

Концепции современного естествознания

Естественнонаучный аспект

Р. И. Храпко

Работа является методическим пособием по курсу «Концепции современного естествознания». Она включает в себя многие гуманитарные и мировоззренческие вопросы. Пособие отличается от других изданий этого типа подробным и оригинальным разбором многих актуальных проблем: экология, демография, ноосфера, квантовомеханическая неопределенность, стандартная космологическая модель, креационизм и др. Пособие состоит из двух частей.

1. Операционные определения

Составной частью научного метода является использование недвусмысленных понятий, вполне соответствующих природе, как говорят, адекватных. Культурный прогресс в большой степени заключается в выработке таких понятий. Адекватными понятиями являются, например, сила, масса, импульс тела, кинетическая энергия тела. Эти понятия были выработаны в 17 веке в работах Декарта, Лейбница, Ньютона и других. Они были выработаны вместо терминов типа "мера сохранения движения", "мертвая сила", "живая сила" и т.д.. В качестве примеров неадекватных понятий можно назвать мировой эфир, биополе.

Гарантию адекватности и недвусмысленности понятий предоставляет использование операционных определений [1]. Так называются определения, основанные на указании экспериментально воспроизводимой операции или процедуры измерения величины, соответствующей рассматриваемому понятию. Объективный результат измерения должен быть непосредственно доступен эмпирическому наблюдению.

Например, давая операционное определение времени, физики уклоняются от ответа на вопрос: "Что такое время?". Ответ на такой вопрос они оставляют метафизикам и философам. С физической точки зрения, время - это величина, значение которой равно показанию часов (часы предъявляются). Аналогично, расстояние - это величина, измеряемая радиолокатором (или интерферометром, или штангенциркулем). Естественно, операционное определение предусматривает разработку конструкции эталонного прибора, часов или интерферометра. И такая разработка часто поднимает очень глубокие проблемы. Однако физики с ними постепенно справляются.

Операционным определением интеллекта можно считать тест, предложенный Аланом Тьюрингом и позволяющий в принципе сказать, является ли данная машина "думающей". Идея Тьюринга состояла в том, чтобы вести с машиной переговоры. И если окажется, что лицо,

задающее вопросы, не в состоянии установить, общается оно с человеком или с машиной, и если на самом деле это была машина, то следует считать, что машина обладает интеллектом.

Наверно, можно сказать, что смысл операционного определения заключается в отождествлении двух английских эквивалентов русского слова "определение": definition и determination.

Прогресс, обеспечиваемый операционными определениями, виден на примере теории относительности. Она была создана Эйнштейном благодаря использованию операционного определения времени и отказу от понятия "эфира", поскольку, оказалось, невозможно дать ему операционное определение.

Важно, чтобы результат операции определения был объективным. Ученые признают в качестве факта только то, что может быть подтверждено независимыми наблюдениями. Например, пока отсутствует объективный способ проверки видения ауры, аура не включается в естественнонаучную культуру, а остается элементом гуманитарной культуры. "Если мы будем принимать любую белиберду, то от науки не останется ни следа", высказался по этому поводу академик А. Мигдал.

2. Инвариантность скорости света. Преобразования Галилея и Лоренца

Свет принципиально отличается от звука. Дело в том, что звук это колебания среды, например, воздуха, которые распространяются с некоторой скоростью V относительно этой среды. Поэтому можно двигаться со скоростью звука. Если наблюдатель будет двигаться со скоростью звука V , он увидит застывшую, неподвижную относительно него звуковую волну. Если наблюдатель будет двигаться со скоростью V' , меньшей, чем скорость звука, звуковая волна будет иметь относительно него скорость v' такую, что

$$v = v' + V.$$

Эта формула называется законом сложения скоростей.

В отличие от звуковых волн, электромагнитные волны не являются волнами возмущения какой-либо среды. "Эфира" не существует. И свет "не помнит" своего источника. Он просто распространяется, подчиняясь волновому уравнению со скоростью C . Поэтому вызывает затруднение вопрос, относительно чего скорость света равна C .

И вот тут удобно продемонстрировать черты естественнонаучной культуры, показать, как работает логика и возникает рабочая гипотеза. Действительно, если наблюдатели в различных, произвольно движущихся лабораториях все равноправны перед лицом света, значит, скорость света одинакова относительно любого наблюдателя в любом направлении. В этом проявляется принцип относительности. Согласно этому принципу не существует какого-то абсолютного наблюдателя. Движение любого наблюдателя можно заметить только относительно другого

наблюдателя. Операционный смысл принципа относительности в том, что какие бы опыты со светом ни ставил наблюдатель, он не сможет заметить движения своей лаборатории, не выглядывая в окно. Движение можно заметить и измерить только относительно другой лаборатории.

Принцип относительности лежит в основе специальной теории относительности.

Естественно, в теории относительности вместо выше приведенного закона сложения скоростей используется другая формула [2]:

$$v = \frac{v'+V}{1 + \frac{v'V}{c^2}}$$

Неизменность скорости света при переходе из одной лаборатории в другую оказалась возможной благодаря последовательному использованию операционного определения времени. Наиболее впечатляющим следствием принципа относительности является различие скорости хода времени в различных лабораториях, и даже разница во времени в различных местах одной и той же лаборатории. Был сделан вывод, что абсолютное время, которым, в частности, пользовался Ньютон, - ошибочная выдумка человека.

Более точно, если некоторое событие произошло в момент времени t' и имело координату x' в лаборатории с относительной скоростью V , то время и место этого события в лаборатории, считающейся основной, даются формулами

$$t = \frac{t' + x'V/c^2}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}, \quad x = \frac{x' + t'V}{\sqrt{1 - V^2/c^2}},$$

которые называются преобразованиями Лоренца. Говорят, что теория относительности перемешала пространство и время, введя новое понятие пространство-время. При малых скоростях, то есть когда $v/c \ll 1$, преобразования Лоренца переходят в простые преобразования Галилея с абсолютным временем:

$$t = t', \quad x = x' + vt'.$$

3. Зависимость массы от скорости

Наличие верхнего предела скорости потребовало изменения законов динамики, чтобы, например, исключить возможность превысить скорость света путем длительного ускорения тела. В релятивистской динамике¹ масса тела возрастает со скоростью [3]. Масса изменяется при переходе из одной лаборатории в другую в зависимости от импульса тела согласно тем же преобразованиям Лоренца:

$$m = \frac{m' + p'V/c^2}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}, \quad p = \frac{p' + m'V}{\sqrt{1 - V^2/c^2}},$$

¹ То есть учитывающей специальную теорию относительности.

