

История статистической термодинамики

Е. Б. Рудный, ©, 2023-2024, blog.rudnyi.ru/ru

Читать онлайн: [Термодинамика](#)

v1.0, 23.12.2024

Содержание

| | |
|---|----|
| Эволюция взглядов Людвиг Больцмана на характер молекулярно-кинетической теории...2 Парадокс обратимости Лошмидта, теорема Пуанкаре о возвращении и парадокс Цермело. Н-теорема, переход к статистической интерпретации энтропии, космологическая флуктуационная гипотеза. | |
| Стрела времени по Больцману..... 7 Приведено современное изложение объяснения стрелы времени по Больцману из книги Пенроуза. Обсуждается, что подход Больцмана по-прежнему ограничен случаем идеального газа. | 7 |
| Рудольф Карнап: Два эссе об энтропии..... 11 Карнап, индуктивная логика и энтропия в статистической механике. Разногласия Карнапа с физиками (фон Нейман и Паули) по поводу интерпретации энтропии - энтропия в физике для Карнапа объективна. | 11 |
| И. Р. Пригожин: Конец определенности..... 15 Пригожин о необратимости и законах физики. Время становится фундаментальной величиной; стрела времени вводится путем отказа от траектории микросостояния и переходу к плотности вероятности. | 15 |
| Теорема о равномерном распределении энергии против атомизма 19-ого века..... 19 Расхождения между предсказаниями теоремы о равномерном распределении и экспериментальными значениями теплоемкостей. Рассмотрена история появления теоремы и обсуждение расхождений Больцманом и Кельвином. | 19 |
| Демон Максвелла и броуновское движение против второго закона.....26 Максвелл введением демона хотел показать статистический характер энтропии. Исследование броуновского движения изменило отношение физиков. Смолуховский предложил натурализацию демона Максвелла. | 26 |
| Теодор Сведберг и существование молекул..... 31 Описание работ Теодора Сведберга, которые нередко считаются первым подтверждением теории броуновского движения Эйнштейна. На самом деле это не так. По материалам статьи Милтона Керкера. | 31 |
| Признание реальности молекул в начале 20-ого века..... 35 Обсуждение признания физиками реальности атомов. По материалам книги Смита и Сета 'Броуновское движение и действительность молекул'. Критерий эмпирического обоснования теории физики ван Фраассена. | 35 |
| Излучение черного тела и появление неразличимых частиц.....40 Неразличимость частиц из уравнения Планка для плотности энергии черного тела при создании квантовой статистики неразличимых частиц. Метафизики об онтологии неразличимых частиц. | 40 |
| Леон Бриллюэн: Наука и теория информации..... 45 Обсуждение книги. Анализ пути Бриллюэна от термодинамической энтропии к негэнтропийному принципу информации. Критика интерпретации термодинамической энтропии как информационной энтропии. | 45 |
| История появления информационной физики..... 51 Краткая информация по истории становления информационной физики из диссертации Хавьера Анта. Информатизация термической физики. Золотой век информационной физики. | 51 |

Эволюция взглядов Людвиг Больцмана на характер молекулярно-кинетической теории

Парадокс обратимости Лошмидта, теорема Пуанкаре о возвращении и парадокс Цермело. Н-теорема, переход к статистической интерпретации энтропии, космологическая флуктуационная гипотеза.

Создание молекулярно-кинетической теории во второй половине 19-ого века было связано с поиском объяснения природы теплоты, поскольку доказательство эквивалентности теплоты и работы привело к отказу от теории теплорода. Это обстоятельство хорошо подчеркивает название работы Рудольфа Клаузиуса 1857 года: *‘О роде движения, которое мы называем теплотой’*. Но последующее развитие молекулярно-кинетической теории привело к когнитивному диссонансу — в основе теории лежат законы физики, обратимые во времени, и в то же время целью теории является объяснения тепловых явлений, протекание которых невозможно обратить.

Тепловой контакт между горячим и холодным телом приводит к передаче теплоты от горячего тела к холодному и дальнейшему достижению теплового равновесия; при этом передача теплоты от холодного тела к горячему запрещена вторым законом термодинамики. Вначале предполагалось, что такое поведение можно будет объяснить в рамках молекулярно-кинетической теории, но дальнейшее рассмотрение вопроса привело к осознанию двух парадоксов: парадокс механической обратимости Иоганна Лошмидта и парадокс возврата, связанный с теоремой Анри Пуанкаре о возвращении. Последний парадокс носит названия парадокса Эрнста Цермело, поскольку Цермело выдвинул это возражение в обсуждении с Больцманом.

Людвиг Больцман (1844 -1906) являлся ведущей фигурой в развитии теории. Поэтому интересно проследить трансформацию его взглядов. Изначально Больцман был уверен в возможности строгого обоснования существования необратимых процессов в рамках молекулярно-кинетической теории. По ходу обсуждения парадоксов он изменил свою позицию и перешел к статистическому обоснованию второго закона. Молекулярно-кинетическая теория превратилась в статистическую механику и понятие вероятности стало применяться к состоянию всей системы. Космологическая флуктуационная гипотеза Больцмана явилась завершающей стадией и она показывает возникающие трудности при трактовке понятия *‘вероятность состояния системы’*. Ниже перечислены ключевые работы Больцмана в ходе эволюции его взглядов.

Первая статья Больцмана *‘О механическом смысле второго начала механической теории теплоты’* вышла в 1866 году, когда ему было 22 года. Введение статьи показывает, что Больцман не сомневался в возможности достижения поставленной цели:

‘Целью данной статьи является изложение чисто аналитического,

полного и всеобщего доказательства второго начала теории теплоты, а также нахождение соответствующего ему начала механики.’

Отмечу, что рассмотрение в статье ограничено предположением, что траектории атомов замкнуты. После этой работы Больцман занимался поиском наилучшего доказательства распределения Максвелла молекул по скоростям. Важно было показать, что распределение Максвелла получается из любого начального состояния. Первое решение было предложено в 1872 году в статье *‘Дальнейшие исследования теплового равновесия между молекулами газа’*. Больцман вывел уравнение, которое стало в будущем называться кинетическим уравнением Больцмана и которое описывает эволюцию газа, находящегося в неоднородном состоянии. Параллельно Больцман ввел функцию (в этой статье использован символ Y) и доказал для нее известную H-теорему. Согласно теореме производная H-функция отрицательная и достигает нуля только при достижении в газе распределения Максвелла. Таким образом H-функция с обратным знаком подходит на роль энтропии системы:

‘Таким образом, строго доказано, что, каково бы ни было начальное распределение живой силы, по прошествии очень длительного времени она всегда стремится к распределению, найденному Максвеллом. То, что мы проделали до сих пор, есть не что иное, как математический прием, использованный для строгого доказательства теоремы, которая до сих пор не была точно сформулирована.’

Именно H-теорема стала предметом дальнейших обсуждений. Первое возражение связывается со статьей Лошмидта 1876 года (парадокс механической обратимости Лошмидта). Лошмидт — старший коллега Больцмана и между ними всегда были дружеские отношения. Также следует отметить, что Лошмидт являлся сторонником молекулярно-кинетической теории и он один из первых оценил число молекул газа, находящихся в одном кубическом сантиметре (число Лошмидта).

Основное разногласие между Лошмидтом и Больцманом касалось распределения температуры в столбе газа, находящегося под действием силы тяжести. Больцман показал, что в рамках молекулярно-кинетической теории температура должна оставаться постоянной по всей высоте, а Лошмидт с этим не соглашался. В его статье, посвященной этой проблеме, было в том числе предложено обратить скорости атомов в системе, достигнувшей равновесного состояния. Согласно законам механики в этом случае система должна начать удаляться от равновесия и таким образом H-функция должна была начать возрастать, что было запрещено согласно H-теореме.

Конечно, такое действие нельзя осуществить практически, но речь шла о математическом доказательстве, основанном на законах механики. Поэтому с точки зрения математического рассмотрения проигнорировать замечание Лошмидта было невозможно. В результате Больцман пересмотрел свои взгляды

и дал новую статистическую интерпретацию энтропии в статье 1877 года *‘О связи между вторым началом механической теории теплоты и теорией вероятностей в теоремах о тепловом равновесии’*.

Эту работу можно считать переходом от молекулярно-кинетической теории к статистической механики. В ней появляется известное уравнение Больцмана для энтропии системы с вероятностной интерпретацией — равновесное состояние газа наиболее вероятно. Предполагается, что наблюдаемой макросистеме соответствует много разных микросостояний и что число микросостояний пропорционально вероятности наблюдения данной макросистемы:

‘Если применить эти рассуждения ко второму началу, то величину, которую мы привыкли обозначать как энтропию, можно отождествить с вероятностью соответствующего состояния. ... Система тел, о которой мы говорим, в начальный момент времени находится в некотором определенном состоянии; благодаря взаимодействию между телами это состояние изменяется; согласно второму началу это изменение всегда должно осуществляться так, что полная энтропия всех тел возрастает; в соответствии с нашей теперешней интерпретацией это означает не что иное, как то, что вероятность общего состояния этих двух тел становится все большей; наша система тел всегда переходит от некоторого менее вероятного к некоторому более вероятному состоянию.’

В данном случае возникает следующий вопрос. В конечном итоге считается, что наблюдаемое поведение газа связано с единственной системой, поведение которой во времени детерминировано и определяется уравнениями механики. Таким образом, требуется охарактеризовать поведение H -функции при произвольном выборе начального состояния системы. Эти вопросы в дальнейшем в том числе обсуждались на страницах журнала *Nature* в 1894-1895 гг. В данном случае важно отметить статью С. Г. Бэрбери (S.H. Burbury), кто обратил внимание, что гипотеза о столкновении молекул, лежащая в основе кинетического уравнения Больцмана и H -теоремы (молекулярный хаос, *Stosszahlansatz*), не является обратимой во времени. Другими словами, первоначальный вывод теоремы содержал гипотезу, которая не совместима с обратимыми законами механики.

