контуров обратной связи.



Смысл рассмотренной ситуации состоит в том, что нарушается основное допущение об априорной *равновероятности всех микросостояний*, вследствие чего основанная на таком допущении численная оценка вероятности некоторых особо важных *макросостояний* оказывается *неверной*. Этот тезис мы рассмотрим ниже на двух фундаментальных примерах – применительно к эволюции нашей Вселенной в целом, а также применительно к эволюции на Земле.

Эволюция нашей Вселенной

Эволюция нашей Вселенной бесспорно связана с усложнением ее состава, появлением элементарных частиц, а затем и атомов – сначала легчайших, а затем все более тяжелых химических элементов. Увлекательное описание космогенезиса можно найти во многих источниках (например, в широко известной книге [Weinberg, 1976]). Нам сейчас важно другое. *Почему* произошло то, что произошло? Точнее говоря, могло ли произойти нечто совершенно другое, в том числе – рождение чего-то достаточно хаотического, малоорганизованного, хотя бы и далекого от состояния равновесия?

Этот вопрос совсем не так бессмыслен, как кажется на первый взгляд. Оказывается, что целый ряд законов природы, особенностей устройства нашей Вселенной кажется исключительно тонко подогнанным к тому, чтобы она была именно такой и никакой иной. Численные значения многих безразмерных (то есть не зависящих от системы единиц) фундаментальных физических параметров, таких, как отношения масс элементарных частиц, безразмерные константы фундаментальных взаимодействий, кажутся не подчинёнными никакой закономерности. Однако выясняется, что если бы эти параметры отличались от

своих наблюдаемых значений лишь на *ничтожно малую величину*, то ни привычная нам Вселенная, ни разумная жизнь (в привычном нам понимании) не могли бы образоваться.

Эта проблема сформулирована и исследуется ведущими учеными с середины прошлого века, основные попытки ее преодоления получили общее наименование “антропный принцип”, см. [Википедия]. В одной из этих формулировок утверждается, что разных Вселенных существует множество, но только в такой Вселенной, как наша, существуют наблюдатели (то есть мы), которые и могут ее наблюдать.

Боюсь, что не только меня подобное объяснение совершенно не удовлетворяет. В действительности речь идет о гораздо более фундаментальных вещах, чем даже такая “тонкая” подгонка. Подумаем, например, какова “априорная” вероятность того, что в данном количестве материи все элементарные частицы сгруппируются в совершенно идентичные образования - атомы и молекулы? Эта вероятность, если руководствоваться только вторым началом термодинамики, неизмеримо мала. Более того, пока атомов еще не было в ранней Вселенной, какие основания были полагать, что одни те же химические элементы будут строго последовательно во времени возникать в безмерно удаленных друг от друга областях, заполняя еще несуществующую таблицу Менделеева? Казалось бы, не было таких оснований, базирующихся на каких либо весьма общих соображениях, хотя теперь (задним умом, так сказать) мы знаем замечательные законы квантовой механики, из которых все это следует. Следовательно, законы природы, наряду с механизмом всеобщей стабилизирующей обратной связи, предусматривают и некоторые другие схемы обратной связи, *выделяющие* некоторые устойчивые структуры и, соответственно, *запрещающие* другие их типы, о чем я говорил выше.

Что же происходит? Наша открытая система (Вселенная) регулярно получает энергию извне. За счет этого с течением времени энергетические градиенты в системе постоянно возрастают, накапливаются запасы потенциальной энергии (например, в ядрах галактик и в звездах)¹. По мере того, как это происходит, “изображающая точка” системы в фазовом пространстве продвигается все дальше и дальше от исходного положения, а на этом пути ее подстерегают “особые” точки и области, в которых действуют нетривиальные *правила отбора*. Действие этих правил отбора резко изменяет “априорные вероятности”, которые могли быть найдены без знания соответствующих правил.

Эволюция Земли

В предложенной модели наша Вселенная, будучи термодинамически *открытой* системой, как бы обдувается потоком “транзитной” энергии. Очень похожая модель справедлива и для системы более низкого уровня: энергия Солнца – фотоны видимого света (низкоэнтропийная форма) – поступает на Землю, а затем в виде инфракрасных тепловых фотонов (высокоэнтропийная форма) переизлучается в космос. При этом температура поверхности Солнца, излучающего

¹ Изменение внутренней энергии системы складывается из двух слагаемых – изменения тепла и изменения работы. Первое слагаемое отвечает неупорядоченной (*хаотической*) энергии отдельных степеней свободы, тогда как второе отвечает их *скоррелированной* энергии. Автор статьи [Brillouin, 1961] пишет: “Система, способная производить механическую работу (или работу за счет электрических сил), должна рассматриваться как источник негэнтропии; примерами таких систем могут служить свернутая спиральная пружина, груз, поднятый над землей, заряженная батарея.”

