
VI

Упорядоченность, неупорядоченность и энтропия

Nec corpus mentem ad cogitandum,
nec mens corpus ad motum, neque ad
quietem nec ad aliquid (si quid est)
aliud determinare potest.

Spinoza,
*Ethica. P. III, Prop. 2.*¹

55. *Замечательный общий вывод из модели Дельбрюка* Разрешите мне вернуться к последним фразам § 47. Там я пытался объяснить, что молекулярная теория гена сделала вполне допустимым то, что миниатюрный код точно соответствует весьма сложному и специфическому плану развития и каким-то образом содержит факторы, реализующие этот план. Но как он делает это? Как перейти от предположения к действительному пониманию?

Молекулярная модель Дельбрюка в ее совершенно общей форме не содержит, видимо, намеков на то, как действует наследственное вещество. И в самом деле, я не ожидаю, чтобы от физиков в ближайшем будущем могли быть получены сколько-нибудь подробные сведения. Определенные успехи в решении этой проблемы уже есть и, я уверен, что они еще будут, но в области биохимии, особенно в связи с ее проникновением в область физиологии и генетики.

Никаких детальных данных о функционировании генного механизма нельзя извлечь из столь общего описания его структуры, какое дано выше. Это ясно. И тем не менее, как это ни странно, имеется одно общее представление, вытекающее из него, и оно-то, признаюсь, было единственной причиной, побудившей меня написать эту небольшую книгу.

Из общей картины наследственного вещества, нарисованной Дельбрюком, следует, что деятельность живой материи, хотя и основана

¹Ни тело не может побуждать душу к мышлению, ни душа не может побуждать тело ни к движению, ни к покою, ни к чему-либо другому (если только есть что-нибудь такое). — *Спиноза. Этика*, ч. III, теор. 2.

на законах физики, установленных к настоящему времени, но, по-видимому, подчиняется до сих пор неизвестным другим законам физики, которые, однако, как только они будут открыты, должны будут составить такую же неотъемлемую часть этой науки, как и первые.

56. *Упорядоченность, основанная на «упорядоченности»* Эта довольно тонкая цепь рассуждений трудна для понимания во многих отношениях, и все последующие страницы посвящены тому, чтобы сделать ее ясной. Предварительно, грубо, но не совсем неверно она может быть изложена следующим образом.

В главе I мы указали, что законы физики, как мы их знаем, — это статистические законы². Они связаны с естественной тенденцией материи переходить к неупорядоченности.

Но чтобы примирить высокую устойчивость носителей наследственности с их малыми размерами и обойти тенденцию к неупорядоченности, нам пришлось «изобрести» молекулу — необычно большую молекулу, которая стала образцом высокодифференцированной упорядоченности, охраняемой волшебной палочкой квантовой теории. Законы случайности не умаляются этим «изобретением», но изменяется их проявление. Физик хорошо знает, что классические законы физики заменяются квантовой теорией, особенно при низкой температуре. Этому имеется много примеров. Жизнь представляется одним из них, особенно удивительным.

Жизнь — это упорядоченное и закономерное поведение материи, основанное не только на одной тенденции переходить от упорядоченности к неупорядоченности, но и частично на существовании упорядоченности, которая поддерживается все время.

Для физика (и только для него) я надеюсь пояснить свою точку зрения такими словами: живой организм представляется макроскопической системой, частично приближающейся в своих проявлениях к чисто механическому (по контрасту с термодинамическим) поведению, к которому стремятся все системы, когда температура приближается к абсолютному нулю и молекулярная неупорядоченность снимается.

Но нефизика трудно поверить, что обычные законы физики, которые он рассматривает как образец нерушимой точности, должны основываться на статистической тенденции материи переходить к неупоря-

² Такое совершенно общее утверждение о законах физики, возможно, покажется весьма сомнительным, но причина этого будет объяснена в главе VII.

доченности. Такие примеры я привел в главе I. Общим принципом здесь является знаменитое второе начало термодинамики (закон энтропии) и его столь же знаменитое статистическое обоснование. В §§ 57–61 я попытаюсь кратко изложить принцип энтропии в приложении к основным проявлениям живого организма, забыв на время все, что известно о хромосомах, наследственности и т. д.