В конце 1890-х годов произошло обсуждение между Больцманом и Цермело в связи с теоремой Пуанкаре о возвращении. Было доказано, что замкнутая механическая система, находящаяся в произвольном состоянии, через определенное время вернется в состояние, практически не отличающееся от первоначального. Это поднимало новые вопросы о поведении H -функции во времени и явилось одной из причин для выдвижения космологической флуктуационной гипотезы Больцманом. Ниже цитаты из статьи 1897 года *‘О статье г-на Цермело О механическом объяснении необратимых процессов’*. Больцман сравнил состояние Вселенной с равновесным состоянием газа и

предположил:

‘Тогда во Вселенной (которая в противном случае повсюду находилась бы в тепловом равновесии, т. е. была бы мертвой) то тут, то там имеются относительно небольшие участки порядка масштаба нашей звездной системы (мы будем называть их отдельными мирами), которые в течение относительно небольших по сравнению с эоном промежутков времени значительно отклоняются от теплового равновесия, а именно, среди этих миров одинаково часто встречаются состояния, вероятности которых возрастают и уменьшаются.’

Возникновение отдельных миров соответствует возрастанию и последующему убыванию H -функции, но при этом Больцман хотел рассматривает обе линии симметричным образом. Для этого он постулировал, что время не связано со Вселенной как таковой — время появляется только у живых существ и это время неразрывно связано с убыванием H -функции (возрастанием энтропии) в обоих направлениях:

‘Таким образом, для Вселенной в целом два направления времени являются неразличимыми, так же как в пространстве нет верха и низа. Но точно так же, как мы в некотором определенном месте земной поверхности называем «низом» направление к центру Земли, так и живое существо, которое находится в определенной временной фазе одного из таких отдельных миров, назовет направление времени, ведущее к более невероятным состояниям, по-другому, чем противоположное (первое как направленное к «прошлому», к началу, последнее — к «будущему», к концу), и вследствие этого называния будет обнаруживать «начало» для этих малых областей, выделенных из Вселенной, всегда в некотором невероятном состоянии.’

См. также: [Мозг Больцмана в равновесной Вселенной](#)

В заключение отмечу, что нередко самоубийство Больцмана в 1906 году объясняют травлей Больцмана со стороны темных сил. В данном случае следует сказать, что научная карьера Больцмана сложилась удачно. Его работы при его жизни приобрели широкую известность и у него не было проблем со стороны университетов. По случаю шестидесятилетия Больцмана было запланировано издание юбилейного сборника и 117 ученых со всего мира прислали свои статьи. Интересно отметить, что даже идейный противник Больцмана Эрнст Мах в честь юбилея прислал статью ‘*Объективное представление интерференции поляризованного света*’.

В то же время здоровье Больцмана ухудшалось и у него периодически были сильные депрессии. Карло Черчиньяни в книге ‘*Людвиг Больцман: человек, который доверял атомам*’ считает, что можно только гадать, что случилось в последние дни жизни Больцмана, и предлагает свой спекулятивный сценарий с просьбой не воспринимать его всерьез:

‘Если бы это был роман или трагедия, автор мог бы вообразить, что чтение статьи Эйнштейна об эквивалентности массы и энергии убедило Больцмана в тщетности его жизненных попыток доказать реальность атомов. Разве не было одним из принципов энергетике то, что все является энергией? Разве Больцман не утверждал, как мы видели в главе 11, что энергетика не сможет объяснить массу в терминах энергии? Возможно, автор трагедии мог бы также представить, что сразу после того, как Больцман покончил с собой, на сцену выходит персонаж, несущий копию предыдущей статьи Эйнштейна о броуновском движении, в которой доказывалось, что существование атомов может быть доказано экспериментально.’

Информация

Гельфер Я. М., *История и методология термодинамики и статистической физики*, 2-е изд., 1981, Часть третья. *Синтез термодинамики и молекулярно-кинетической теории. Возникновение и развитие статистической физики.*

Carlo Cercignani, *Ludwig Boltzmann : the man who trusted atoms*, 1998.

Uffink, Jos, *Boltzmann's Work in Statistical Physics*, The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Summer 2022 Edition), Edward N. Zalta (ed.) First published 2004; substantive revision 2014.

Обсуждение

<https://evgeniirudnyi.livejournal.com/359358.html>

Стрела времени по Больцману

Приведено современное изложение объяснения стрелы времени по Больцману из книги Пенроуза. Обсуждается, что подход Больцмана по-прежнему ограничен случаем идеального газа.

Статистическое объяснение Людвиг Больцмана о появлении стрелы времени в рамках обратимых законов механики остается популярным до настоящего времени. Уровень классической механики является недостаточным для рассмотрения атомов и молекул, но уравнения квантовой механики также симметричны во времени и переход на этот уровень не дает решения проблемы стрелы времени. Поэтому достаточно часто ограничиваются рассмотрением проблемы в рамках классической статистической механики в квазиклассическом приближении. В некоторой степени это обстоятельство поддерживает в ходу наглядную картину летающих бильярдных шаров.

Ниже рассмотрено использование этого подхода в книге Роджера Пенроуза *‘Мода, вера, фантазия и новая физика Вселенной’*, после чего будут обсуждены границы использования этого объяснения.

‘Что же в таком случае представляет собой эта «мера энтропии»? Грубо говоря, мы подсчитываем все возможные различные субмикроскопические состояния, которые могли бы образовать конкретное макроскопическое состояние, и их число N является мерой энтропии макроскопического состояния. Чем больше оказывается N , тем больше энтропия.’

‘В сущности, это и есть знаменитое определение энтропии, которое дал в 1872 году великий австрийский физик Людвиг Больцман.’

‘лучше всего вновь обратиться к формализму фазового пространства ... фазовое пространство P некоторой физической системы концептуально представляет собой пространство, обычно содержащее огромное число измерений, и каждая точка такого пространства соответствует полному описанию субмикроскопического состояния (допустим, классической) физической системы, которую мы рассматриваем.’

‘Теперь, чтобы определить энтропию, нам потребуется собрать вместе — в единую область, именуемую регион крупнозернистого разбиения, — все те точки в P , в которых мы полагаем значения всех макроскопических параметров одинаковыми. Таким образом, все P будет разделено на такие крупнозернистые области. ... Следовательно, фазовое пространство P будет делиться на такие регионы, и можно сказать, что объем V подобного региона позволяет оценить, сколько существует вариантов заполнения данного макроскопического состояния различными субмикроскопическими состояниями в границах данного региона крупнозернистого разбиения.’

‘Для того чтобы оценить, как это помогает понять второй закон, важно прочувствовать, сколь колоссально могут различаться по размеру различные области крупнозернистого разбиения, по меньшей мере в ситуациях, которые встречаются на практике. Логарифм в формуле Больцмана вкупе с чрезвычайной малостью k [константы Больцмана] в обычных масштабах несколько маскирует всю беспредельность таких различий объема. Поэтому легко упустить тот факт, что крошечная разница в энтропии по факту соответствует просто огромной разнице объемов пространств с крупнозернистым разбиением. ... Поскольку несравнимо более крупному объему соответствует обычно лишь чуть более высокая энтропия, мы уже примерно представляем себе, почему энтропия будет неуклонно возрастать с течением времени. Именно этого и следует ожидать согласно второму закону.’

Изложение Пенроуза выше близко к выводам Больцмана в статье 1877 года; разница только в замене числа микросостояний объемом фазового пространства, содержащем эти микросостояния. Пенроуз однако знаком с историей обсуждения предложения Больцмана и поэтому он затем переходит к проблеме появления низкоэнтропийного состояния.

‘Асимметрия во времени возникает лишь потому, что сам вопрос, который мы задаем в отношении системы, по сути асимметричен, а именно: мы хотим выяснить вероятное поведение системы в будущем, исходя из ее актуального макроскопического состояния.’

‘Однако давайте посмотрим, что произойдет, если мы переформулируем вопрос, обратив время вспять. Допустим, имеется макроскопическое состояние со сравнительно низкой энтропией ... Теперь давайте поинтересуемся не тем, что, скорее всего, произойдет с водой в будущем, а тем, в результате каких прошедших событий могла возникнуть такая ситуация. ... повторив те же рассуждения, которые успешно описывали ход времени из прошлого в будущее, мы, вероятно, придем к выводу о том, что наша точка с гораздо большей вероятностью проникнет из значительно более обширного объема, чем из более мелкого, – то есть из состояния с более высокой энтропией, а не с более низкой.’

‘Разумеется, это прямо противоречит второму закону, поскольку мы, кажется, только что пришли к такому выводу: если бы мы отправились в прошлое, то энтропия вокруг неуклонно стала бы возрастать. Иными словами, анализируя любую ситуацию с достаточно низкой энтропией, мы бы с огромной вероятностью обнаружили, что ранее в природе действовал закон, обратный второму закону термодинамики!’

Это часть рассмотрения Пенроуза аналогична флуктуационной гипотезе Больцмана (см. [Мозг Больцмана в равновесной Вселенной](#)). Важно отметить, что в данном случае происходит переход к космологии — предполагается, что

наблюдатель является частью рассматриваемой изолированной системы. Поскольку самое вероятное состояние такой системы равновесное, делается вывод, что маловероятное неравновесное состояние произошло из равновесного состояния.

Космологи убирают ветвь из второй части рассмотрения Пенроуза посредством ‘гипотезы о прошлом’ — предположении, что в момент большого взрыва энтропия была минимальной, что просто убирает вторую ветвь из рассмотрения. С другой стороны, есть последователи флуктуационной гипотезы Больцмана, когда стрела времени связывается с особенностями восприятия человека — человеческое время тождественно возрастанию энтропии. Для примера, ниже несколько цитат из книги физика Рудольфа Пайерлса ‘*Сюрпризы в теоретической физике*’ (раздел *Необратимость*).

‘Теперь мы займемся одним из самых фундаментальных вопросов статистической механики, ответ на который известен давно, но недостаточно ясен широкому кругу физиков, по-видимому, даже сегодня. Это — вопрос об истинном происхождении необратимости в статистической механике.’

‘Можно предположить, что эти факты каким-то образом связаны со способом функционирования нашего мозга, но мы не умеем объяснить природу этой однонаправленности.’

‘«Стрела времени» оказывается свойством нашего мозга.’