Если тело покоится в лаборатории с относительной скоростью V , то есть $p' = 0$, то его масса равна массе покоя: $m' = m_0$. Отсюда получается знаменитая формула возрастания массы до бесконечности по мере приближения скорости тела к скорости света.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}, \quad p = \frac{m_0 V}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}.$$

Соответственно уменьшается ускорение. Рост массы при увеличении скорости тела находится в соответствии с эквивалентностью массы и энергии $E = mc^2$, как это видно из приближенной формулы

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} \cong m_0(1 + v^2/2c^2) = m_0 + \frac{m_0 v^2}{2c^2},$$

в которой $m_0 v^2 / 2$ - кинетическая энергия тела.

4. Геометризация гравитационной силы. Общая теория относительности

По идее А. Эйнштейна, оформленной в общую теорию относительности в 1916 году, гравитационная сила в действительности является силой инерции, такой, какая прижимает нас к задней стенке ускоренно движущегося вагона, а гравитационного поля вообще не существует [4]. Чтобы понять эту идею, надо использовать понятие четырехмерного пространства-времени, состоящего из событий. Событие это то, что произошло в каком-то месте в какой-то момент времени. Поэтому событие характеризуется координатами: x, y, z, t . График движения некоторой точки представляет собой линию в пространстве-времени и называется мировой линией. Мировая линия свободного тела, в частности, покоящегося - прямая, а мировая линия тела, на которое действует сила, искривлена.

Согласно идее Эйнштейна, тело, покоящееся на поверхности земли, испытывает только одну силу - реакцию опоры, направленную вверх. Поэтому его мировая линия искривлена. То есть оно постоянно испытывает ускорение, направленное вверх. И это несмотря на то, что радиальная координата тела постоянна, $r = Const$. Искривление такой мировой линии объясняется кривизной самого пространства-времени, окружающего мировую трубку Земли. Это можно понять, потому что параллели на поверхности Земли тоже искривлены, хотя все их точки равноудалены от экватора, который может рассматриваться аналогом мировой линии центра Земли.

Наоборот, мировая линия тела, свободно летящего над поверхностью Земли по параболе, является "прямейшей" линией, так называемой геодезической линией в искривленном пространстве-времени.

Другими словами, неподвижная лаборатория на поверхности Земли считается, согласно общей теории относительности, неинерциальной лабораторией, имеющей постоянное ускорение вверх. Этим и объясняется тот факт, что мы прижаты к полу. Мы прижаты к полу, как были бы

прижаты к задней стенке ускоренной ракеты.

Аналогично обстоит дело с орбитами спутников. В трехмерном пространстве они имеют форму эллипсов, то есть явно искривлены, и вогнутость их направлена внутрь орбиты. В четырехмерном пространстве-времени их мировые линии представляют собой спирали с довольно большим шагом. Из-за этого их искривление делается уже значительно меньшим. Если же учесть искривление самого пространства-времени, а оно таково, что вогнутость линий $r = \text{Const}$ направлена наружу, можно прийти в результате расчета к выводу, что спиралевидная мировая линия спутника не искривлена вовсе, как и должно быть у свободного тела.

Итак, общая теория относительности ликвидирует понятие гравитационного поля и заменяет его искривлением пространства-времени. Это называется "геометризацией гравитации". Только таким путем удастся объяснить тождественность инертной и гравитационной масс, то есть независимость ускорения свободного падения от природы тел. Основное уравнение общей теории относительности, тензорное уравнение Эйнштейна, связывает кривизну пространства-времени с массой вещества и полей (кроме гравитационного, которого нет).

В настоящее время общая теория относительности входит составной частью в теорию навигационных расчетов для космических кораблей.

Отметим принципиальное следствие общей теории относительности, касающееся пустого пространства. Если в некоторой вселенной нет вещества и полей, то такая вселенная, тем не менее, имеет право на существование. Больше того, поскольку, согласно уравнениям Эйнштейна, пространство-время такой вселенной не имеет кривизны, оно является плоским пространством-временем, введенным Германом Минковским. Оно представляет собой основное понятие специальной теории относительности.

5. Стандартная космологическая модель

А. Фридман в 1922 году применил общую теорию относительности Эйнштейна к вселенной в целом и пришел к выводу, что вселенная должна либо расширяться после Первородного взрыва, либо сжиматься вплоть до коллапса [5]. При этом вселенная представляет собой трехмерное пространство в среднем постоянной кривизны. В частности, вселенная может быть пространственно замкнута. Теория Фридмана была блестяще подтверждена в 1929 году, когда астроном Э. Хаббл открыл расширение вселенной. Он обнаружил, что окружающие нас галактики удаляются, причем скорость V удаления некоторой галактики пропорциональна расстоянию r до нее: $v = Hr$. Здесь $H = 25 \text{ км}/(\text{с} \cdot 10^6 \text{ св. лет})$ – постоянная Хаббла. Ее значение указывает на то, что первородный взрыв произошел примерно 10^{10} лет назад.

Если плотность вещества во вселенной больше некоторого критического значения, то она замкнута, и ее расширение должно впоследствии смениться на сжатие, заканчивающееся

коллапсом, после которого, возможно начало нового расширения. В этом заключается гипотеза пульсирующей Метавселенной. Если плотность вещества меньше критической плотности, вселенная расширяется неограниченно.

К сожалению, ученые не могут дать ответ на вопрос о возникновении Вселенной. Современная физика не умеет описывать так называемое сингулярное состояние вещества Вселенной, в котором оно, возможно, находилось при Первородном взрыве. Согласно теории Эйнштейна-Фридмана плотность вещества Вселенной в момент взрыва должна обращаться в бесконечность. Поэтому внутри небольшой временной окрестности Первородного взрыва состояние вещества Вселенной выходит за пределы существующих физических теорий из-за высокой температуры и плотности, поскольку отсутствует законченная квантовая теория гравитации.

