

Информация и физика

(22.01.2011. Обновлено: 18.02.2011)

Информация рассматривается как совокупность состояний некоторого устройства памяти. Обсуждаются закономерности распространения и копирования квантовой и классической информации, связь информации и энтропии с энергией, космологический аспект проблемы.

1. Сущность информации

В последнее время в физике стало модным чуть ли не всю ее выводить из информации (см., например, [Lee, 2010], [Whitworth, 2010]). С этим подходом не согласен, однако, такой авторитетный физик, как Н. Жизэн, который пишет [Gisin, 2004]:

Информация имеет физическую природу, но физика – это нечто большее, чем просто информация.

Я также не разделяю этой точки зрения и предпочитаю традиционный подход, в частности – вывожу энтропию из тяготения, а не наоборот (см. [Shulman, 2010]).

Известны очень многие и разнообразные подходы к определению понятия информации, однако все они, с моей точки зрения, не обладают необходимой универсальностью и полнотой. Между тем, практически любая информация в современном мире может быть (по крайней мере, теоретически) записана в памяти компьютера¹, так что возникает соблазн построить понятие информации именно на этой основе, используя представления, из которых в середине 20-го века исходил Алан Тьюринг.

Поэтому, выражаясь на языке физики, будем говорить, что информация – это *состояние* группы физических систем, такие системы мы называем элементами памяти. Понятие состояния подразумевает наличие известной стабильности во времени, что позволяет говорить о каждом состоянии достаточно однозначно и надежно отличать (по крайней мере, теоретически) каждое такое состояние от других. Таким образом, мы можем утверждать, что понятие “информация” неразрывно связано с понятием “память”. Трудно говорить об информации, которая тем или иным способом не была бы представима совокупностью состояний группы элементов, образующих некоторое *устройство памяти*.²

Переходя на формальный язык, мы можем говорить о конкретной информации (точнее, об *информационном сообщении*) как о том или ином подмножестве состояний некоторого (абстрактного) устройства памяти. Однако, чтобы *распознать* информацию, заключенную в этом подмножестве, нам необходим язык, связанный с организацией памяти.

¹ К числу устройств памяти можно отнести и квантовую память, содержащую *кубиты*, и аналоговые устройства для хранения непрерывных (т.е. не дискретных) величин.

² С определенной оговоркой в качестве памяти можно рассматривать даже всю нашу Вселенную в целом. Если, помимо нашей Вселенной, существуют и другие миры, то память может быть образована и совокупностью таких миров! Однако следует отметить, что если в нашей Вселенной мы предполагаем *материальность* всех объектов, т.е. их существование во времени и пространстве, применимость по отношению к ним понятия энергии и импульса, других физических характеристик, то абсолютно неясно, насколько это может быть справедливо для иных миров.

В простейшем случае мы имеем никак не упорядоченное базовое множество сходных элементов, и понятие информационного сообщения сводится просто к указанию числа выделенных элементов базового множества (т.е. скалярной меры подмножества). На этой основе строится как термодинамика, так и вся современная теория связи, основы которой заложили Шеннон и Котельников.

В более сложном случае мы можем задать на базовом множестве элементов некоторую структуру. Например, базовое множество может представлять собой 4-мерное евклидовое пространство, а информационное сообщение может представлять собой привязанное во времени указание о пространственном местоположении некоторой материальной точки. Подобное описание может представлять интерес, например, для функционирования системы управления транспортным потоком в реальном времени.

Еще более сложное описание информации используется, скажем, в современных языках программирования. Это – открытые языки порождающего типа, в них нет видимых ограничений на сложность объектов. Описание предусматривает возможность определения классов объектов, их свойств и связанных с ними процедур. Всегда возможно ввести новый тип (например, усложнив существующий, новое свойство и новую процедуру или, тем более, новый экземпляр существующего типа. Хрестоматийный пример состоит в задании матрицы пикселей экрана обычного компьютера (это – память), определении понятия точки (один пиксельный образ), ее свойства (цвет отображения на экране), процедуры ее перемещения по экрану с той или иной скоростью. На этой основе легко строится класс фигур (например, окружность), их свойств (например, радиус окружности), процедур для них (перемещение, пульсация и т.п.).