Проблемы с субъективностью энтропии связаны с вероятностным подходом, — все зависит от истолкования появления вероятности при рассмотрении поведения детерминированной системы. Я не буду на них останавливаться, только отмечу наглядность объяснения стрелы времени по Больцману. По всей видимости поэтому авторы научно-популярных книг его используют. Так, в книге Шона Кэррола ‘*Вечность. В поисках окончательной теории времени*’ рассмотрение стрелы времени проведено аналогичным образом, как в книге Пенроуза, правда, в отличие от Пайерлса Кэрролл отстаивает объективность энтропии.

С другой стороны, важно отметить, что подход Больцмана ограничен рассмотрением идеального газа. Проведение в жизнь программы, озвученной Пенроузом выше, на практике требует перехода от фазового пространства всей системы к фазовому пространству отдельной частицы. Так сделано в статье Больцмана и, насколько я знаю, нет других путей подсчета числа микросостояний или объема соответствующего фазового пространства. В то же время переход к фазовому пространству отдельной частицы ограничен случаем идеального газа, поскольку в данном случае необходимо предположение, что энергия системы является суммой энергий частиц.

Таким образом наглядность объяснения стрелы времени по Больцману на

практике связано с сильными ограничениями. Можно представить себе такую возможность в принципе, но на практике использовать ее невозможно. При этом в общем случае отсутствуют не только средства для вычисления необходимого фазового объема, а отсутствует путь, который позволил бы провести подобное вычисление даже в принципе.

В статистической механике используют метод ансамблей Гиббса, который позволяет выйти за рамки идеального газа. Рассмотрению изолированной системы по Больцману соответствует микроканонический ансамбль, в котором для равновесного состояния идеального газа получается сопоставимое выражение для энтропии. Проблема в том, что энтропия по Гиббсу не меняется во времени в ходе достижения равновесного состояния. Требуются специальные ухищрения для введения другой энтропии, которую можно было бы связать со стрелой времени. Наглядность изложения теряется и это, по-видимому, является причиной, почему авторы научно-популярных книг предпочитают подход Больцмана.

В заключение про гравитацию. Классическая термодинамика не содержит гравитации, поэтому использование понятия энтропии для вселенной требует изменения формализма классической термодинамики. Положение в статистической термодинамике не лучше. Подход Больцмана ограничен идеальным газом, а при использовании ансамблей практически всегда используется предположение об аддитивности энергии рассматриваемых подсистем. К сожалению, космологи обычно обходят это обстоятельство стороной.

Информация

Роджер Пенроуз, *[Мода, вера, фантазия и новая физика Вселенной](#)*. СПб.: Питер, 2020. Глава 3. *Фантазия*. Раздел 3.3. *Второй закон термодинамики*.

Пайерлс Р. *Сюрпризы в теоретической физике*. 1988. Глава 3. *Статистическая механика*. Раздел 3.8. *Необратимость*.

Frigg, Roman. *A field guide to recent work on the foundations of statistical mechanics*. In *The Ashgate companion to contemporary philosophy of physics*, pp. 105-202. Routledge, 2016.

Обсуждение

<https://evgeniirudnyi.livejournal.com/361573.html>

Рудольф Карнап: Два эссе об энтропии

Карнап, индуктивная логика и энтропии в статистической механике. Разногласия Карнапа с физиками (фон Нейман и Паули) по поводу интерпретации энтропии - энтропия в физике для Карнапа объективна.

В классической термодинамике энтропия является однозначной функцией состояния тела. В статистической механике существуют разные подходы к энтропии, основанные на вероятностной интерпретации энтропии. Нередко термодинамическая энтропия связывается тем или иным способом с информационной энтропией, а далее на этой основе возникает трактовка энтропии как мера знания / незнания агента состояния молекулярной системы. Таким образом в статистической механике существует спектр энтропий, которые в зависимости от школы трактуются либо как свойство системы, либо как мера знания агента о системе.

Карнап написал эссе об энтропии в период с 1952 по 1954 год во время нахождения в Институте перспективных исследований в Принстоне, но эта работа была опубликована только посмертно в 1977 году. Важно отметить, что в пятидесятые годы многие ученые были воодушевлены теорией информации и в том числе наблюдалось желание физиков-теоретиков связать вместе вероятность, информацию и термодинамическую энтропию в рамках статистической механики. Интересно, что создатель теории информации Клод Шеннон в 1956 году даже написал короткую заметку '*Повальное увлечение (Bandwagon)*', в которой призывал к осторожности в применении теории информации в областях, для которых она не предназначалась:

‘За последние несколько лет теория информации превратилась в своего рода бандвагон [повальное увлечение] от науки. Появившись на свет в качестве специального метода в теории связи, она заняла выдающееся место как в популярной, так и в научной литературе. Это можно объяснить отчасти ее связью с такими модными областями науки и техники, как кибернетика, теория автоматов, теория вычислительных машин, а отчасти новизной ее тематики. В результате всего этого значение теории информации было, возможно, преувеличено и раздуто до пределов, превышающих ее реальные достижения. Ученые различных специальностей, привлеченные поднятым шумом и перспективами новых направлений исследования, используют идеи теории информации при решении своих частных задач. Так, теория информации нашла применение в биологии, психологии, лингвистике, теоретической физике, экономике, теории организации производства и во многих других областях науки и техники. Короче говоря, сейчас теория информации, как модный опьяняющий напиток, кружит голову всем вокруг.’

Интерес Карнапа к энтропии в статистической механике был связан с его

разработками в области индуктивной логики. Карнап отказался от принципа верифицируемости научных теорий, но он также отвергал принцип фальсифицируемости Поппера. Карнап считал, что интерпретация вероятности в рамках логики поможет найти средний путь частичной верифицируемости. В настоящее время отмечается некоторое сходство идей Карнапа с более поздним развитием байесовского статистического вывода.

Карнап заметил сходство математического формализма при статистической интерпретации термодинамической энтропии и при решении задач индуктивной логики в рамках частичной верифицируемости. В то же время Карнап подчеркивал принципиальное отличие этих задач; он считал, что сходство математического аппарата не должно приводить к отождествлению одной задачи с другой. В автобиографии, написанной в 1963 году, Карнап охарактеризовал атмосферу написания эссе об энтропии таким образом:

‘Я провел несколько разных бесед с Джоном фон Нейманом, Вольфгангом Паули и некоторыми специалистами в области статистической механики по некоторым интересовавшим меня вопросам теоретической физики. Я, безусловно, многому научился из этих бесед, но в решении моих задач по логическому и методологическому анализу физики я получил меньше помощи, чем рассчитывал... Моей главной задачей была не физическая концепция, а использование абстрактной концепции для целей индуктивной логики. Тем не менее, я также исследовал природу физической концепции энтропии в ее классической статистической форме, разработанной Больцманом и Гиббсом, и пришел к некоторым возражениям против общепринятых определений не с фактической и экспериментальной, а с логической точки зрения. Мне показалось, что обычный способ определения или интерпретации статистической концепции энтропии делает ее, возможно, вопреки намерениям физиков, чисто логической, а не физической концепцией; если это так, то она больше не может быть, как предполагалось, аналогом классической концепции энтропии макросистемы, введенной Клаузиусом, которая, очевидно, является физическим, а не логическим понятием. То же самое, на мой взгляд, относится и к распространенному в последнее время мнению о том, что энтропию можно отождествлять с отрицательным количеством информации. Я ожидал, что в беседах с физиками по этим проблемам мы придем если не к соглашению, то, по крайней мере, к ясному взаимопониманию. Однако в этом мы не преуспели, несмотря на наши серьезные усилия, главным образом, как мне казалось, из-за больших различий во взглядах и в языке.’

Карнап не сомневался в объективности энтропии классической термодинамики:

‘Понятие энтропии в термодинамике (S_{th}) имеет тот же общий характер, что и другие понятия в той же области, например, температура, теплота, энергия, давление и т.д. Оно служило, как и другие понятия, для

количественной характеристики некоторого объективного свойства состояния физической системы, скажем, газа g в баллоне в лаборатории на момент исследования.’

Меня порадовало это утверждение Карнапа, поскольку физики-теоретики, занимающиеся статистической механикой, периодически истолковывают внутренние проблемы при нахождении четкого эквивалента энтропии классической термодинамики как свидетельство субъективности энтропии.

Для отличия двух методов Карнап ввел принципа физической величины (Principle of physical magnitudes), который утверждает, что физические описания этой величины на микро- и макроуровне должны приводить к одинаковым результатам в рамках экспериментальной погрешности. Далее Карнап обсуждает две интерпретации статистической энтропии микросостояния (метод I и метод II) и показывает, что первый метод согласуется с введенным принципом физической величины, а второй нет. Отсюда следует вывод, что в статистической механике как разделе теоретической физики следует использовать только первый метод. Вторым методом следует же рассматривать исключительно в духе решения эпистемологических задач; при этом Карнап указывает на сходство второго метода с задачами индуктивной логики.

Разногласия с физиками возникли именно в этом пункте. Джон фон Нейман и Вольфганг Паули считали, что именно второй метод является правильным при рассмотрении энтропии в статистической механике и что статья Карнапа поэтому нежелательна. Так, Паули после просмотра черновика эссе Карнапа написал:

‘Уважаемый мистер Карнап! Я несколько ознакомился с вашей рукописью, однако, к сожалению, должен сообщить, что я решительно против занимаемой вами позиции. Я бы скорее счел физически наиболее прозрачным то, что вы называете “Методом II”. В этой связи я не нахожусь под полным влиянием современной теории информации (...), поскольку я действительно обеспокоен тем, чтобы путаница в области основ статистической механики не усугубилась бы еще больше (и я очень опасаюсь, что публикация вашей работы в таком виде имела бы такой эффект).’

Похожие аргументы были со стороны фон Неймана. В результате Карнап отказался от идеи опубликования эссе; возможно он не хотел, чтобы его работы в области индуктивной логики из-за этих разногласий попали под атаку со стороны физиков.

В эссе мне понравилась последовательно проведенное сравнение задачи распределения молекул газа по ячейкам μ -пространства в статистической интерпретации энтропии по Больцману с задачей классификации объектов по категориям. В последнем случае число возможных размещений объектов по категориям совпадает с числом распределений молекул газа по ячейкам, что

приводит к появлению двух энтропий, которые формально выглядят одинаково. Отличие появляется в выражении энтропии для микросостояния. В случае статистической термодинамики Карнап предложил метод I, который согласуется с принципом физической величины. В то же время физики использовали метод II, который нарушал принцип физической величины и был похож на метод индуктивной логики, разрабатываемый Карнапом.