Между тем уже сейчас физики представляют себе законы, которыми описывается Вселенная вне фантастически малой временной окрестности размером 10^{-43} сек. Тогда Вселенная имела размер 10^{-33} см, плотность ее массы была 10^{93} г/см (плотность воды 1 г/см), температура 10^{32} К. К моменту времени 10^{-5} сек в процессе расширения была достигнута ядерная плотность 10^{14} г/см. К этому моменту вселенная состояла главным образом из плазмы протонов, нейтронов, электронов и позитронов и была пронизана электромагнитным излучением. Позже, через 10^6 лет после Первородного взрыва при температуре 4000К, произошла аннигиляция позитронов с электронами, а избыточные электроны, оставшиеся после этой аннигиляции, соединились с протонами и нейтронами, образовав электронейтральные атомы водорода и гелия. Вещество вселенной при этом стало прозрачным для электромагнитного излучения (света). Говорят, что излучение отделилось от вещества. В процессе дальнейшего расширения Вселенной увеличивалась длина волны первородного излучения и понижалась его температура. Сейчас оно обнаружено и названо реликтовым излучением. Оно соответствует температуре 3К.

Неоднородность вещества вселенной привела, благодаря гравитационному притяжению, к образованию галактик, а затем и звезд, которые состояли из водорода и гелия. По мере уплотнения звезд повышалась их температура. Этот процесс похож на возвращение того состояния вещества, которое наблюдалось на более ранней стадии во вселенной в целом. При достижении температуры порядка 10^9 К, которая наблюдалась во вселенной примерно через сто секунд после первородного взрыва, началось слияние ядер водорода и гелия, то есть синтез ядер более тяжелых элементов, углерода, кислорода и др.

Выделение энергии при термоядерном синтезе приводило к повышению давления в недрах звезд и прекращению их дальнейшего сжатия. Состояние звезд стабилизировалось на время порядка миллиардов лет и зависящее от их массы. Звезды стабильно светили, и это предоставляло возможность для развития жизни в окружающем пространстве.

6. Молекулярный механизм жизни

В основе самовоспроизведения живых организмов лежит молекула дезоксирибонуклеиновой кислоты, ДНК. Она представляет собой очень длинную двойную цепочку, то есть две параллельно расположенные цепочки, звеньями которых являются несложные нуклеотиды четырех различных типов: А, С, G, Т, аденозин, цитозин, гуанин, тимин. Химическая формула, например, нуклеотида А такова: $C_9H_{14}O_6N_5P$ [6]. Нуклеотиды соединяются вдоль цепочек в произвольном порядке, однако находящиеся друг перед другом звенья различных цепочек спариваются между собой. Это придает молекуле устойчивость. При этом спариваются между собой обязательно А и Т либо С и G, так что содержание одной из цепочек однозначно определяет содержание другой.

Молекула ДНК содержит главную тайну жизни. И тайна эта была открыта Джеймсом Уотсоном и Френсисом Криком в небольшой заметке в журнале Nature от 25 апреля 1953 года. Молекула ДНК является записью всей информации об организме. Эта запись используется при синтезе белков, из которых состоит организм.

При размножении цепочки молекулы ДНК расходятся, спаривание нарушается, но нуклеотиды сразу же подбирают себе из окружающей среды комплиментарные нуклеотиды и спариваются с ними. Так из одной двойной цепи рождаются две ее копии.

Молекула ДНК является записью всей информации об организме. Эта запись используется при синтезе белков, из которых состоит организм. Грамматика записи следующая. Каждая тройка нуклеотидов из цепочки, называется "буквой" или кодоном. Она может являться кодовым знаком для одной из двадцати аминокислот, входящих в молекулы белка. Это и есть генетический код. Например, для аминокислоты под названием "аланин" с формулой $C_3H_7O_2N$ кодовым знаком является кодон GCA или GCC или GCG или GCT. Группа из нескольких подобных кодонов представляет собой "слово" или ген и является кодовым знаком для молекулы белка, которая содержит последовательность аминокислот, соответствующую последовательности кодонов. Например, ген из специфических 129-и кодонов кодирует белок лизоцим. Но некоторые кодоны в определенных условиях являются "промоторами", указывающими, где начинается ген, кодирующий данный белок. Кодоны TAA, TAG, TGA являются "терминаторами" указывающими на конец гена.

Процесс синтеза молекулы белка происходит в два этапа. Первый этап называется "транскрипция". Специальный фермент, "РНК-полимераза", находит промотор и, двигаясь от него вдоль цепочки до терминатора, снимает копию гена в виде "молекулы матричной рибонуклеиновой кислоты", м-РНК. Второй этап называется "трансляция". Его выполняет рибосома, весьма сложный агрегат, построенный из полусотни белков и молекулы рибосомальной РНК, р-РНК. Она подплывает к молекуле м-РНК и синтезирует белок согласно генетическому коду.

7. Состояние классической частицы. Аттрактор

В классической механике состояние частицы, размером которой пренебрегают, определяется ее координатами, скажем, x, y, z , и вектором импульса \mathbf{p} , то есть точкой в 6-мерном пространстве

$$\{x, y, z, p_x, p_y, p_z\}$$

(сокращенно - 6-пространстве), оно называется фазовым пространством. Состояние движущейся точки изменяется с течением времени, а изображающая ее точка описывает в фазовом пространстве фазовую траекторию. Например, $x = x_0 + p_x t / m, \quad p_x = \text{Const}$, является уравнением фазовой траектории равномерно движущейся точки, а

$$(x/x_m)^2 + (p_x / mx_m \omega)^2 = 1$$

есть уравнение фазовой траектории незатухающего осциллятора. Фазовой траекторией затухающего осциллятора является спираль. Точка, изображающая конечное состояние затухающего осциллятора, называется аттрактором. Эта точка не зависит от начальной энергии осциллятора. Если тело колеблется между двумя стенками, отражаясь от них поочередно, аттрактором, то есть конечной точкой, может оказаться любая точка между стенками при $P = 0$.

Состояние совокупности N частиц мы будем называть микросостоянием газа. Оно изображается N точками в фазовом 6-пространстве или одной точкой в фазовом $6N$ -пространстве.