приходящие на Землю фотоны, достигает 6000°C , а температура космического пространства, поглощающего переизлученные фотоны, – несколько кельвинов, поэтому в результате через Землю проходит колоссальный поток *отрицательной* энтропии (негаэнтропии), см. [Penrose, 1989]. Таким образом, Солнце служит для нас мощным источником низкой энтропии (и соответствующей структурной информации²).

Заметим, что с течением времени на Земле накапливаются огромные запасы потенциальной энергии и высокоорганизованной материи (например, нефти и т.п.). Разумеется, такая схема в целом остается справедливой и для любой другой системы “звезда – планета”.

И снова работает та же схема прогрессивной эволюции, приведшая к появлению жизни на Земле (ее важным элементом является процесс фотосинтеза растений). Как известно, Шрёдингер [Schrodinger, 1955] сформулировал тезис о том, что *необходимым* условием существования жизни является приток в организм *отрицательной энтропии* (негаэнтропии), т.е. регулярная подпитка энергией, которая регулярно же превращается в полезную работу (хотя частично – и в бесполезное тепло) по обслуживанию потребностей организма: при этом для организма появляется *возможность* в течение длительного времени поддерживать состояние, далекое от состояния равновесия. Но это всего лишь возможность; каково же *достаточное* условие?

Хорошо известно, что банальные расчеты приводят к ничтожной “априорной” вероятности возникновения такой высокоорганизованной формы материи, как жизнь. Например, в беседе с известным эволюционистом Е. Куниным [Кунин, 2012] упоминается вероятность возникновения жизни в нашей Вселенной порядка $10^{-10^{18}}$, а затем говорится, что антропный принцип и идея бесконечной Мультивселенной (т.е. бесконечного числа реализованных вселенных) могли бы это, тем не менее, объяснить. Я, однако, отстаиваю иной подход: для того, чтобы жизнь возникла, требуется практически то же, что и для реализации таблицы Менделеева: *наряду* с регулярным потоком энергии и негаэнтропии должны существовать особые правила *отбора*, исключающие огромное количество бессмысленных (с телеологической точки зрения) комбинаций и *выделяющие* те (биологические) комбинации, которые в действительности и реализованы. Фактически эта мысль не нова, она отражает важнейшую концепцию современной биологии, связанную с именами Берга, Мейена, Любищева, Вавилова и других выдающихся ученых. Эти правила отбора нам пока практически не известны, однако в биологии собрано множество косвенных доказательств (например, закон гомологических рядов Вавилова), указывающих на нечто, очень похожее на биологический аналог таблицы Менделеева.

Развитие биосоциальных систем

Мы пока не знаем, как именно возникла жизнь на Земле, и какие именно живые (пред)организмы появились на ней первыми. Однако на определенных ступенях развития земной жизни появляются все новые типы сообществ, для которых действуют все те же общие закономерности: регулярный поток отрицательной энтропии и вступление в действие все новых и новых нелинейных правил отбора фазовых состояний. Действительно, Солнце неизменно продолжает посылать

² По моим оценкам, общая пропускная способность канала, по которому информация могла бы передаваться от Солнца к Земле, составляет приблизительно 10^{26} бит/с. При этом на передачу такого потока информации затрачивается более 10^7 Дж/с, или 10^{26} эв/с (общая мощность излучения Солнца на 20 порядков больше).

фотоны на Землю, хотя “пищевые цепочки” становятся все более длинными и изощренными, и на каждом новом уровне развития с течением времени возникают соответствующие организованные сообщества (от клеточных колоний до ООН), в которых благодаря *разделению функций* индивидуальное существование оказывается менее предпочтительным, чем коллективное. Ярким примером является разделение труда между людьми и связанная с этим дифференциация общества.

История эволюции человеческого общества известна нам гораздо лучше, чем история возникновения и развития жизни на Земле. В конечном счете, возникают уже не просто сообщества людей, но и сложные сообщества человеческих сообществ. Связи, коммуникации между людьми и сообществами прогрессируют нелинейно, обеспечивая повышение эффективности и глубину использования входного ресурса - энергии. Структура и динамика эволюции сообществ все более усложняется. Развиваясь, человечество накапливает знания (как мы отчетливо можем видеть, *экспоненциально растет его информационный ресурс*) и с их помощью получает доступ ко все более мощным источникам энергии. Видимо, неизбежен следующий этап – выход за пределы Земли и появление космических цивилизаций.

О законах природы

Как мы видели, эволюционные процессы связаны с существованием законов природы. Поиск и исследованием законов природы занимаются естественные науки. Не вызывает сомнения, что такие законы действительно существуют (например, закон Кулона или законы Ньютона). Однако вопрос о том, *что такое* законы природы, до сих пор считается скорее вопросом философии, нежели науки в конкретном ее понимании. Откуда, например, электрон “знает”, как ему себя вести? Почему все электроны ведут себя одинаково в том смысле, что описываются одними и теми же законами? Как законы природы закреплены в “ткани Вселенной”?