Отмечу, что Карнап не рассматривал стрелу времени в явном виде. В рамках введенного принципа физической величины достаточно, когда статистическая интерпретация энтропии дает значения, совпадающие с таковыми в классической термодинамике в пределах погрешности. Вопрос появления направления времени из законов, симметричных относительно времени, Карнапа, по-видимому, не заинтересовал, поскольку он искал решения своих задач индуктивной логики, в которых этот вопрос не возникает.

В эссе Карнап рассматривает работы Леона Бриллюэна, которые вышли еще до появления книги Бриллюэна *‘Наука и теория информации’* в 1956 году. В то же время работы физика Эдвина Джейнса (Edwin Jaynes) с субъективистской трактовкой энтропии в рамках статистической механики появились уже после написания эссе в 1957 году.

Физик и философ Абнером Шимони, ученик Карнапа (Abner Shimony), принял деятельное участие в издании эссе об энтропии в 1977 году. В силу неприятия субъективности энтропии Шимони находился на ножах с Эдвином Джейнсом. Последний так охарактеризовал роль Шимони — цитата Джейна показывает, как кипели страсти по поводу энтропии:

‘[Шимони], похоже, посвятил всю свою жизнь тому, чтобы неверно истолковывать все, что я написал много лет назад, а затем составлять длинные педантичные комментарии, полные технических ошибок и искажений документально подтвержденных фактов, демонстрируя полное отсутствие осведомленности о чем-либо, сделанном в этой области с тех пор, — и которые, чтобы завершить все это, нападают не на мои утверждения, а только на его собственное непонимание. Конфликт заключается не между Шимони и мной, а между Шимони и английским языком.’

Информация

Rudolf Carnap, *Two essays on entropy*, Univ of California Press, 1977.

Шеннон К. *Бандвагон*, в кн. *Работы по теории информации и кибернетике*, 1963. Shannon C., *The Bandwagon*, Trans. IRE, IT-2, № 1 (1956), 3.

Hannes Leitgeb and André Carus, *Rudolf Carnap*, The Stanford Encyclopedia of Philosophy, 8. *Inductive Logic and the Re-Emergence of the Theoretical Language*.

Javier Anta, *Historical and Conceptual Foundations of Information Physics*. PhD Thesis, 2021. Chapter III, *The Informationalization of Thermal Physics*.

Обсуждение <https://evgeniirudnyi.livejournal.com/364209.html>

И. Р. Пригожин: Конец определенности

Пригожин о необратимости и законах физики. Время становится фундаментальной величиной; стрела времени вводится путем отказа от траектории микросостояния и переходу к плотности вероятности.

Статистическая термодинамика интересна тем, что даже по прошествии уже значительного времени споры о появлении необратимости из симметричных во времени законов физики не затухают. Недавно увидел живое описание одной из таких дискуссий:

‘Круглый стол «Микроскопическое происхождение макроскопической необратимости (Microscopic origins of macroscopic irreversibility)» состоялся на 20-й Международной конференции по статистической физике (Париж, 1998). Две противоположные точки зрения в присутствии двух тысяч ученых отстаивали Либовиц [в другой транскрипции Лебовиц] и Пригожин. Сухое и сокращенное изложение их эмоциональных речей приведено в статьях [шли ссылки].’

В статье Лебовица защищалось обычное вероятностное объяснение необратимости по Больцману — см. заметку ‘*Стрела времени по Больцману*’. Лебовиц в том числе опирается на рассмотрение Пенроуза и вспоминает завет Шрёдингера неуклонно следовать статистической интерпретации Больцмана. По крайней мере, Лебовиц придерживается объективного взгляда на существование энтропии; так, в его статье полностью отсутствует упоминание об интерпретация энтропии как информации.

В конце статьи Лебовиц рассматривает взгляды фон Неймана на эквивалент энтропии по Больцману в квантовой механике и говорит об отличии в понимании вероятности. В классической статистической механике Лебовиц связывает вероятность с незнанием действительного поведения системы, а в квантовой механике вероятность объявляется свойством самой системой, по крайней мере в копенгагенской интерпретации. Это оставляет открытым вопрос, каким образом описание атомов и молекул на уровне квантовой механики превращается в детерминированную траекторию микросистемы на уровне классической статистической механики; в то же время это служит неплохим переходом к описанию взглядов Пригожина.

Оказалось, что у Пригожина есть книга 1997 года ‘*Конец определенности. Время, хаос и новые законы природы*’, с которой я был незнаком. Изложение в статье достаточно близко к содержанию книги — излагаются результаты работы группы Пригожина в Брюсселе и Остине, согласно которым взгляды на законы физики требуют радикального пересмотра. Было интересно увидеть эволюцию взглядов Пригожина на отношение между стрелой времени и обратимыми законами физики по сравнению с книгой ‘*Порядок из хаоса*’ (см. [Пригожин и Стенгерс: Порядок из хаоса](#)).

Напомню, что Пригожин известен введением в рассмотрение диссипативных

систем, находящихся далеко от равновесия. Пригожин считает, что самопроизвольное образование сложной структуры в таких системах непосредственно связано со стрелой времени. Мне понравилось это замечание, поскольку сомнительно, чтобы в интерпретации энтропии по Больцману можно было бы найти объяснение образованию подобных структур. Время по Пригожину таким образом становится фундаментальной величиной.

Пригожин отталкивается от нестабильности и динамического хаоса систем в классической статистической механике (в переводе книги использован термин детерминистический хаос):

‘Термин детерминистический также прочно вошел в обсуждение хаотических систем. Уравнения движения остаются детерминистическими, как в ньютоновской динамике, даже если какой-то конкретный режим кажется случайным. Открытие важной роли неустойчивости привело к возрождению классической динамики, ранее считавшейся законченной дисциплиной. Действительно, до недавнего времени было принято думать, что все системы, описываемые законами Ньютона, похожи. Разумеется, каждому было известно, что рассчитать траекторию падающего камня проще и легче, чем решить «проблему трех тел», например, рассчитать эволюцию системы, состоящей из Солнца, Земли и Юпитера. Но было принято думать, что все сводится лишь к проблеме вычислений. И только в конце XIX века Пуанкаре показал, что это не так. Проблемы принципиально различны в зависимости от того, устойчива или неустойчива динамическая система.’

Основная идея при дальнейшем рассмотрении состоит в полном отказе от рассмотрения траектории одного микросостояния и переходе к плотности распределения. Вводится оператор для изменения плотности распределения и утверждается, что при выходе за рамки гильбертова пространства рассмотрение эволюции плотности распределения приводит к необратимости во времени. Таким образом, переход к плотности распределения позволяет получить новую информацию:

‘Мы не можем приготовить индивидуальную траекторию, поскольку это потребовало бы бесконечно большой точности. Для устойчивых систем требование бесконечно большой точности не имело бы никакого значения, но для неустойчивых систем с их чувствительностью к начальным условиям мы можем приготовить только распределения вероятностей, включающие в себя различные типы движения.’

‘распределение вероятности позволяет нам включить в рамки динамического описания сложную микроструктуру фазового пространства. Следовательно, описание на вероятностном уровне содержит дополнительную информацию, отсутствующую в описании на уровне индивидуальных траекторий. ... На уровне функций распределения мы

получаем новое динамическое описание, позволяющее нам предсказывать будущую эволюцию ансамбля, в том числе и характерные временные масштабы. На уровне индивидуальных траекторий такое предсказание невозможно. Эквивалентность индивидуального и статистического уровней нарушается.’

‘Таким образом, мы приходим к нелокальному описанию. Траектории по-прежнему существуют, но становятся исходом некоторого стохастического, вероятностного процесса. Независимо от того, насколько точно удовлетворены наши начальные условия, мы получаем из них различные траектории. Кроме того, как будет показано дальше, нарушается временная симметрия, поскольку в статистическом описании прошлое и будущее играют различные роли. Разумеется, в случае устойчивых систем статистическое описание возвращает нас к обычному описанию на языке детерминистических траекторий.’

Логика рассмотрения примерно такая. Неинтегрируемые механические системы приводят к появлению детерминированного хаоса, когда поведение системы в конечном итоге не отличается от поведения стохастической системы. Появляется вопрос, можно ли из поведения системы сделать вывод, был ли хаос детерминированный или же система была изначально стохастической. Пригожин выбирает стохастичность и дополнительно показывает, что переход к стохастическому описанию при дополнительных предположениях дает желаемую стрелу времени.

Стохастическое рассмотрение переносится на квантовую механику, что согласно Пригожину обеспечивает плавный переход от квантово-механического описания к макроскопическому:

‘наш подход ликвидирует дуалистическую структуру квантовой механики и тем самым исключает квантовый парадокс. Мы приходим к реалистической интерпретации квантовой теории, поскольку переход от волновых функций к ансамблям теперь может быть понят как результат действия резонансов Пуанкаре без загадочного вмешательства «наблюдателя» или введения других неконтролируемых допущений.’

‘Замечательной особенностью нашего подхода является то, что он применим как к классическим, так и к квантовым системам. Все другие теоретические предложения, которые нам известны, представляют собой попытки исключить квантовый парадокс с помощью исключительно квантового механизма. Наоборот, при нашем подходе квантовый парадокс представляет лишь один из аспектов парадокса времени.’

Следует отметить, что в статье и в книге представлено обсуждение конечных результатов; полное понимание требует проработки статей группы Пригожина. Также в последних главах книги Пригожин переходит от физики как таковой к философским проблемам.

В заключение включу несколько цитат из книги Пригожина, которые показывают отношение ряда физиков к энтропии как к незнанию:

‘В своей книге «Кварк и ягуар» Мюррей Гелл-Манн пишет следующее:

«Энтропия и информация связаны между собой очень тесно. Энтропию можно рассматривать как своего рода меру незнания. Если известно лишь, что система находится в данном макросостоянии, то энтропия этого макросостояния служит мерой нашего незнания того, в каком из микросостояний находится система, — мерой, определяемой путем подсчета числа битов дополнительной информации, необходимой для однозначного определения микросостояния при условии, что все микросостояния, образующие данное макросостояние, равновероятны.»