Ясно, что естественные языки (русский, английский и другие), используемые человеком, обладают сходными, хотя и гораздо более значительными возможностями. На этих языках мы можем строить все научные и общекультурные тексты, описывать как конкретные рутинные факты из обыденной жизни, так и самые фантастические или абстрактные идеи, даже не вписанные в пространственно-временной континуум.

Можно привести два *нетривиальных* примера языка иного происхождения, нежели человеческие языки. Первый – это биологический (генетический) код, с помощью которого описывается и воплощается все живое. Второй язык описывает известную нам “обычную” материю (т.е. не гипотетические и экзотические ее формы), ее структурные кирпичики (алфавит): электроны, протоны и т.д., а также законы их взаимодействия (синтаксис). Надо, правда, отметить, что оба этих языка мы только начинаем осваивать, и они – в настоящее время – характеризуются несравненно более высоким уровнем, чем уровень естественного языка.

Открытость естественного языка наводит на мысль о том, что его информационные возможности являются неограниченными. Однако, по моему мнению, это неверно. Приведенный выше пример с языком программирования экранных объектов дает основания думать, что некоторые абстрактные типы объектов/множеств не могут быть в нем описаны (ср. с теоремой Гёделя). Поэтому, как мне кажется, информационная мощь человеческого языка также ограничена некоторыми возможностями *метаязыка*, биологически заложенного в человеческом сознании.

Следует обратить внимание на следующее обстоятельство. Распознавание информационного сообщения опирается на использование какого-либо базового множества, т.е. фактически является *интерпретацией*. Одно и то же сообщение (сигнал, результат измерения и т.п.) может, с точки зрения разных субъектов,

характеризоваться совершенно различной интерпретацией или даже вообще не восприниматься ими. Более того, базовое множество может эволюционировать со временем, расширяя тем самым число возможных сообщений (так, общечеловеческая система культурных и научных представлений в 21-м веке гораздо шире, чем, например, 2000 лет назад, так что современники Иисуса Христа просто не смогли бы понять многое из того, что сейчас понимают школьники). Поэтому можно сказать, что всякая (конкретная) информация относительна и даже субъективна, т.е. является именно интерпретацией данного состояния устройства памяти. Однако в дальнейшем изложении мы не будем специально подчеркивать этот момент.

2. Распространение информации

Итак, под информацией мы условимся понимать состояние одного или группы элементов памяти, т.е. некоторой физической системы. Такое состояние можно рассматривать, как своего рода “вещь в себе”. Однако для человека-наблюдателя прагматический интерес представляет “вещь для нас”, т.е. распространение и извлечение информации в процессе взаимодействия физических систем.

Современная физика исходит из квантовомеханического описания поведения частиц. Согласно ему, при взаимодействии³ двух квантовых объектов *в общем случае* изменяется состояние обоих объектов, т.е. информация о состоянии может быть перенесена с одного объекта на другой, но при этом состояние исходного объекта изменяется. Дело в том, что такой перенос должен описываться в квантовой механике *линейным* оператором, но можно показать, что если исходный объект находился в *состоянии* суперпозиции базисных состояний, то такого линейного оператора не существует, т.е. новые состояния обоих объектов окажутся *запутанными*, не допускающими их определения по отдельности.