57. *Живая материя избегает перехода к равновесию*

Что является характерной особенностью жизни? Когда мы считаем материю живой? Тогда, когда она продолжает «делать что-либо», двигаться, участвовать в обмене веществ с окружающей средой и т. д., — все это в течение более длительного отрезка времени, чем, по нашим ожиданиям, могла бы делать неодушевленная материя в подобных условиях. Если неживую систему изолировать или поместить в однородные условия, всякое движение обычно очень скоро прекращается в результате различного рода трения; разность электрических или химических потенциалов выравнивается; вещества, которые имеют тенденцию образовывать химические соединения, образуют их; температура выравнивается вследствие теплопроводности. Затем система в целом угасает, превращается в мертвую инертную массу материи. Достигается состояние, при котором не происходит никаких заметных событий. Физик называет это состояние *термодинамическим равновесием*, или состоянием максимальной энтропии.

Практически такое состояние обычно достигается весьма быстро. Теоретически очень часто это состояние еще не истинное равновесие, еще не действительный максимум энтропии. Окончательное установление равновесия происходит очень медленно. Оно может потребовать несколько часов, лет, столетий . . . Приведем пример, когда приближение к равновесию происходит все же достаточно быстро. Если стакан, наполненный чистой водой, и другой, наполненный подслащенной водой, поместить в герметически закрытый ящик при постоянной температуре, то сначала как будто ничего не происходит, возникает впечатление полного равновесия. Но через день становится заметным, как чистая вода вследствие более высокого давления ее паров постепенно испаряется и конденсируется на поверхности раствора сахара; последний переливается через край стакана. Только после того как чистая вода испарится полностью, сахар равномерно распределится по всему доступному ему объему.

Эти конечные этапы медленного приближения к равновесию ни-

когда не могут быть приняты за жизнь, и мы можем пренебречь ими здесь. Я упоминаю о них, чтобы оградить себя от обвинения в неточности.

58. *Питание*
«отрицательной
энтропией»

Именно потому, что организм избегает быстрого перехода в инертное состояние «равновесия», он и кажется загадочным. Настолько загадочным, что с древнейших времен человеческая мысль допускала действие в организме особой, какой-то не физической, а сверхъестественной силы (*vis viva*, энтелехия).

Как же живой организм избегает перехода к равновесию? Ответ достаточно прост: благодаря тому, что он питается, дышит и (в случае растений) ассимилирует. Для всего этого есть специальный термин — метаболизм. (Греческое слово *μεταβάλλειν* означает обмен.) Обмен чего? Первоначально, без сомнения, подразумевался обмен веществ (например, метаболизм, по-немецки *Stoffwechsel*³). Но представляется нелепостью, чтобы главным был именно обмен веществ. Любой атом азота, кислорода, серы и т. п. так же хорош, как любой другой атом того же элемента. Что же достигается их обменом? Одно время наше любопытство удовлетворялось утверждением, что мы питаемся энергией. В ресторанах некоторых стран вы могли бы найти карточки-меню, указывающие цену каждого блюда и содержание в нем энергии (калорий). Нечего и говорить, что это нелепость, ибо во взрослом организме содержание энергии так же постоянно, как и содержание материи. Каждая калория, конечно, имеет ту же ценность, что и любая другая, поэтому нельзя понять, чему может помочь простой обмен этих калорий.

Что же тогда составляет то драгоценное нечто, содержащееся в нашей пище, что предохраняет нас от смерти? На это легко ответить. Каждый процесс, явление, событие (назовите это, как хотите), короче говоря, все, что происходит в Природе, означает увеличение энтропии в той части Вселенной, где это имеет место. Так и живой организм непрерывно увеличивает свою энтропию, или, иначе, производит положительную энтропию и, таким образом, приближается к опасному состоянию максимальной энтропии, представляющему собой смерть. Он может избежать этого состояния, то есть оставаться живым, только постоянно извлекая из окружающей его среды отрицательную энтропию, которая представляет собой нечто весьма положительное, как мы сейчас увидим. Отрицательная энтропия — это то, чем организм

³Буквально — обмен веществ. — *Прим. перев.*

питается. Или, чтобы выразить это менее парадоксально, существенно в метаболизме то, что организму удается освободиться от всей той энтропии, которую он вынужден производить, пока жив.