8. Динамические и статистические законы. Микро- и макросостояние газа

Важный принцип, который свойствен фундаментальным физическим законам - их часто называют динамическими законами - называется обратимость во времени. По отношению к гравитации или процессу столкновения шаров этот принцип проявляется так. Пусть мы смотрим кинофильм о движении спутника или о столкновении и разлете двух шаров. Мы никак не сможем определить, движется пленка в прямом или обратном направлении. Оказывается, на уровне простых физических процессов нет различия между прошлым и будущим.

Однако, ситуация изменится, если мы рассмотрим более сложную систему, скажем, газ, состоящий из N молекул, помещенный в сосуд, мысленно разделенный на две половинки. В этом случае, наблюдая в кино, как молекулы собираются в одной из половинок, мы уверенно заключим, что пленка движется в обратном направлении, потому что мы знаем, что процесс выравнивания концентраций необратим во времени.

Для того чтобы понять, как обратимые во времени динамические законы приводят к необратимым во времени процессам, описываемым статистическими законами, следует использовать понятия о микросостоянии и макросостоянии некоторой сложной системы. Макросостояние газа это состояние газа описанное макроскопическим образом. В нашем примере оно характеризуется числом x молекул в одной половинке (и, соответственно, числом $N - x$ в другой).

Микросостояние характеризуется информацией о том, какие именно молекулы находятся в одной половинке. Естественно, одному макросостоянию газа соответствует громадное количество Γ микросостояний:

$$\Gamma = \frac{N!}{x!(N-x)!}$$

Число Γ называется статистическим весом макросостояния, Он пропорционален вероятности макро-состояния. Энтропией макросостояния называется величина

$$\sigma = \ln \Gamma \quad \text{или} \quad S = k \ln \Gamma,$$

где k - константа Больцмана.

Поскольку все микросостояния газа равновероятны, вероятность различных макросостояний очень сильно различается. Подавляюще большую вероятность имеет равномерное распределение молекул по половинкам, $N/2 + N/2$. Для того, чтобы предсказать изменение произвольного макросостояния $x + (N - x)$, надо учесть, что такое макросостояние распадается на три группы микросостояний:

- 1) Микросостояния, которые сразу эволюционируют к менее вероятному макросостоянию. Такие микросостояния составляют небольшой процент, поскольку менее вероятных макросостояний очень мало.
- 2) Микросостояния, которые получаются из первой группы заменой скоростей всех молекул на противоположные скорости. Из-за обратимости динамических законов такие микросостояния будут сразу эволюционировать к более вероятному макросостоянию. Количество этих микросостояний так же невелико, как в первой группе.
- 3) Подавляющее большинство микросостояний не будет сразу эволюционировать ни в ту, ни в другую сторону. Поэтому изменение скоростей молекул в этих микросостояниях не изменит их судьбу. А судьба их однозначна: постепенно они проэволюционируют к более вероятному макросостоянию, представленному громадным числом микросостояний; небольшое число путей к менее вероятному макросостоянию отрезано состояниями первой группы.

В результате энтропия макросостояния газа будет расти до максимального значения. В этом находит свое выражение статистический закон природы. Будущее отличается от прошлого в силу подобных законов.

9. Энтропия, вероятность, информация

Энтропия приписывается макроскопической системе до тех пор, пока не известно ее внутреннее строение. Примером такой системы может служить нераскрытая книга. Если эта книга, судя по весу (макроскопический параметр), содержит 500 страниц, то есть примерно миллион знаков (10^6), то связанная с ней энтропия равна примерно 4 миллионам. Это число

получается так. Печатные символы, то есть буквы, цифры, знаки препинания, общим числом 50, могут занимать в нашей книге 10^6 различных мест. Это означает $50^{(10^6)}$ возможных распределений. Число $\Gamma = 50^{(10^6)}$ аналогично числу микросостояний, Γ , которым может быть реализовано некоторое макросостояние газа. Оно выражает громадную неопределенность в отношении того, какую книгу мы держим в руках. С этим связана энтропия книги

$$\sigma = \ln \Gamma = \ln 50^{(10^6)} \cong -4 \cdot 10^6,$$

а вероятность угадать действительное расположение знаков в книге ничтожно мала

$$P = 1/\Gamma = 50^{-(10^6)}$$

(Логарифм этой вероятности

$$\ln P = -\sigma = -\ln 50^{(10^6)} \cong -4 \cdot 10^6$$

иногда называют негэнтропией). Поэтому огромна информация, содержащаяся в сообщении, какую именно книгу мы держим в руках, каково в действительности расположение знаков в ней.

Эта информация: $I = 1/P = \Gamma = 50^{(10^6)}$

10. Хаос и самоорганизация

Мы имеем дело с хаосом, когда состояние системы, сложной или простой, может изменяться в обширных пределах. Например, тепловое движение молекул газа изменяет микросостояние газа, захватывая большую область в $6N$ -мерном фазовом пространстве. Поэтому мы считаем, что молекулы газа ведут себя хаотически.

Состояние маятника без трения описывается в фазовом пространстве эллипсом, оно изменяется периодически. Этот эллипс совпадает с аттрактором маятника. Даже при большом размере фазовой кривой маятника нельзя считать, что она занимает большую область фазового пространства. Поэтому поведение маятников не хаотическое.

Отметим здесь, что характер колебания маятника без трения, его эволюция чувствительны к начальному состоянию. Начальное смещение и скорость определяют размер эллипса, и фазовые траектории при разных начальных условиях будут не сближаться и не удаляться друг от друга. А маятник с трением нечувствителен к начальным условиям. При любых начальных состояниях фазовые траектории сходятся к одному и тому же точечному аттрактору. И то и другое исключают хаос.

Хаотическое поведение молекул газа связано с тем, что микросостояние гиперчувствительно к начальному состоянию. Это означает, что при любом незначительном изменении скорости одной из молекул, фазовая траектория, тем не менее, изменится значительно, например, вследствие того, что молекула теперь избежит столкновения или, наоборот, столкнется с некоторой другой молекулой. При гиперчувствительности фазовые траектории, исходящие из

близко расположенных начальных точек, с течением времени расходятся. Следствием этого обычно является отсутствие регулярного аттрактора. Но даже если допустить наличие регулярного аттрактора, небольшое смещение в сторону должно направить гиперчувствительную систему по совершенно другой траектории, что и обеспечит обширность области фазового пространства.