Однако существует замечательное исключение. Если исходный объект (скажем, электрон) находится не в состоянии суперпозиции, а в некотором *базисном* состоянии (например, проходит не *одновременно* через две *различные* щели, а только через одну щель с фиксированным расположением), то квантовая механика разрешает перенос информации о состоянии объекта на другой объект без изменения состояния. Как показано в работах В.Зурека⁴ и других исследователей, мы видим наш мир “классическим” по той простой причине, что распространяется информация только о *базисных* состояниях – при этом она не только копируется, но копируется *множественно* и достигает измерительных приборов наблюдателя с огромной избыточностью. В то же время информация о состояниях суперпозиции (например, об электроны, проходящем одновременно через две щели) исчезает (декогерирует) практически мгновенно и не может достичь измерительных приборов. По меткому замечанию автора одной статьи⁵, все состояния равны, но некоторые состояния “равнее” других. Именно эти выделенные базисные состояния определяют (в восприятии человека) классический образ мира.

³ С точки зрения квантовой механики процесс взаимодействия не ограничен расстоянием между двумя объектами, поэтому в случае достаточно больших расстояний говорят о “телепортации” состояния.

⁴ См., например, W. H. Zurek. Quantum Darwinism. arXiv:0903.5082v1 [quant-ph] 29 Mar 2009.

⁵ К моему глубокому сожалению, я не запомнил автора этой статьи, появившейся в Архиве в конце 2010 года и посвященной как раз обсуждаемой проблеме.

Что же отличает выделенные базисные состояния? Ведь с формальной точки зрения всегда можно перейти от одного ортогонального базиса к другому, изменив тем самым статус любого конкретного состояния. Дело, однако, в том, что выбор базиса физически определяется измерительным устройством. Человек является не абстрактным созерцателем бытия, а именно таким измерительным устройством, физические (физиологические) особенности восприятия и запоминания информации которого и определяют выделенный информационный базис. Очень похоже, что “наши” базисные состояния характеризуются *связностью* в пространстве и во времени – человеческое восприятие выделяет именно их. С другой стороны, такие несвязные запоминающие устройства, как голограмма, представляются нам весьма экзотическими.

Таким образом, распространение классической информации, столь для нас привычной и важной, в действительности оказывается возможным лишь как предельный случай действия квантовых закономерностей в особых случаях. Я думаю, именно этим вызвано стремление некоторых известных физиков объяснить загадочные для нас в настоящее время свойства человеческого мозга квантовыми факторами.

При этом, в отличие от квантовой информации, важнейшим свойством классической информации оказывается ее способность к *копированию*, тогда как вопрос о ее материальных носителях оказывается затушеванным и как бы отступает на задний план.

С другой стороны, в отличие от квантовой информации (мы упоминали выше, что квантовая механика не ограничивает расстояния между реально взаимодействующими объектами, например – двумя запутанными частицами), для классической информации возникает вопрос о предельной скорости ее распространения. Как известно, в 1905 году появилась теория относительности Эйнштейна, согласно которой такой предел (скорость света) существует. В частности, не существует твердого стержня достаточно большой длины, толкнув который, можно мгновенно передать сигнал на это расстояние (стержень соответствующим образом “укоротится”). Таким образом, возникает очень тяжелое противоречие между квантовой механикой и теорией относительности, по поводу которого Джон Белл сказал, что квантовые корреляции “прямо-таки вопиют об объяснении, а мы не можем его дать” (перевод мой – МХШ).

С моей точки зрения парадокс устраняется следующим образом. Передача классической информации осуществляется за счет переноса ее носителя, за счет перемещения некоторого количества энергии. В отличие от информации, передача которой всегда характеризуется направлением перемещения, корреляции в общем случае *не обязательно связаны с направленным распространением* (что и имеет место в квантовой теории и в экспериментах), т.е. с перемещением энергии. Но нулевое результирующее перемещение энергии не обязательно связано с нулевым *среднеквадратичным* значением энергии взаимодействия! В самом деле, существуют так называемые квантовые флуктуации электромагнитного поля, когда среднее значение напряженности поля равно нулю, а среднеквадратическое значение больше нуля (это подтверждается экспериментально на примере сдвига Лэмба). Можно представить себе, что подобные корреляции обеспечиваются сверхбыстрым *чисто переменным* процессом.