С одной стороны, понятно, что законы природы идеальны, а не материальны (они вечны и неизменны, им нельзя сопоставить пространственную или временную протяженность, с ними нельзя связать какое-то значение импульса или энергии). Да можем ли мы вообще претендовать на то, чтобы получить осмысленные ответы на поставленные вопросы – ведь, скажем, физика описывает только материальные системы.

С другой стороны, наш разум может попытаться ответить и на такие вопросы. Ни в коем случае не утверждая, что все обстоит *именно таким* образом, мы можем, тем не менее, придумать некоторые модели, которые подскажут нам, как все это *могло бы* быть устроено, т.е. позволят провести некоторые вполне содержательные рассуждения. В качестве такой модели, например, можно использовать довольно расхожий вариант, о котором, кажется, писал еще Станислав Лем. Вообразим себе суперкомпьютер, решающий множество задач высокой сложности. Аналогом “материи” в этой модели будут наборы данных, аналогом “процессов” – формирование наборов данных последовательно один из другого. “Принцип причинности” в модели будет проявляться в том, что применяя к набору данных А одну и ту же процедуру (т.е. запуская один и тот же “процесс”), мы *всегда* будем получать один и тот же результат в виде набора Б.

Вопрос “*Почему?*” в данной модели уже легко трансформировать в технический вопрос “*Как это устроено?*”. Ответ на этот вопрос состоит в том, что процессор (или группа процессоров) нашего компьютера, представляющий собой

метареальность по отношению к “материи” и “процессам” во внутреннем рабочем пространстве (памяти – на языке *метареальности*), устроен так, что в идеале всегда работает одинаково (по отношению к каждому акту преобразования данных). Процессы в *реальности* в принципе не могут повлиять на работу процессора в *метареальности*, как материальные структуры и процессы в нашей Вселенной не могут, по всей видимости, повлиять на законы природы, действующие в ней.

Свойства пространства и времени в нашей Вселенной также могут быть выведены из условий, заданных в *метареальности*. Например, трехмерность пространства может быть связана с организацией памяти в компьютере в виде трехмерного массива. Легко моделируется замкнутость пространства с помощью циклической организации индекса: $x[n+k]=x[k]$. Элементарная структура пространства определяется структурой ячеек памяти, и т.п.

Таким образом, законы природы, не подвластные пространственно-временным отношениям в нашей Вселенной, вполне могут представлять собой элементы *метареальности* и допускать модельное описание в рамках представлений об этой *метареальности* (например, с использованием представлений о *метавремени* и *метапространстве*). Более того, сама возможность использования содержательных *понятий* (и на этой основе развития науки) для описания поведения материальных систем также, с моей точки зрения, указывает на существование метареальности. Следовательно, моделирование метареальности становится предметом науки, а не исключительно философских спекуляций.

Литература

[Brillouin, 1961] Brillouin L. American Journal of Physics 29, 318 (1961). Русский перевод: Л. Бриллюэн. Термодинамика, статистика и информация, УФН, т. LXXVII, вып. 2, июнь 1962 г.

[Egan and Lineweaver, 2009] Ch. Egan and Ch. Lineweaver. A larger estimate of the entropy of the universe. ArXiv:0909.3983v1 [astro-ph.CO] 22 Sep 2009. См. русский перевод “Увеличенная оценка энтропии Вселенной” по ссылке http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Universe_entropy.pdf

[Penrose, 1989] Penrose Roger. The Emperor’s New Mind. Oxford University Press, 1989. Русский перевод: Пенроуз Р. Новый ум короля. Москва, УРСС, 2003.

[Smolin, 1994] Lee Smolin. The fate of black hole singularities and the parameters of the standard models of particle physics and cosmology (arXiv:gr-qc/9404011v1)

[Schrodinger, 1955] Schrodinger E. What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell. Русский перевод: Шредингер Э. Что такое жизнь? С точки зрения физика. М., Атомиздат, 1972.

[Weinberg, 1976] Weinberg S. The First three Minutes. A Modern View of the Origin of the Universe. Basic Books, Inc., Publishers, NewYork, 1976. Русский перевод: Вайнберг С. Первые три минуты. Современный взгляд на происхождение Вселенной. НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, Ижевск, 2000.

[Википедия] Википедия. Антропный принцип.

http://ru.wikipedia.org/wiki/%C0%ED%F2%F0%EE%EF%ED%FB%E9_%EF%F0%E8%ED%F6%E8%EF

[Кунин, 2012] А. Ершов. Суп из гвоздя. Беседа с Евгением Куниным.

<http://www.lenta.ru/articles/2012/11/30/koonin/>

[Шульман, 2011]. Шульман М.Х. Природа времени и равномерное расширение Вселенной. www.timeorigin21.narod.ru/rus_time/Universe_expansion_rus.pdf