Отсутствие регулярного аттрактора хаотической системы означает, что ее фазовая траектория более или менее равномерно заполняет всю доступную область фазового пространства, подходя как угодно близко к любой точке. Устремляя время наблюдения за системой к бесконечности, получают то, что называется фрактальным аттрактором.

Простой пример одномерной хаотической системы с фрактальным аттрактором дает сдвиг Бернулли [7]. В качестве состояния этой системы используется число между 0 и 1. Для изменения состояния число нужно удваивать, но после этого вычитать единицу каждый раз, когда оно оказывается больше единицы. В результате изображающие числа как угодно плотно заполняют интервал (0,1).

Заметим, что сдвиг Бернулли не обратим во времени. С самого начала он выделяет направление времени. Если мы рассмотрим обратный сдвиг Бернулли, то есть будем не умножать, а делить число, изображающее состояние, то мы получим точку 0 в качестве аттрактора. Симметрия во времени отсутствует уже на уровне уравнения движения. Этим сдвиг Бернулли отличается от динамических систем с обратимыми уравнениями движения.

Интересно, что в принципе состояние, подвергшееся произвольному числу сдвигов Бернулли, можно рассчитать. Точно так же в принципе возможен расчет эволюции микросостояния газа. Такие расчеты, однако, будут заведомо ошибочными, потому что, в силу гиперчувствительности, требуют недоступно высокой точности задания начального состояния и, соответственно, недоступной точности вычислений. При сдвигах Бернулли, например, два исходных числа, различающихся в тринадцатом десятичном знаке, то есть на 10^{-13} , будут различаться на 0,5 уже через 49 шагов. В результате следует признать, что хаотические системы, характеризующиеся гиперчувствительностью к начальному состоянию, принципиально не поддаются расчету.

Хаотическое изменение микросостояния газа обычно не затрагивает равновесное макроскопическое состояние газа, определяемое, скажем, давлением, температурой, в силу принципа не уменьшения энтропии макросостояния. В этом случае говорят о макроскопической устойчивости. Однако если рассматривается некоторая подсистема, то энтропия ее может уменьшаться, и при определенных условиях хаотическое поведение микросостояния может привести к хаотическому росту макроскопических флуктуаций, что может быть расценено как самоорганизация.

11. Примеры самоорганизации

Рассмотрим в качестве примера макроскопическую неустойчивость Бернара [7]. Речь идет о следующей системе. В тонком слое жидкости поддерживается разность температур между нижней, подогреваемой, поверхностью и верхней поверхностью, которая находится при комнатной температуре. При малой разности температур перенос тепла осуществляется за счет теплопроводности. Выше определенного порога разности температур тепло переносится за счет конвекции, т.е. молекулы участвуют в коллективных движениях, соответствующих вихрям, разделяющим слой жидкости на регулярные ячейки - вихри Бернара.

Предсказать конкретный результат самоорганизации первоначально однородной системы невозможно. Говорят, что вихри Бернара образуются случайно при росте флуктуаций вследствие положительных обратных связей. Так же случайно происходит выпадение орла или решки при подбрасывании монеты. Так же случайна самоорганизация атомов в простейшие молекулы ДНК, которая привела к жизни.

Уменьшение энтропии макро состояния вследствие хаотического поведения микросостояния необратимо, как и обычное увеличение энтропии, потому что хаотическое поведение всегда необратимо уже в силу гиперчувствительности к начальному состоянию, независимо от того, обратимы или необратимы во времени элементарные законы поведения компонентов макросистемы. Если изменить скорости всех молекул на противоположные, вихри Бернара все равно будут образовываться из флуктуаций. Так что "стрела времени", т.е. выделенное направление хода времени, т.е. необратимость времени, является простым следствием гиперчувствительности.

Макроскопическая самоорганизация не обязательно требует контакта с внешней средой, как это имело место в случае вихрей Бернара. Изолированная смесь водорода и кислорода может постепенно, даже без взрыва, самоорганизоваться в воду. Однородный первоначально газ за счет самогравитации может распасться на отдельные сгустки, если гравитационная энергия, выделяющаяся при образовании флуктуаций плотности, превысит кинетическую энергию хаотического теплового движения. Возможно, этот процесс привел к образованию галактик и звезд во Вселенной.

Примером макроскопической самоорганизации может служить естественный отбор. Пример отбора, причем даже не естественного отбора, а случайного отбора, дал в виде простой игры Манфред Эйген [6]. В игровой ящик кладут N различных пронумерованных шаров. Кроме того, имеется запас шаров, в котором каждый номер представлен N шарами. При игре из ящика достают случайно выбранный шар и либо удаляют его вообще, либо удваивают, то есть кладут обратно в ящик, добавив второй шар с тем же номером из запаса. Если удаление и удваивание шаров чередовать, то число шаров в ящике будет сохраняться, однако, в конце концов, там окажутся

шары только одного какого-то номера. Все остальные номера "вымрут". Причем никак нельзя предугадать заранее, какой номер победит.

12. Квантовомеханическая неопределенность

Квантовый мир, лежащий буквально у нас под носом, бросил человеческому интеллекту неотразимый вызов [8]. Чтобы разъяснить ситуацию, заметим сначала, что для расчета, например угла разлета бильярдных шаров, необходимо обработать не очень много информации. Опытный человек хорошо с этим справляется. Но если радиус шаров значительно уменьшить, та же точность расчета угла разлета потребует значительно большего объема информации, более точного определения координат и направления скорости шаров, потому что маленькие шарики гораздо чувствительнее больших к изменению их координат и направления скорости. Так вот оказалось, что природа не допускает бесконечного возрастания точности и объема информации, связанных с уменьшением размера частицы. Природа позволяет определять или задавать координаты и импульсы частиц лишь с некоторой неопределенностью. Произведение минимальных значений этих неопределенностей равно постоянной Планка h ,

$$\Delta x \cdot \Delta p_x = h.$$

Возможно, это обстоятельство связано с тем, что природе вообще чуждо понятие бесконечности. Придуманное интеллектом человека, склонным к абстрактному мышлению, это понятие может быть не адекватно природе.