3. Информация и энергия

Ограничимся теперь информацией о физических системах в обычном (узком) понимании этого термина. В частности, нас будет интересовать связь между

информацией и энергией (а не, скажем, ответ на знаменитый вопрос “быть или не быть?”).

Наличие такой связи вытекает, прежде всего, уже из первого начала термодинамики, где фигурирует энтропия. Статистический смысл энтропии рассмотрим на простейшем примере. Пусть система содержит 4 элемента (которые можно рассматривать как элементы памяти), и каждый элемент может с равной вероятностью находиться в состоянии 0 или 1. Под состоянием всей системы будем понимать упорядоченную четверку состояний отдельных элементов, причем каждое конкретное состояние системы (микросостояние) – конкретная четверка характеризуется одной той же вероятностью реализации $p=1/16$ и одинаковой энтропией, равной $S_0=\log_2 16=4$. Нас будут интересовать *группы* таких состояний – *макросостояния*. Выделим три непересекающиеся группы: с одним (тремя), двумя и четырьмя *одинаковыми* элементами. Поскольку энтропия макросостояния равна сумме энтропий составляющих ее различных микросостояний, то она (эта сумма) в данном случае определяется просто численностью макросостояния. Поэтому *наименьшей* энтропией (наименьшей вероятностью) обладает макросостояние, в котором *все* четверки состоят из одинаковых элементов, т.е. максимально *скоррелированы* (если известно значение одного элемента четверки, то известны и все остальные).

| Число одинаковых элементов в группе | Микросостояния, входящие в группу (макросостояние) | Энтропия группы (макросостояния) |
|-------------------------------------|--|----------------------------------|
| 1(3) | 1000, 0100, 0010, 0001, 0111, 1011, 1101, 1110 | $8 S_0$ |
| 2 | 1100, 1010, 1001, 0110, 0011, 0101 | $6 S_0$ |
| 4 | 0000, 1111 | $2 S_0$ |

В общем случае термодинамическая энтропия определяется с учетом числа и статистического “веса” различных конфигураций системы.

Связь между информацией и энергией на элементарном уровне замечательно характеризуется принципом Ландауэра. В работе [Ландауэр, 1961] было показано, что минимальное выделение тепловой энергии при стирании 1 бита информации составляет $kT \ln 2$ (k – постоянная Больцмана, T – температура устройства). На практике это приводит к важному выводу: уменьшить рассеяние тепла в компьютерах можно за счет уменьшения их рабочей температуры.

В статье [Szilard and Wells, 1929] решение известного парадокса с участием демона Максвелла (который, вопреки второму началу термодинамики, извлекает энергию из равновесной системы, отделяя “быстрые” молекулы от “медленных”) было дано на основе определения количества информации как разности между двумя уровнями энтропии – до и после измерения скоростей молекул. В результате измерения (т.е. при получении информации) уровень энтропии понижается, поэтому информацию называют негаэнтропией, т.е. отрицательной энтропией. Решение парадокса состоит в том, что разделение молекул на “быстрые” и “медленные” не может быть “бесплатным”, оно требует затрат энергии на измерения (для получения соответствующей информации), заведомо не меньших, чем возможный ее выигрыш. Эти идеи были развиты другими многочисленными исследователями, в первую очередь – Л. Бриллюэном (см. [Brillouin, 1956, 1961]). В статье 1961 года Бриллюэн пишет:

Пусть процесс заключается в постановке эксперимента, способного обеспечить нас определенной информацией, и в последующем использовании этой

информации с целью уменьшить энтропию системы. Классическим примером, соответствующим схеме такого типа, является демон Максвелла. Однако глубокий анализ проблемы показывает, что если исходить от системы с равновесной плотностью и равновесной температурой, то количество негаэнтропии, потерянной в первой операции, всегда больше количества негаэнтропии, полученной обратно во второй операции. В целом весь переход подчиняется принципу Карно.