‘Широкую известность получило высказывание Макса Борна о том, что «необратимость — результат введения незнания в фундаментальные законы физики.»

‘На такую двойственную природу квантовой механики неоднократно обращал внимание великий физик Вольфганг Паули. В письме к Марксу Фирцу он писал в 1947 г.: «Нечто реальное происходит, только когда производится наблюдение, в связи с чем ... энтропия непременно возрастает. Между наблюдениями вообще ничего не происходит.»

Информация

И. Р. Пригожин, *Конец определенности. Время, хаос и новые законы природы*, 2000.

Ilya Prigogine, *The End of Certainty. Time, Chaos, and the New Laws of Nature*, 1997.

J. L. Lebowitz, *Microscopic origins of irreversible macroscopic behavior*, Physica A., 1999, v.263, p.516-527.

I. Prigogine, *Laws of nature, probability and time symmetry breaking*, Physica A, 1999, v.263, p.528-539.

Описание обсуждения Лебовица и Пригожина было в статье:

Г. Э. Норман, В. В. Стегайлов. *Стохастическая теория метода классической молекулярной динамики*. Математическое моделирование 24, no. 6 (2012): 3-44.

Обсуждение

<https://evgeniirudnyi.livejournal.com/370546.html>

Теорема о равномерном распределении энергии против атомизма 19-ого века

Расхождения между предсказаниями теоремы о равномерном распределении и экспериментальными значениями теплоемкостей. Рассмотрена история появления теоремы и обсуждение расхождений Больцманом и Кельвином.

Развитие молекулярно-кинетической теории во второй половине 19-ого века является интересным эпизодом в истории науки при обсуждении двух вопросов. Первый касается связи теории физики и натурфилософии, поскольку развитие молекулярно-кинетической теории началось под сильным влиянием натурфилософских идей атомизма. В ходе развития формализма молекулярно-кинетической теории была доказана теорема о равномерном распределении энергии по степеням свободы. Из теоремы следовало простое выражение для расчета теплоемкости газов, но предсказания расходились с экспериментальными значениями. Это приводит к второму вопросу: что делают ученые, когда предсказания теории расходятся с экспериментальными данными.

Кратко. Невозможно отрицать связь теории физики и натурфилософии, но наука в ходе развития в состоянии отбросить натурфилософские идеи, которые себя исчерпали. Расхождение предсказаний теории с экспериментальными данными без всякого сомнения играет свою роль в этом процессе, но до появления новой теории ситуацию можно выразить следующим образом. Ученые признают наличие расхождений, но это отнюдь не заставляет их отказаться от самой теории. Ниже я рассмотрю эти вопросы более подробно на базе того, что мне удалось найти сравнительно быстро.

Следует отметить, что атомизм 19-ого века существенно отличался от атомистических представлений древних греков, поскольку атомизм 19-ого века включал в себя 'оккультные силы' между атомами, причем как силы притяжения, так и силы отталкивания. Приведу ниже выразительное высказывание Эмиля Дюбуа-Реймона, сделанное в 1872 году; он явно находился под влиянием успехов развития молекулярно-кинетической теории:

‘Познанием природы, или, говоря точнее, естественно-научным познанием или познанием мира тел при помощи и в роли теоретической естественной науки, называется сведение изменений, происходящих в мире тел, на движения атомов, каковые движения производятся их центральными, независимыми от времени, силами, или же: познание природы есть сведение процессов природы на механику атомов.’

‘Представим себе, что все изменения в мире тел были сведены на движения атомов, происходящих от действия их постоянных центральных сил, тогда вселенная была бы познана в естественно-научном отношении. Состояние вселенной в продолжении одного бесконечно малого пространства времени являлось бы нам

непосредственным результатом состояния ее в продолжении предыдущего и непосредственной причиной ее состояния в продолжении следующего бесконечно малого пространства времени. Закон и случай были бы тогда лишь другими названиями для механической необходимости.’

Обычно история становления молекулярно-кинетической теории и статистической термодинамики рассматривается под углом борьбы ‘героев’ (атомы существуют) со ‘злодеями’ (атомы не существуют). Тем не менее, предсказание ‘злодея’ Эрнста Маха, сделанные в 1883 году (*Механика. Историко-критический очерк ее развития*), оказалось пророческим:

‘Взгляд, что механика должна рассматриваться как основа всех прочих отраслей физики и что все физические процессы должны быть объяснены механически, мы считаем предрассудком. Исторически более старое не обязательно должно оставаться основой для понимания позднее открытого. По мере того, как становятся, известными и упорядочиваются новые факты, могут возникнуть и совершенно новые руководящие идеи. Но мы еще совершенно не знаем, какие из физических явлений простираются глубже всего, не являются ли механические как раз наиболее поверхностными или не идут ли все одинаково глубоко. И в самой механике мы ведь не рассматриваем самый древний из законов — закон рычага — как основу для всех прочих законов ... Механический. взгляд на природу представляется нам исторически понятной, простительной, возможно даже временно полезной, но в целом все же искусственной гипотезой.’

Классическая механика в конце концов оказалась непригодной для описания движения на уровне атомов и молекул и атомизм 19-ого века в духе Дюбуа-Реймона уступил место квантовой механике. В этом смысле расхождение экспериментально наблюдаемых теплоемкостей и предсказаний по теореме равномерного распределения в неявном виде содержало в себе необходимость квантования энергии. Интересно отметить, что статистическая механика остановилась на так называемом квазиклассическом приближении. По сути дела в рассмотрении оставлены математические объекты-кентавры, которые снаружи выглядят как бильярдные шары с действующими между ними ‘оккультными силами’, а внутри объектов используется квантование энергии. По всей видимости именно это обстоятельство служит причиной того, что немало образованных граждан по-прежнему воспринимают атомизм 20-ого века в духе атомизма 19-ого века и забывают про квантовую механику.

Рассмотрим события, связанные с теоремой о равномерном распределении энергии по степеням свободы и ее связи с экспериментальными значениями теплоемкостей. В 1848 году Джеймс Джоуль, опираясь на идеи Герапата предложил свою версию молекулярно-кинетической теории (опубликовано в 1851 году). Он посчитал, что теплоемкость складывается только из «живых

сил», связанных с поступательным движением молекул (кинетическая энергия поступательного движения). Рассчитанные теплоемкости оказались ниже, чем известные экспериментальные значения, но Джоуль списал разницу на несовершенство измерений. Приведу цитату Джоуля (по книге Гельфера), полную оптимизма (один из вариантов отношения между теорией и экспериментом):

‘Экспериментальные данные Делароша и Берара неизменно выше величин, требуемых гипотезой. Следует, однако, иметь в виду, что хотя опытные исследования Делароша и Берара и считаются лучшими из всех, проведенных до сих пор, они сильно отличаются от исследований других ученых. Однако я уверен, что исследования, предпринятые м-ром Реньо для французского правительства, охватят и важную проблему о теплоемкости тел и что мы можем в скором времени ожидать новой серии определений удельных теплот газов, отличающихся всей той точностью, какой вполне заслуженно прославился этот замечательный исследователь. А до этого времени было бы, пожалуй, лучше воздержаться от каких-либо дальнейших видоизменений динамической теории, с помощью которых ее выводы могли бы быть приведены в более полное согласие с данными опыта.’

Следует сразу же отметить, что надежда Джоуля на новые экспериментальные значения не оправдалась. Следующий шаг был сделан Рудольфом Клаузиусом в 1857 году (более полное рассмотрение в 1867 году). Клаузиус более формально доказал, что энергия распределена равномерно по поступательным степеням свободы, при этом Клаузиус подчеркнул важность внутренних степеней свободы молекулы, вращательных и колебательных, при расчете теплоемкостей. Далее Клаузиус поступил просто — он взял экспериментальные значения теплоемкостей и из них рассчитал отношение вклада внутренних степеней свободы в энергию по сравнению со вкладом поступательного движения.

Джеймс Максвелл в 1860 году расширил теорему Клаузиуса о равномерном распределении энергии на вращательные степени свободы. Людвиг Больцман в 1876 году доказал теорему для всех степеней свободы, правда, он назвал это число ‘переменными, характеризующими положение молекулы’. Максвелл в 1879 году рассмотрел работу Больцмана и ввел понятие степеней свободы. Таким образом, современный вариант теоремы о равном распределении энергии по степеням свободы связан с работами Больцмана и Максвелла в 1876-1879 гг.

Двухатомная молекула содержит шесть степеней свободы (три поступательных, две вращательных и одна колебательная), поэтому согласно теории теплоемкость одного моля газа из двухатомных молекул должна быть равна $3R$ (R — универсальная газовая постоянная). Экспериментальные значения теплоемкостей однако были близки к $2.5 R$, то есть, они соответствовали пяти степеням свободы. В то же время экспериментальные теплоемкости паров ртути (Кундт и Варбург, 1871) были близки к ожидаемым значениям $1.5 R$ (три

степени свободы) для одноатомных газов.

Правда, в то время уже появились работы по спектроскопии газов и были обнаружены спектры поглощения ртути и других газов. Наблюдаемые спектры показывали на сложный внутренний состав ртути, что говорило о наличии дополнительных степеней свободы, связанных со спектральными линиями. Распространение теоремы о равномерном распределении на эти новые степени свободы привело бы к слишком большим теплоемкостям. Так, Максвелл отмечал:

‘Но спектроскоп говорит нам, что некоторые молекулы способны колебаться многими различными способами. Очевидно, — эти молекулы должны быть системами чрезвычайно большой сложности, зависящими значительно более чем от шести переменных. Каждая дополнительная переменная вводит дополнительную способность к внутреннему движению, не влияя на внешнее давление. Поэтому каждая дополнительная переменная увеличивает удельную теплоту, безразлично, будет ли она вычислена при постоянном давлении или постоянном объеме.’

Другая трудность была связана с тем, что теорема о равномерном распределении предсказывала, что теплоемкость газов не зависит от температуры. В то же время (цитата из книги Гельфера):

‘Между тем еще Реньо в 40-х годах установил, что теплоемкости паров некоторых жидкостей изменяются с температурой. В 1876 г. Г. Видеман провел специальное исследование теплоемкостей многоатомных газов (CO_2 , NH_3 , C_2H_6 и др.), на основе которого пришел к заключению, что теплоемкость указанных газов увеличивается с повышением температуры. Такие же наблюдения были сделаны и другими исследователями (Вюльнером и др.).’