Математически неопределенность координат и скоростей частиц проявляется в том, что состояние микроскопической частицы описывается не ее координатой и импульсом, как в классической физике, а так называемой волновой функцией, которая выражает размазанность частицы в нашем пространстве и в пространстве импульсов. Например, если с помощью светофильтров мы допускаем к нам только монохроматические фотоны, то импульс каждого фотона будет известен с небольшой погрешностью, $\Delta p_x \cong 0$. Зато координата фотона, а, значит, и время прилета почти совсем неопределенны, $\Delta x \cong \infty$. В соответствии с этим волновая функция монохроматического фотона

$$H = H_m \sin 2\pi(x/\lambda - t/T)$$

размазана по всему нашему пространству, но в пространстве импульсов она сконцентрирована вблизи точки $p_x = h/\lambda$, $p_y = p_z = 0$.

Если на пути нашего фотона расположен экран, фотопластинка, то фотон будет захвачен одним из атомов, который из-за этого превратится в ион за счет фотоэффекта. При этом неопределенность координаты фотона резко уменьшится. Она делается порядка размера атома, зато возникнет значительная неопределенность импульса, рассматриваемого как вектор. Говорят, что волновая функция *редуцировала*. Если при этом за фотопластинкой не велось наблюдение,

можно сказать, что квантовомеханическая неопределенность сменилась человеческой неосведомленностью.

Захваченный фотон запустит химическую реакцию, которая изменит цвет небольшой области. Можно приготовить усилитель, который это изменение усилит, так что в момент захвата загорится контрольная лампочка, и мы будем уведомлены о захвате фотона.

Следует знать, однако, что Э. Шредингер предложил в 1935 году знаменитый мысленный эксперимент, в котором наш усилитель не лампочку зажигает, а разбивает бутылку с цианистым калием и тем самым убивает кошку, сидящую в закрытой коробке. Шредингер утверждал, что, поскольку принципиально не определено, какой атом и когда захватит электрон, столь же принципиально не определен вопрос о жизни или смерти кошки. Другими словами, кошка находится между жизнью и смертью до тех пор, пока не будет подвергнута прямому наблюдению, что, конечно, парадоксально. На наш взгляд, Э. Шредингер неоправданно смешивал неопределенность и неосведомленность.

13. Волновая функция. Пространственное распределение квантовых частиц

Состояние квантовой частицы описывается не координатами и импульсом, которые объективно не известны, а волновой функцией [9]

$$\Psi(x, y, z, t).$$

Ψ -волны для частиц были предложены Луи де Бройлем в 1924. Волновая функция показывает, как состояние частицы "размазано" по фазовому пространству. Она позволяет, в частности, вычислить вероятность dP зарегистрировать частицу в элементе объема $dx dy dz$, независимо от импульса:

$$dP = \Psi \Psi^* dx dy dz,$$

или вычислить среднее значение какой-нибудь координаты, например, x :

$$\bar{x} = \int \Psi x \Psi^* dx dy dz.$$

Здесь Ψ^* - комплексно сопряженная волновая функция. Такую интерпретацию волновой функции дал Макс Борн в 1926 году. Таким образом, квадрат модуля, $\Psi \Psi^* = |\Psi|^2$, волновой функции можно рассматривать как плотность вероятности или как пропорциональную ей плотность частиц $\rho = \Psi \Psi^*$, то есть как функцию распределения в пространстве.

Для того чтобы привести пример волновой функции, рассмотрим электрон, ускоренный определенной разностью потенциалов и летящий вдоль оси x . Энергия E и импульс p такого электрона определены. Однако, в соответствии с соотношением неопределенности, координата его не определена. Поэтому состояние электрона изображается не точкой в фазовом 6-пространстве $\{x, y, z, p_x, p_y, p_z\}$, а плоскостью

$$p_x = \sqrt{2mE}, \quad p_y = 0, \quad p_z = 0.$$

Согласно идее де Бройля, состояние такого электрона в реальном пространстве описывается комплексной волной, у которой частота и длина волны могут быть найдены по формулам, относящимся к фотонам,

$$v = E / h, \quad \lambda = h / p, \quad \Psi = A \cdot e^{2\pi i(px - Et) / h}.$$

Для такой волновой функции $\Psi\Psi^* = Const$. Это и означает, что электрон равномерно размазан по нашему пространству.

В общем случае Ψ -волны подчиняются не волновому уравнению, а уравнению, полученному Эрвином Шредингером в 1925 году:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + U\Psi = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}.$$

Здесь $\hbar = h / 2\pi$, U - потенциальная энергия частицы, i - мнимая единица.

Для того чтобы рассмотреть частицу, локализованную в некоторой области пространства, надо использовать в качестве ее волновой функции не бесконечную гармоническую волну де-Бройля, а волновой пакет произвольной формы, например, с гауссовой огибающей, имеющей некоторую характерную длину Δx :

$$\Psi = A \cdot e^{-(x-vt)^2 / \Delta x^2} \cdot e^{2\pi i(px - Et) / h}.$$

Такая волновая функция не является монохроматической. Она содержит гармонические составляющие, расположенные вблизи волны де-Бройля $\lambda = h / p$ в интервале длин волн порядка

$$\Delta \lambda = \lambda^2 / \Delta x.$$

Это означает, что импульс такой частицы определен с погрешностью

$$\Delta p = \Delta(h / \lambda) = h / \Delta x,$$

и ее состояние в фазовом пространстве $\{x, p\}$ изображается областью размером

$$\Delta p_x \cdot \Delta x = h$$

в соответствии с соотношением неопределенности. При локализации частицы по всем трем координатам она будет занимать в фазовом 6-пространстве объем

$$\Delta p_x \Delta p_y \Delta p_z \Delta x \Delta y \Delta z = h^3.$$

Этот объем называется фазовой ячейкой.