В этой же работе Бриллюэн указывает на важную взаимосвязь между информацией (негаэнтропией) и способностью системы производить механическую работу (т.е. наличием у нее потенциальной энергии):

Система, способная производить механическую работу (или работу за счет электрических сил), должна рассматриваться как источник негаэнтропии; примерами таких систем могут служить свернутая спиральная пружина, груз, поднятый над землей, заряженная батарея.

Первое начало термодинамики гласит, что 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, в соответствии с этим замечанием Бриллюэна, отвечает их скоррелированной энергии (например, энергии частиц, движущихся в одном и том же направлении). Поэтому лично я склонен в соответствующем смысле разделить понятия энтропии и информации – энтропия характеризует хаотические степени свободы, тогда как информация – упорядоченные степени свободы, их взаимную корреляцию.

Авторы посвященной проблеме связи между информацией и работой статьи [Levitin and Toffoli, 2011] пишут, понимая под информацией J разницу между фактической и максимальной энтропией системы (перевод мой - МХШ):

Было выдвинуто предположение ... , что существует общее соотношение между информацией и работой; а именно, что располагая любой информацией J относительно состояния физической системы, можно, позволив системе релаксировать к ее состоянию с максимальной энтропией, преобразовать в механическую работу количество тепла $W = kTJ$ без увеличения энтропии в окружающей среде. (Разумеется, вся информация J теряется в ходе этого процесса, поскольку система переходит в состояние теплового равновесия с той же самой энергией и тем же объемом, что и в исходном состоянии.)

Строго показав справедливость этого предположения в простейшем случае газов с двухатомными молекулами, они далее указывают:

Ситуация с эквивалентностью между информацией и работой в общем случае остается неясной и зачастую парадоксальной. С одной стороны, многие исследователи твердо убеждены в этом ... С другой стороны, по нашему мнению, отсутствует общепризнанное доказательство того, что любой вид информации может быть столь же успешно использован для преобразования тепла в работу любого типа Нам кажется, что корень проблемы заключается, в том, что, несмотря на многие бесспорные примеры “работы”, известные физикам, не существует общего строгого определения, которое позволило бы провести различие между этими двумя видами передачи энергии – теплоты и работы.

Говоря неформально, работа – это передача энергии с учетом информации (work is an “informed” transfer of energy), т.е. такая передача, при которой нам точно известно изменение состояния каждой степени свободы, происходящее в ходе этой передачи; в то же время теплота – это энергия, при передаче которой мы такими

сведениями не располагаем. С этой точки зрения эквивалентность между информацией и работой оказывается на самом деле тавтологией.

4. Информация и космология

В данной публикации я затрагиваю лишь самые общие вопросы физики. Поэтому я позволю себе обратиться к наибольшим масштабам времени и пространства, которые известны человечеству.

Общепринятое мнение физиков относительно Вселенной состоит в том, чтобы рассматривать ее как *замкнутую* систему. Однако это, как известно, приводит к глубоким противоречиям между теоретическими представлениями и практическим опытом.

Мною была выдвинута альтернативная концепция, согласно которой Вселенная представляет собой черную дыру во внешней гипер-Вселенной, извлекая из нее энергию и (за счет и по мере этого) расширяясь. Поэтому она является *открытой* системой и функционирует подобной тепловой машине. Подобно тому, как в системе “Солнце-Земля-Космос” Солнце выступает в качестве нагревателя, Земля – в качестве рабочего тела, а Космос – в роли охладителя, в *космологическом* масштабе роль нагревателя (источника энергии) играет внешняя гипер-Вселенная, а роль охладителя (стоков энергии) выполняют сверхмассивные черные дыры внутри галактик (их вклад в суммарную энтропию Вселенной на 20 порядков превышает вклад остальных объектов). Соответственно, энтропия нашей Вселенной *убывает* (а не растет), как неизменно убывает и энтропия Земли, “обдуваемой” регулярным потоком энергии от Солнца (вспомним, что для работы тепловой машины важно поддерживать устойчивую разность температур между нагревателем и охладителем).