Ниже я приведу три цитаты Больцмана по поводу теоремы равномерного распределения и теплоемкостей, которые показывают три возможных реакции на расхождение теории и эксперимента. Первая возможность связана с тем, что надо просто взять число степеней свободы, согласующееся с экспериментом (в духе Клаузиуса). Мы видим, что другие степени свободы, в том числе связанные со спектрами, не дают вклада в теплоемкость, ну и ладно (в духе введения замороженных степеней свободы).

Больцман. *О некоторых моих менее известных статьях по теории газов и об их отношении к этой теории*

‘Теперь оказалось, что найденное с помощью опыта точное отношение теплоемкостей для воздуха и большинства простых газов получается, если предположить, что молекулы являются твердыми вращающимися телами. ... Для газа, молекулы которого являются вращающимися телами, Максвелл получил бы уже тогда точное отношение

теплоемкостей, экспериментально данное для большинства простых газов, а для газов, молекулы которых не являются вращающимися телами, отношение теплоемкостей, экспериментально найденное для хлора, брома и многих других газов. И вместо вывода, что рассмотрение молекул как твердых тел в этой связи ведет к противоречию с опытом, он уже тогда должен был бы сказать, что это предположение дает для отношения теплоемкостей значение, которое для простых газов отлично согласуется с опытом, вследствие чего физикам не пришлось бы многократно ломать голову над мнимым противоречием между теорией газов и опытом.’

Вторая возможность связана с привлечением возможного взаимодействия молекул газа с эфиром. Следует отметить, что существование эфира в то время никем не оспаривалось и поэтому такую возможность нельзя было исключить. В этой связи можно вспомнить про программу вихревой теории атомов (*vortex atom theory*, атомы как эфирные вихри), разрабатываемую в Англии под руководством Томсона (Кельвина).

Больцман. *О некоторых вопросах теории газов*

‘Если бы мы взяли сосуд, заполненный одним граммом газа, выдержанного в течение бесконечно долгого времени неизменно при 0° С и содержащего неизменно одну и ту же порцию эфира, каждый атом эфира и каждый атом молекул нашего газа достиг бы одной и той же средней *vis viva*. Если бы мы затем подняли температуру до 1° С и подождали, пока каждый весомый атом и каждый атом эфира не пришел в тепловое равновесие, полная энергия увеличилась бы на величину, которую мы можем назвать идеальной удельной теплоемкостью. Но при действительном нагревании одного грамма газа эфир всегда свободно течет через стенки сосуда. Он приходит из окружающей среды и вовсе не находится в тепловом равновесии с молекулами газа. Это правда, что он всегда уносит энергию, если окружающее пространство холоднее газа; но эта энергия может быть настолько малой, что оказывается пренебрежимой в сравнении с энергией, которую газ теряет за счет теплопроводности и которая должна быть экспериментально определена и вычислена при измерении удельной теплоемкости. Только некоторые поперечные колебания эфира могут передать заметную энергию от одного весомого тела к другому, и потому в наблюдениях удельных теплоемкостей должна быть сделана поправка на излучаемое тепло.’

Наконец, можно было сказать, что трудности связаны со сложностью природных явлений, но что проблему удастся решить в будущем (насколько я понял, такой же позиции придерживался в том числе Максвелл).

Больцман. *О развитии методов теоретической физики в новейшее время*

‘Разумеется, представления о природе молекул не должны подвергаться никаким ограничениям. Так, не следует отбрасывать теорию отношения теплоемкостей только на том основании, что она еще не является универсально применимой, ибо молекулы ведут себя при столкновениях подобно упругим шарикам лишь у некоторых простейших газов, да и то лишь при не очень высоких температурах. В отношении более тонких их свойств, несомненно, очень сложных, у нас пока нет никаких точек опоры; эти точки опоры надо будет в дальнейшем как-то найти. Наряду с атомистикой может развиваться столь же необходимое направление, ставящее своей задачей свободное от всяких гипотез уточнение и обсуждение уравнений; это направление, однако не должно превращать в догму свой математический аппарат, так же как атомистика не должна этого делать в отношении своих материальных точек.’

Еще одна стратегия выдвигалась лордом Кельвиным. Он сомневался в правильности теории о равномерном распределении и предлагал ее отбросить, не трогая саму молекулярно-кинетическую теорию. В лекции 1900 года *‘Облачка XIX века над динамической теорией тепла и света’* (опубликована в 1901 году) Кельвин большую часть времени уделил именно расхождению между предсказаниями теории Максвелла и Больцмана с экспериментальными значениями теплоемкостей. Кельвин так охарактеризовал статью Максвелла 1879 года:

‘Я никогда не видел достоверности в доказательстве, на основе которого Максвелл обосновывает свое утверждение, и мне всегда казалось чрезвычайно невероятным, что такое может быть справедливым.’

Правда, похоже, Кельвин был единственным, кто сомневался в правильности теории о равномерном распределении энергии.

В заключение вернусь к лекции Дюбуа-Реймона. Она была посвящена границам науки; Дюбуа-Реймон считал, что даже в случае выполнения указанной программы останутся необъясненные феномены. Про это полезно помнить физикам, которые ищут такие интерпретации квантовой механики, которые позволят вернуться в золотой век картины мира классической физики.

P.S. Любителям натурфилософии атомизма полезно взглянуть на теорию квантового поля, в которой элементарная частица становится возбуждением квантового поля. Более того, даже такая интерпретация отвергается теоремой Хаага: ‘Картина взаимодействия существует только в случае отсутствия взаимодействия’. См. [Теорема Хаага и элементарные частицы](#)

Информация

Дюбуа-Реймон, Эмиль Генрих (1818-1896). *О пределах познания природы* : Лекция, чит. Эмилем Дю-Буа-Реймондом на втором публ. заседании 45 собр. нем. естествоиспытателей и врачей 14 авг. 1872 г. в Лейпциге : Пер. с нем. — Могилев на Днепре : изд. переводчиков, 1873. Загл. ориг.: «Über die Grenzen des Naturerkennes.»

Эмиль Дюбуа-Реймон: Не знаем и не будем знать

Гельфер Я. М., *История и методология термодинамики и статистической физики*, 2-е изд., 1981. Глава IX. Развитие молекулярно-кинетической теории в XIX в.

Больцман Л. *Избранные труды*, 1984.

О некоторых моих менее известных статьях по теории газов и об их отношении к этой теории (1897), с. 314-321.

О развитии методов теоретической физики в новейшее время (1899), с. 350-372.

О некоторых вопросах теории газов (1895), с. 415-422.

Lord Kelvin, *Nineteenth century clouds over the dynamical theory of heat and light*. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science 2, no. 7 (1901): 1-40.

Обсуждение

<https://evgeniirudnyi.livejournal.com/346518.html>

Демон Максвелла и броуновское движение против второго закона

Максвелл введением демона хотел показать статистический характер энтропии. Исследование броуновского движения изменило отношение физиков. Смолуховский предложил натурализацию демона Максвелла.

После появления молекулярно-кинетической теории встал вопрос о ее связи с энтропией и вторым законом термодинамики. Первая попытка сведения второго закона к молекулярно-кинетической теории была предпринята Людвигом Больцманом в 1866 году (ему было 22 года): статья '*О механическом смысле второго начала теории теплоты*'. Рудольф Клаузиус предпринял аналогичную попытку в статьях 1870 и 1871 гг. Клаузиус независимо пришел к результатам, ранее опубликованным Больцманом, и между ними разгорелся спор о приоритете.

Именно это обстоятельство привело к появлению демона Максвелла, поскольку Максвелл считал невозможным сведение второго закона термодинамики к законам механики. В 1867 году в письме Питеру Тэйту Максвелл описал устройство, содержащее крошечное существо, которое Уильям Томсон (Кельвин) окрестил демоном. Важно отметить, что целью Максвелла являлось подчеркивание статистической роли второго закона в рамках молекулярно-кинетической теории.

Максвелл выразил это обстоятельство в явной форме в письме Джону Стретту (лорду Рэлею) в 1870 году, где Максвелл подчеркнул обратимость законов механики. Таким образом, в рамках закона сохранения энергии вполне можно представить перенос теплоты от холодного тела к горячему. Но поскольку повернуть время не представлялось возможным, то мысленный эксперимент с демоном делал аргумент более наглядным.

В публичном изложении демон Максвелла появился в 1872 году в книге Максвелла '*Теория теплоты*'. Интересно отметить, что при описании существа Максвелл сравнивал его со стрелочником, а стрелочник был любимой фигурой Максвелла при обсуждении свободы воли. Максвелл был добропорядочным христианином и он считал, что научное знание совместимо с религией и что в нем есть место свободе воли. Но рассмотрение вопроса с этой стороны уведет нас в сторону от обсуждаемой темы в этой заметке. В данном случае важно только то, что Максвелл посмеивался над немцами, которые хотели достичь недостижимое:

‘редко можно увидеть, как эти ученые немцы борются за приоритет открытия того, что 2-й закон сводится к принципу Гамильтона ... Принцип Гамильтона находится в месте, не затронутым статистическими соображениями; в то же время немецкие Икары машут своими восковыми крыльями в стране облаков-кукушек (*nephelococcygia*) среди

тех облачных форм, которые невежество и ограниченность человеческой науки наделили непередаваемыми атрибутами невидимой Царицы Небес.’

Правда, Максвелл не предложил своего решения. Ему было достаточно представления о статистической роли второго закона без проработки деталей. Можно только увидеть, что в 1878 году в статье ‘Диффузия’ для энциклопедии Британника Максвелл связал проблему со статусом человеческого знания:

‘Только существу, находящемуся на промежуточной стадии, которое может овладеть некоторыми формами энергии, в то время как другие ускользают от его внимания, кажется, что энергия неизбежно переходит из доступного состояния в рассеянное.’

Имеется в виду, что для существа, которое могло бы следить за движением молекул (демон Максвелла), такой проблемы бы не было

‘понятие рассеянной энергии не могло возникнуть ... у того, кто мог бы проследить движение каждой молекулы и уловить его в нужный момент.’