14. Корпускулярная и континуальная концепция описания природы

Предположим, что пулемет обстреливает броневой щит с двумя близко расположенными отверстиями №1 и №2, так что часть пуль пролетает сквозь эти отверстия и попадает на экран, который мы будем рассматривать как наблюдательный [8]. Пролетающие через отверстия пули сильно рассеиваются и поэтому довольно равномерно покрывают значительную площадь экрана. Очевидно, что если I_1 - плотность потока пуль в некоторой точке экрана, проходящих через отверстие №1 (при закрытом отверстии №2), а I_2 - плотность потока пуль в той же точке экрана,

проходящих через отверстие №2 (при закрытом отверстии №1), то плотность потока пуль через оба отверстия будет равна

$$I = I_1 + I_2$$

Таков закон сложения двух потоков частиц или корпускул. Кроме того, в принципе возможен точный расчет траектории полета и места попадания на экран любой пули.

Рассмотрим теперь вместо пулемета источник волн на поверхности моря. Эти волны распространяются вплоть до заградительного ряда из барж, между которыми оставлены два близко расположенных прохода, проход №1 и проход №2. Волны, прошедшие через эти проходы, в конце концов, достигают наблюдательного экрана.

Рассматриваемые волны характеризуются отклонением H поверхности воды от равновесного уровня. H является функцией координат и времени и аналогична волновой функции квантовой механики. Она представляет собой бегущую волну, например, синусоидального вида:

$$H = H_m \sin 2\pi(r/\lambda - t/T).$$

Здесь r - расстояние до прохода, λ - длина волны, T - период колебаний.

Распространение волн, однако, значительно отличается от полета пуль. Во-первых, волновая функция H принимает отрицательные значения, потому что уровень воды отклоняется то вверх, то вниз. Во-вторых, плотность потока энергии волн зависит от квадрата волновой функции:

$$I \propto H^2$$

В-третьих, нельзя говорить, что волна прошла от источника до экрана либо через проход №1, либо через проход №2, как это было в случае пуль, волна использует оба прохода. Если закрыть один из проходов, волнение перед экраном изменится качественно, а не просто уменьшится вдвое, как в случае пуль. Волнение H_1 , возникающее, если открыт только проход №1, складывается с волнением H_2 , возникающим, если открыт только проход №2:

$$H = H_1 + H_2$$

Это называется суперпозицией. При этом образуются зоны, где суммарная волновая функция равна нулю:

$$H = H_1 + H_2 = 0$$

Это зоны спокойной воды, где отсутствует волнение, где одна волна погасила другую. Такое явление называется интерференцией. При интерференции складываются волновые функции, а не плотности потоков. Результирующая плотность потока может быть вычислена как квадрат суммарной волновой функции:

$$I \propto (H_1 + H_2)^2.$$

В частности, плотность потока равна нулю в зонах, где отсутствует волнение.

15. Интерференция света при квантовом рассмотрении

Электромагнитные волны, которые мы для краткости будем называть светом, на первый взгляд, похожи на морские волны. Мы снова рассмотрим конструкцию того же типа: источник освещает непрозрачный экран с двумя близко расположенными отверстиями, №1 и №2, за которым находится наблюдательный экран. На этом экране наблюдается интерференционная картина. Однако при уменьшении интенсивности света становится очевидно, что интерференционная картина распадается на отдельные вспышки. Если наблюдательный экран покрыт светочувствительным слоем, он постепенно покрывается черными фотографическими зернами. Это происходит потому, что свет распространяется и поглощается порциями. Эти порции называются квантами света или фотонами. Атомы светочувствительного слоя, захватывая порции света, возбуждаются и при проявлении становятся зародышами фотографических зерен.

Квантование света использовал Планк, занимаясь тепловым излучением и доказал Эйнштейн, объяснив фотоэффект. Энергия фотонов равна

$$\varepsilon = h\nu$$

а импульс фотонов

$$p = h/\lambda$$

$h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка, ν - частота света, λ - длина волны.

Задолго до Эйнштейна, во времена торжества волновой теории света, только Ньютон с прозорливостью гения последовательно отстаивал корпускулярную теорию света, несмотря на полную невозможность совместить ее с результатами интерференционных опытов.

Интерференция фотонов действительно не может быть объяснена в том смысле, что не существует аналогичного явления в знакомом нам макроскопическом мире вещей.

Если закрыть отверстие №2, интерференционная картина исчезнет. Магнитная составляющая H электромагнитной световой волны, прошедшей через отверстие №1, делается примерно одинаковой в различных точках экрана. Соответственно, экран будет равномерно покрываться фотографическими зернами. В этом не было бы ничего удивительного. Однако после открывания отверстия №2 фотоны перестанут попадать в те места, где суммарная волновая функция $H = H_1 + H_2 = 0$, несмотря на то, что отверстие №1 по-прежнему остается открытым. Невозможно понять, каким образом фотоны могут гасить фотоны.

Однако самые удивительные явления возникают, если свет заменить потоком электронов [8]. Оказывается, электроны создают примерно такую же интерференционную картину, как фотоны. Другими словами, электроны, как и фотоны, могут интерферировать друг с другом, в частности, гасить друг друга. Больше того, выяснилось, что все элементарные частицы ведут себя подобным удивительным образом. Для того чтобы рассчитывать подобные явления ученые и создали квантовую механику.

16. Вещество и поле. Принцип Паули

Материя представлена в мире двумя типами: вещество и поле [9]. Материя обоих типов квантована, то есть, разбита на порции. При этом кванты могут вращаться вокруг своей оси. Соответствующий момент количества движения кванта называется спином s . Единицей измерения спина служит величина \hbar . Кванты вещества, то есть частицы, имеют полуцелый спин: $s/\hbar = 1/2, 3/2, \dots$, и, в свою очередь, разбиты на два типа: 1) легкие или лептоны (электроны, позитроны, нейтрино, мюоны), 2) тяжелые или барионы (протоны, нейтроны, гипероны). Кванты поля, иногда тоже называемые частицами, имеют целый спин, $s/\hbar = 0, 1, 2, \dots$. Это глюоны, мезоны и электромагнитные кванты с энергией $h\nu$.

Внутренняя структура лептонов неизвестна, а барионы и некоторые мезоны состоят из кварков, которые являются частицами вещества. Нейтроны n и протоны p состоят из троек кварков: $n = udd$, $p = uud$, а π -мезон – из кварка и антикварка: $\pi^+ = u\bar{d}$. Заряды u -кварка и d -кварка равны соответственно $+2/3$ и $-1/3$ заряда электрона. Заряды антикварков противоположны по знаку.