59. *Что такое энтропия?* Разрешите сначала подчеркнуть, что это не туманное представление или идея, а измеримая физическая величина, совершенно такая же, как длина стержня, температура любой точки тела, скрытая теплота плавления данного кристалла или удельная теплоемкость любого вещества. При температуре абсолютного нуля (грубо -273°C) энтропия любого вещества равна нулю. Если вы будете медленно переводить вещество в любое другое состояние обратимыми небольшими этапами (даже если при этом вещество изменит свою физическую или химическую природу, распадется на две или большее число частей с различными физическими или химическими характеристиками), то энтропия возрастет на величину, которая определяется делением каждой малой порции тепла, затрачиваемой во время этой операции, на абсолютную температуру, при которой это тепло затрачено, и затем суммированием всех полученных величин. Например, когда вы расплавляете твердое тело, энтропия возрастает на величину теплоты плавления, деленной на температуру при точке плавления. Таким образом, вы видите, что единица измерения энтропии есть калория на градус (совершенно так же, как калория есть единица измерения тепла или сантиметр есть единица измерения длины).

60. *Статистическое значение энтропии*

Я привел это специальное определение для того, чтобы освободить энтропию от той атмосферы туманной загадочности, которой ее часто окружают. Гораздо более важна для нас связь энтропии со статистической концепцией упорядоченности и неупорядоченности, — связь, открытая Больцманом и Гиббсом на основе данных статистической физики. Она также является точной количественной связью и и ее можно выразить

$$\text{Энтропия} = k \lg D,$$

где k — так называемая постоянная Больцмана, равная $3,2983 \cdot 10^{-24}$ калорий на градус Цельсия; D — количественная мера неупорядоченности атомов в рассматриваемом теле. Дать точное объяснение величины D в кратких и специальных терминах почти невозможно. Неупорядоченность, которую она выражает, отчасти заключается в тепловом

движении, отчасти в том, что атомы и молекулы разного сорта смешиваются чисто случайно вместо того, чтобы быть полностью разделенными, как в недавно приведенном примере молекулы сахара и воды. Уравнение Больцмана хорошо иллюстрируется этим примером. Постепенное «распространение» сахара по всему объему воды увеличивает неупорядоченность D , и поэтому (поскольку логарифм D возрастает с увеличением D) возрастает и энтропия. Совершенно ясно, что всякий приток тепла извне увеличивает интенсивность теплового движения, то есть, иначе, увеличивает D и таким образом повышает энтропию. Что это именно так и есть, особенно наглядно проявляется тогда, когда вы расплавляете кристалл. При этом нарушается изящное и устойчивое расположение атомов или молекул и кристаллическая решетка превращается в непрерывно меняющееся случайное распределение атомов.

Изолированная система или система в однородных условиях (для наших рассуждений ее лучше учитывать как часть рассматриваемой системы) увеличивает свою энтропию и более или менее быстро приближается к инертному состоянию максимальной энтропии. Мы узнаем теперь в этом основном законе физики естественное стремление материи приближаться к хаотическому состоянию, если мы не препятствуем этому.

61. *Организация, поддерживаемая извлечением «упорядоченности» из окружающей среды*

Как в терминах статистической теории выразить ту удивительную способность живого организма, с помощью которой он задерживает переход к термодинамическому равновесию (смерти)? Выше мы сказали: «Он питается отрицательной энтропией», как бы привлекая на

себя ее поток, чтобы компенсировать этим увеличение энтропии, производимое им в процессе жизни, и таким образом поддерживать себя на постоянном и достаточно низком уровне энтропии.

Если D — мера неупорядоченности, то обратную величину $1/D$ можно рассматривать как прямую меру упорядоченности. Поскольку логарифм $1/D$ есть то же, что и отрицательный логарифм D , мы можем написать уравнение Больцмана таким образом:

$$-(\text{Энтропия}) = k \lg(1/D).$$

Теперь неуклюжее выражение *отрицательная энтропия* можно заменить более изящным: *энтропия, взятая с отрицательным знаком, есть сама по себе мера упорядоченности*. Таким образом, средство, при по-

мощи которого организм поддерживает себя постоянно на достаточно высоком уровне упорядоченности (равно на достаточно низком уровне энтропии), в действительности состоит в непрерывном извлечении упорядоченности из окружающей его среды. Это заключение менее парадоксально, чем кажется на первый взгляд. Скорее, оно тривиально. В самом деле, у высших животных мы достаточно хорошо знаем тот вид упорядоченности, которым они питаются, а именно: крайне хорошо упорядоченное состояние материи в более или менее сложных органических соединениях служат им пищей. После использования животные возвращают эти вещества в очень деградированной форме, однако не вполне деградированной, так как их еще могут употреблять растения. (Для растений мощным источником «отрицательной энтропии» является, конечно, солнечный свет.)