Больцман в конце концов отказался от первоначальных планов и перешел к статистической трактовке второго закона. Более того, Больцман после широкого обсуждения парадокса обратимости и теоремы возврата Пуанкаре выдвинул флуктуационную гипотезу, в которой время перестало быть фундаментальной физической величиной (*Лекции по теории газов*):

‘Следовательно, для Вселенной оба направления времени неразличимы, так же как в пространстве не существует ни верха, ни низа. Но так же, как в определенной точке земной поверхности направление к центру Земли определяется как направление книзу, живое существо, находящееся в определенной фазе времени такого единичного мира, будет определять направление времени к менее вероятным состояниям иначе, чем противоположное направление (первое — как прошлое, начало, второе — как будущее, конец)’

Обратите внимание, что высказывание Больцмана о времени перекликается с рассуждениями Максвелла о связи второго закона со статусом человеческого знания. Энтропия по сути дела связывается с ограничениями, присущими человечеству, и в этом смысле энтропия становится субъективной.

В целом в 19-ом веке демон Максвелла воспринимался так, как его задумал Максвелл — как доказательство статистической природы второго закона. В ходе многочисленных обсуждений ученые согласились с таким выводом, поэтому повода для дальнейших обсуждений демона Максвелла не было. Ситуация поменялась в ходе изучения броуновского движения. Понимание связи броуновского и молекулярного движения появилось у физиков в последней четверти 19-ого века. Несколько имен из книги Гельфера:

‘В ясной форме предположение о том, что броуновское движение вызывается движением молекул жидкости, было высказано независимо друг от друга Карбонеллем (1874) и Рамсеем (1876). В 1877 г. к такому же выводу пришел и Дельсо ... Следует отметить, что некоторые количественные закономерности броуновского движения были подмечены еще Ф. Экснером в 1867 г.’

‘Позже, в 1888 г. М. Гуи нашел, что интенсивность движения частичек обратно пропорциональна вязкости жидкости и прямо пропорциональна ее температуре. В 1900 г. Ф. Экснер попытался дать аналитический расчет скорости движения броуновской частички, исходя из допущения, что ее кинетическая энергия равна кинетической энергии молекулы газа. Однако полученные результаты не совпали с наблюдаемыми скоростями.’

Два последних утверждения выражают проблему обсуждения броуновского движения и экспериментов того времени. Физики в то время считали, что возможно измерять и сравнивать с теорией скорость движения мелких частичек. Именно это обстоятельство приводило к рассогласованию наблюдаемых величин и отличию от предсказаний теории.

Положение поменялось после теории, разработанной Альбертом Эйнштейном и Марианом Смолуховским. В этой теории в качестве наблюдаемой величины использовалось смещение частицы, что открыло путь к экспериментальной проверке теории. Интересно отметить зависимость последующих экспериментов от теории. Это еще раз показывает, что нельзя представить себе развитие физики исключительно в духе индуктивного метода, как обобщение проводимых экспериментов.

В данной ситуации среди физиков появились голоса, что возможно создать демон Максвелла, который будет лежать в основе вечного двигателя второго рода. Из Гельфера:

‘относительно формулировки Томсона («вечный двигатель второго рода невозможен») возникли дебаты. Некоторые физики, такие, как Липпман, Сведберг, Оствальд, полагали, что флуктуационные явления позволяют, по крайней мере принципиально, поставить вопрос об осуществлении вечного двигателя второго рода. Казалось, что максвелловская идея о «демонах», сортирующих молекулы по скоростям, находит теоретическое обоснование в броуновском движении. В свое время еще Гуи высказал мысль, что если бы удалось каким-либо способом упорядочить броуновское движение, то это открыло бы возможность получения даровой энергии. Если французский физик высказал эту мысль как гипотетическое предположение, то Оствальд в 1906 г. прямо говорит о возможности опровержения второго начала:

«Представляется нам, что «демоны» Максвелла, которых в молеку-

лярной области можно было бы считать безвредными, здесь, в конечной области видимых явлений, имеют открытое поле для экспериментального опровержения второго начала».

Были даже предложены конкретные схемы осуществления вечного двигателя второго рода, большинство которых основывалось на том или ином варианте максвелловских «демонов»

Отмечу, что идея вечного двигателя второго рода была подхвачена даже Карлом Поппером, который почему-то считал, что такое опровергает субъективность энтропии в рамках флуктуационной гипотезы Больцмана. См. [Карл Поппер: За пределами поиска инвариантов](#).

В данном случае интересна позиция Смолуховского, называния статьей которого выглядят вызывающе: *‘Доступные наблюдению молекулярные явления, противоречащие обычной термодинамике’* (1912), *‘Границы справедливости второго начала термодинамики’* (1914).

В классической термодинамике, строго говоря, флуктуации невозможны. В этом смысле броуновское движение и наличие флуктуаций противоречат второму закону термодинамики. Однако после констатации этого факта Смолуховский проводит натурализацию демона Максвелла. Демон объявляется устройством, которое подчиняется законам физики и на которое распространяется наличие флуктуаций. В этих рамках Смолуховский показывает проблематичность предложенных вечных двигателей второго рода — наличие флуктуаций в устройствах типа демона Максвелла делает невозможным продолжительную работу этих двигателей. Все, что требуется для сохранения второго закона, это несколько изменить формулировку, чтобы учитывать возможное возникновение флуктуаций:

‘Нельзя осуществить никакого автоматического приспособления, которое продолжительное время производило бы полезную работу за счет теплоты более низкой температуры.’

Единственную возможность создания вечного двигателя второго рода Смолуховский связывает с чистым интеллектом (из статьи 1914 года):

‘Таким образом, *perpetuum mobile* возможен, если в качестве некоторого рода *deus ex machina* понимают человека, экспериментирующего в соответствии с обычными методами физики, который, опираясь на непрерывное точное исследование мгновенного состояния природы, может в любой момент привести в ход или прервать макроскопические процессы без совершения работы. Так что вовсе нет нужды в том, чтобы он обладал способностью максвелловского демона, который задерживает отдельные молекулы, но все же в упомянутых выше пунктах совершенно отличается от действительно живого существа. Потому что выполнение какого-либо физического процесса в результате деятельности как

сенсорной, так и двигательной нервной системы, всегда связано с обесцениванием энергии, не говоря уже о том, что и самое существование живого связано с непрерывным рассеянием энергии.’

В следующем параграфе Смолуховский оставляет место некоторому сомнению:

‘Итак, если учесть эти обстоятельства, то представляется очень сомнительным, что реальные живые существа могут длительно, или по крайней мере регулярно, производить работу за счет теплоты тела более низкой температуры. Правда, наше незнание жизненных процессов не позволяет дать определенный ответ.’

Но затем последующий параграф начинается с утверждения: ‘Затронутые в конце вопросы уже выходят за рамки собственно физики.’ Отмечу, что решение Смолуховского было успешным. Вечный двигатель второго рода, работающий продолжительное время, так и не был создан. Предложения можно увидеть вплоть до настоящего времени; но одно дело предложить, другое — осуществить.

В заключение следует сказать, что есть другая линия обсуждения демона Максвелла, которая начинается с работ Лео Силарда (также транскрипция Сцилард). Он почему-то был неудовлетворен решением Смолуховского и выдвинул новое решение, связанное с ролью измерений. Большинство последующих работ, посвященных демону Максвелла, пошли по этому пути, когда проблематичность демона Максвелла объясняется в рамках теории информации, а информационная энтропия связывается с термодинамической энтропией. Неясно, почему натурализация демона Максвелла на этом пути не признается удовлетворительным решением, но это уже в любом случае другая история.

Информация

Martin J. Klein, *Maxwell, His Demon, and the Second Law of Thermodynamics: Maxwell saw the second law as statistical, illustrated this with his demon, but never developed its theory.* American scientist 58, no. 1 (1970): 84-97.

Гельфер Я. М., *История и методология термодинамики и статистической физики*, 2-е изд., 1981, Глава 12, *Открытие и исследование броуновского движения. Дальнейшее развитие статистической теории Больцмана.*

John Earman and John D. Norton. *EXORCIST XIV: the wrath of Maxwell's demon. Part I. From Maxwell to Szilard.* Studies In History and Philosophy of Science Part B: Studies In History and Philosophy of Modern Physics 29, no. 4 (1998): 435-471.

Обсуждение

<https://evgeniirudnyi.livejournal.com/350169.html>

Теодор Сведберг и существование молекул

Описание работ Теодора Сведберга, которые нередко считаются первым подтверждением теории броуновского движения Эйнштейна. На самом деле это не так. По материалам статьи Милтона Керкера.

Нередко можно услышать, что первый эксперимент, подтверждающий теорию броуновского движения Эйнштейна (1905 г.) был выполнен Теодором Сведбергом (Theodor Svedberg, 1884 -1971) в 1906 году. Приведу по этому поводу перевод из биографии Сведберга на сайте Нобелевского комитета (Нобелевская премия по химии 1926 года):

‘В своей докторской диссертации *«Исследования по изучению коллоидных растворов»* (1908), ныне считающейся классической, он описал новый метод получения коллоидных частиц и привел убедительные доказательства справедливости теории броуновского движения, созданной Эйнштейном и Смолуховским, тем самым предоставив однозначное доказательство существования молекул.’

На поверку однако оказывается, что эти эксперименты Сведберга не были связаны с теорией Эйнштейна. Сразу же скажу, что это не уменьшает важности научных достижений Сведберга в течение его жизни — речь идет лишь об аспирантской работе (на момент защиты ему было всего 24 года). Это хороший пример сочетания энтузиазма и желания больших свершений в молодости с недостатком знаний.

История начинается с создания ультрамикроскопа Рихардом Зигмонди в 1902 году (также Жигмонди, Richard Zsigmondy). В оптическом микроскопе предел обнаружения объектов связан с длиной волны (примерно 500 нм). Ультрамикроскоп работает на отражении света и он открывает возможность для наблюдения за поведением частиц, размером примерно до 10 нм. Уменьшение размера частиц ведет к большей подвижности в броуновском движении и тем самым облегчает наблюдение. Зигмонди получил Нобелевскую премию 1925 г. по химии, вручена в 1926 г.