Вышеописанные процессы представляется заманчивым трактовать как процессы накопления информации (точнее, негаэнтропии как меры статистической скоррелированности элементов систем) во Вселенной и на Земле, обеспечивающие в некотором смысле управление эволюцией этих объектов⁶. Это делает более убедительными “компьютероподобные” модели Вселенные, различные версии которых уже давно публикуются (см., например, [Berkovich, 1989]). Модель Вселенной как *открытой* системы снимает проблему “организации” такого (возможного) управления, поскольку допускает поступление энергии извне. С другой стороны, поскольку черная дыра не может излучать энергию вовне, обратный информационный поток оказывается невозможным (если только внутренние сверхмассивные черные дыры не контактируют с внешней гипер-Вселенной).

Благодарность

Я хочу высказать искреннюю благодарность Ю.А. Лебедеву за плодотворное обсуждение предварительной версии настоящей заметки. В частности, им было высказано глубокое замечание о динамике соотношения между естественным языком современного человека и “языком” Природы.

⁶ 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).

Ссылки:

[Berkovich, 1989] Simon Berkovich, "A possible explanation of quantum mechanics behavior by a classical cellular automaton construction", in M. Kafatos(ed.), Bell's Theorem, Quantum Theory, and Conceptions of the Universe, pp. 163-165, Kluwer Academic Publishers, 1989

[Brillouin, 1956] L. Brillouin. Science and Information Theory, Academic Press, Inc., New York, 1956 (см. русск. перевод: Л. Бриллюэн, Наука и теория информации. М., Физматгиз, 1960).

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

[Gisin, 2004] N. Gisin. Quantum gloves: Physics and Information. ArXiv:quant-ph/0408095v1 14 Aug 2004

[Landauer, 1961] Landauer, Rolf, "Irreversibility and heat generation in the computing process," IBM J Res. Devel. 5 (1961) p.p. 183–191. Русский перевод: Р. Ландауэр. Необратимость и выделение тепла в процессе вычисления. Квантовый компьютер и квантовые вычисления. Ижевск, 1999.

[Lee, 2010] Jae-Weon Lee. Physics from information. [arXiv:1011.1657](https://arxiv.org/abs/1011.1657)

[Levitin and Toffoli, 2011] Lev B Levitin and Tommaso Toffoli. Work recoverable from two-particle information. arXiv:1101.1325v1 [quant-ph] 6 Jan 2011. Русский перевод: Л. Левитин и Т. Тоффоли. Работа, извлекаемая из информации, содержащейся в двухчастичной системе. Доступно по ссылке

http://timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Work_from_correlations.pdf

[Szilard and Wells, 1929] Szilard L., H.G. Wells. "Über die entropieverminderung in einem thermodynamischen system bei eingriffen intelligenter wesen" ("On the decrease of entropy in a thermodynamic system by the intervention of intelligent beings"), Z Phys 53 (1929), 840–856.

[Shulman, 2009] М.Х. Шульман. Космология и метаболизм. Доступно по ссылке

http://timeorigin21.narod.ru/rus_time/Cosmology_and_metabolism_rus.pdf

М.Н. Shulman. Cosmology and metabolism. Available at

http://timeorigin21.narod.ru/eng_time/Cosmology_and_metabolism_eng.pdf

[Shulman, 2010] Шульман М.Х. Энтропия источника поля тяготения. Доступно по ссылке: http://timeorigin21.narod.ru/rus_time/Force_and_entropy_rus.pdf

М.Н. Shulman. Entropy of a gravitational force source. Available at:

http://www.timeorigin21.narod.ru/eng_time/Force_and_entropy_eng.pdf

[Whitworth, 2010] B. Whitworth. The emergence of the physical world from information processing. [arXiv:1011.3436](https://arxiv.org/abs/1011.3436)