Частицы с полуцелым спином подчиняются запрету Паули: все они должны отличаться друг от друга состоянием.

Взаимное притяжение трех кварков друг к другу можно для наглядности объяснить, приписав кваркам "цвета", например, красный, желтый, синий, имея в виду, что нейтральная цветовая комбинация, получающаяся при сложении этих цветов, имеет наименьшую потенциальную энергию так же, как наименьшую энергию имеет нейтральная комбинация электрических зарядов в электродинамике. Антикваркам приписываются дополнительные цвета: оранжевый, зеленый, фиолетовый.

17. Распределения Максвелла-Больцмана и Ферми-Дирака

Точки, изображающие состояния классических частиц в фазовом 6-пространстве, распределены по этому пространству не равномерно, а согласно распределению Максвелла-Больцмана [2]. Вероятное количество точек в элементе $dx dy dz dp_x dp_y dp_z$, пропорциональное вероятности найти частицу в состоянии, соответствующем этому элементу, равно

$$dN = A \cdot e^{-E/kT} dx dy dz dp_x dp_y dp_z.$$

Здесь $E = p^2 / 2m + U(x, y, z)$ - сумма кинетической и потенциальной энергии частицы в этом состоянии, A - нормировочная постоянная, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, T - температура. При $T = 0$ все частицы покоятся там, где потенциальная энергия минимальна.

При совместном рассмотрении N электронов, находящихся, например, в куске металла

объемом V , надо учитывать, что каждую ячейку фазового пространства размером h^3 может занимать только одна пара электронов со спинами противоположной ориентации [9]. Поэтому, в отличие от молекул газа, электроны не могут при $T = 0$ все оказаться в состоянии с $E = 0$, как следует из распределения Максвелла-Больцмана. Их фазовые ячейки занимают все положения с возможно меньшей энергией, заполняя, в первом приближении, шар такого радиуса в импульсном пространстве, чтобы в нем как раз поместились ячейки всех N электронов. Радиус этого шара, p_m , определяется из соотношения:

$$\frac{4}{3} \pi p_m^3 V / h^3 = \frac{N}{2}.$$

Это значит, что при $T = 0$ электроны занимают все возможные энергетические уровни от нулевого до максимального, $E_m = p_m^2 / 2m$, который называется энергией Ферми $E_m = F$. Для реальных металлов энергия Ферми весьма велика, по сравнению с энергией теплового движения при комнатной температуре. Поэтому при $T \neq 0$ тепловую энергию получают электроны, занимающие в фазовом пространстве тонкий слой вблизи F . Распределение электронов в металле получено Ферми и Дираком. Оно заменяет распределение Максвелла-Больцмана и выглядит:

$$dN = \frac{2}{h^3 (e^{(E-F)/kT} + 1)} dx dy dz dp_x dp_y dp_z.$$

Поэтому частицы вещества называются фермионы.

18. Связанное состояние фотонов

Сравнительно недавно ученые научились, используя нелинейные кристаллы, уменьшать частоту электромагнитных волн вдвое. С квантовой точки зрения фотоны при этом разделялись на две равные части. При этом направления полета фотонов и их поляризация оставались в большой степени неопределенными. Однако, по закону сохранения импульса, направление полета одного из этих фотонов определяло направление другого. Точно так же поляризации этих фотонов оказывались связанными друг с другом.

Связанные состояния квантовых частиц давно рассматриваются учеными, потому что с ними связан квантовомеханический парадокс, придуманный в 1935 году А. Эйнштейном, Б. Подольским, Н. Розеном. В оригинале в этом парадоксе фигурируют не фотоны, а протоны. Однако в последнее время именно на фотонах демонстрируются различные варианты этого парадокса.

Пусть два связанных фотона разлетаются по закону сохранения импульса в противоположных направлениях. При этом из-за того, что энергия и импульс фотонов известны с высокой точностью, их радиальные координаты и момент времени разлета не определены. Момент импульса фотонов точно равен нулю. Поэтому не определена угловая координата фотонов.

Другими словами, не определено направление, вдоль которого они разлетаются в разные стороны. Важно понимать, что *не определено* – это значит, сами фотоны не знают, как они летят. Направление разлета выясняется только при регистрации одного из фотонов. А это может произойти через десятки тысяч лет на краю Галактики. Тем не менее, второй фотон должен быть зарегистрирован на другом краю Галактики на строго противоположном направлении. Каким образом второй фотон, направление полета которого объективно не определено до момента регистрации первого, может узнать, на каком направлении ему следует зарегистрироваться, это уму непостижимо! Но природа каким-то образом умудряется соблюдать одновременно и закон сохранения импульса, и запрет теории относительности на передачу сигналов со сверхсветовой скоростью, и законы формальной логики, и ограничение на объем информации! Эйнштейн отметил, что такое поведение природы нельзя сопоставить ни с какой "реалистической" моделью из обыденной действительности. Возможно, это глубокое замечание Эйнштейна как раз и означает, что люди не в состоянии понять квантовую механику.

Список литературы

1. Философский словарь. – М.: ИПЛ, 1981.- 447 с.
2. Савельев И.В. Курс физики. Том 1. – М.: Наука, 1989.- 351 с.
3. Храпко Р.И. Что есть масса? // Успехи физических наук. – 2000, № 12.- с.1363-1366.
4. Храпко Р.И., Спириин Г.Г., Разоренов В.М. Механика. – М.: МАИ, 1993.- 80 с.
5. Новиков И.Д. Эволюция вселенной. – М.: Наука, 1979.- 176 с.
6. Эйген М., Винклер Р. Игра жизни. – М.: Наука, 1979.- 93 с.
7. Пригожин И., Стенгерс И. Время, хаос, квант. – М.: Прогресс, 1994.- 266 с.
8. Фейнман Р. Характер физических законов. – М.: Мир, 1968.- 232 с.
9. Савельев И.В. Курс физики. Том 3. – М.: Наука, 1989.- 302 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Храпко Радий Игоревич, доцент кафедры физики Московского государственного авиационного института (технического университета), к.ф.-м.н. E-mail: khrapko_ri@hotmail.com