Важно отметить, что предыдущие эксперименты по изучению броуновского движения были связаны с попытками определить истинную среднюю скорость движения одной частицы, когда наблюдаемое движение частицы принималось за истинную траекторию ее движения. Однако, поскольку число соударений с разных сторон слишком велико, то наблюдаемые перемещения частиц принципиально нельзя связать с истинной средней скоростью движения частиц. Неправильная постановка цели наблюдений приводила к неправильной интерпретации наблюдаемых явлений. Это в свою очередь являлось самой вероятной причиной, почему ведущие ученые, работающие над развитием молекулярно-кинетической теории, игнорировали исследование броуновского движения.

Наблюдения Зигмонди броуновского движения сверхмалых частиц находились

в рамках этой традиции. Он трактовал наблюдаемые движения как комбинацию из поступательного и осцилляторного движения частиц. Сведберг при постановке экспериментов опирался на трактовку Зигмонди, только Сведберг посчитал, что возможно выбрать такие условия, когда останется только осцилляторное движение частиц и что это обстоятельство дает возможность определить истинную среднюю скорость движения частиц.

В рамках поставленной задачи — наблюдения осцилляторного движения частиц — Сведберг выбрал удачный путь проведения эксперимента (он был хорошим экспериментатором). Коллоидный раствор двигался с постоянной скоростью и поэтому предполагалось, что наложение осцилляторного движения частицы на это движение приведет к синусоидальному наблюдаемому движению частицы, когда можно будет определить амплитуду и период колебаний.

Из наблюдений Сведберг вычислил «истинную» скорость движения частиц и сравнил ее с наблюдаемой «истинной» скоростью в экспериментах Уильяма Рамзая (William Ramsay). Далее он странным образом провел экстраполяцию наблюдаемых «истинных» скоростей на скорость движения отдельного атома платины — отличие в два с половиной раза было признано удовлетворительным. Важно заметить, что при постановке эксперимента и написании первой статьи Сведберг еще не знал про работу Эйнштейна 1905 года.

Сведберг узнал про работу Эйнштейна в 1906 году и его наверняка привлекли следующие слова Эйнштейна:

‘Если рассматриваемое здесь движение вместе с ожидаемыми закономерностями действительно будет наблюдаться, то классическая термодинамика уже для микроскопически различных областей не может считаться вполне действительной, и тогда возможно точное определение истинных атомных размеров. Если же, наоборот, предсказание этого движения не выполнится, то это будет веским аргументом против молекулярно-кинетического представления о теплоте.’

Сведберг понял, что ставки велики, и после этого постарался дать интерпретацию своих результатов в свете теории Эйнштейна во второй статье 1906 года. Для этого он взял период колебания за время, а длину пути за среднее смещений в уравнении Эйнштейна. Такое решение невозможно принять за правильное, поскольку в уравнении время соответствует проекции смещения частицы, а не всему пути. В целом способ проведения эксперимента в рамках принятого осцилляторного движения не дает возможности использовать полученные результаты в рамках теории Эйнштейна. Как бы то ни было, Сведберг в результате пришел к тому, что отличие его результатов от теоретических составляет примерно четыре раза, что было признано им удовлетворительным.

Эйнштейн в мягкой форме подверг результаты Сведберга критике. Позднее в письме к Жану Перрену он объяснил это таким образом:

‘Ошибки в методах наблюдения Сведберга, а также в теоретических методах анализа сразу же стали мне ясны. В то время я написал о небольшой поправке, которая, как мне показалось, исправляло только самые серьезные ошибки, потому что я не мог решиться испортить ему огромное удовольствие от его работы.’

Сам Перрен выступил с обоснованной критикой работ Сведберга, поскольку для него речь шла о том, чьи эксперименты первыми обеспечили подтверждение теории Эйнштейна. Сведберг со своей стороны не признал ошибок в интерпретации результатов и отстаивал, что результаты его экспериментов все-таки можно проинтерпретировать в рамках теории Эйнштейна. Милтон Керкер характеризует поведение Сведберга в этом обсуждении в резких тонах, но по человечески Сведберга можно понять. Чистосердечное признание своих ошибок в науке встречается, но не так уж и часто.

Сведберг вернулся к экспериментам с броуновским движением в 1909 году и у него было плодотворное сотрудничество с Марианом Смолуховским. Тем не менее, Сведберг до конца жизни официально не признавал критику в сторону своих экспериментов, представленных в статьях 1906 года. Именно эти работы сыграли немаловажную роль в присуждении ему Нобелевской премии в 1926 году. Жану Перрену была присуждена в этом году Нобелевская премия по физике, а Сведбергу — по химии. Интересен факт, что Сведберг в Нобелевской лекции решил не рассказывать про изучение броуновского движения; вместо этого он изложил первые результаты по использованию разрабатываемой им ультрацентрифуги.

Ниже выборочный перевод из автобиографии Сведберга, связанный с Нобелевской премией:

‘Королевская академия наук собралась в ноябре, чтобы принять решение о присуждении Нобелевской премии по физике и химии за этот год. Меня выдвигали несколько раз и в этом году было также. Поскольку в тот момент мне казалось невозможным получить премию, меня попросили заявить — я был членом Комитета по присуждению Нобелевской премии по химии с 1925 года — что я не хотел бы, чтобы комитет рассматривал предложение о присуждении мне премии. Это дало мне возможность принять участие в работе комитета.’

‘Что касается решения о присуждении премии по химии 1926 года, мнения разделились. Карл Бенедикс (Carl Benedicks) и Вильгельм Палмер (Wilhelm Palmaer) предложили присудить премию мне — вопреки предложениям комитета по химии. Председатель комитета Улоф Хаммарстен (Olof Hammarsten) сказал, весьма расстроенный: «Но вы уже заявили в комитете, что не желаете, чтобы вас рассматривали». Ответ: «Чтобы иметь возможность принимать участие в работе комитета,

я попросил, чтобы он не рассматривал мою кандидатуру, но если Академия сейчас желает это сделать, у меня нет причин заявлять, что я не могу быть рассмотрен». Затем я покинул собрание и спустился на Центральный вокзал, чтобы отправиться домой. Когда я ходил взад и вперед по платформе в ожидании поезда, я увидел приближающихся жителей Уппсалы. Натан Содерблум [Natan Soderblom, архиепископ Швеции] поспешил ко мне: «Поздравляю, вы получили приз». Я был совершенно ошеломлен.’

‘Я сам испытывал чувство невероятного счастья, но также некоторого дискомфорта. Я был удостоен премии за свою работу, касающуюся дисперсных систем, то есть более или менее за весь объем моей работы. Мне казалось, что только мои последние исследования, работа над белками, используемыми в ультрацентрифуге, действительно могут быть серьезно рассмотрены. А они только начались. Таким образом, на самом деле комитет по присуждению Нобелевской премии по химии был прав — мне следовало позволить подождать хотя бы пару лет. Я всю ночь лежал без сна, размышляя, и чувствовал себя все более несчастным. Я пообещал себе использовать следующие десять лет своей жизни, чтобы стать достойным премии. И вот, это тоже сработало.’

Информация

Биография Сведберга на сайте Нобелевского комитета:

<https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1926/svedberg/biographical/>

Milton Kerker, *The Svedberg and molecular reality*. Isis 67, no. 2 (1976): 190-216

Kerker, M., 1986. *The Svedberg and molecular reality: an autobiographical postscript*. Isis, 77(2), pp.278-282.

В статье приведен перевод отрывка из автобиографии Сведберга, в котором рассказывается о присуждении ему Нобелевской премии.

Гельфер Я. М., *История и методология термодинамики и статистической физики*, 2-е изд., 1981, Глава 12, *Открытие и исследование броуновского движения. Дальнейшее развитие статистической теории Больцмана.*

Обсуждение

<https://evgeniirudnyi.livejournal.com/354709.html>

Признание реальности молекул в начале 20-ого века

Обсуждение признания физиками реальности атомов. По материалам книги Смита и Сета *'Броуновское движение и действительность молекул'*. Критерий эмпирического обоснования теории физики ван Фраассена.

В истории физики есть интересный эпизод, когда отношение физиков к реальности атомов и молекул радикально поменялось в течении примерно десяти лет. В конце 19-ого — в самом начале 20-ого века статус молекулярно-кинетической теории оставался на уровне полезной гипотезы. Статус-кво в физике сводился к подчеркиванию гипотетического характера теории, а разногласия касались лишь вопроса о (бес)полезности таких представлений. Ситуация решительно поменялась после первого Сольвеевского конгресса 1911 года, когда сомнения в реальности атомов стали признаком альтернативной науки.

Ниже будут использованы материалы из книги Смита и Сета *'Броуновское движение и действительность молекул'* — название книги идет от названия большой статьи Жана Перрена 1909 года (перевод на русский в 1912 г.). В произошедшей трансформации взглядов физиков теория броуновского движения (Эйнштейн, Смолуховский, Ланжевен) и эксперименты Перрена сыграли немалую роль, в то же время нельзя упускать из внимания другие теоретические и экспериментальные работы.

Как обычно, можно увидеть разные объяснения произошедшего. Есть точка зрения, что к концу 19-ого века накопилось достаточно данных для признания реальности молекул и что это не происходило только под влиянием философии позитивизма. В рамках это позиции признается появление новых экспериментальных данных и новых теоретических построений, но считается, что они мало что меняли. Представителем такой позиции является известный историк молекулярно-кинетической теории Стивен Браш (Steven Brush) — ниже идет несколько его высказываний:

‘В течение следующих нескольких лет он [Перрен], похоже, посвятил большую часть своего времени популяризации значимости своей работы по броуновскому движению, в частности идеи о том, что теперь доказано существование атомов. В этом он на удивление преуспел. На самом деле, готовность ученых поверить в «реальность» атомов после 1908 года, в отличие от прежнего упорства в их «гипотетическом» характере, весьма удивительна.’

‘Доказательства, представленные экспериментами Перрена и других ученых по броуновскому движению, кажутся довольно неубедительными по сравнению с тем, что уже было доступно из других источников. Тот факт, что можно было определить число Авогадро и заряд электрона еще одним методом, вряд ли кажется достаточным для оправдания столь

глубоких метафизических выводов. Несколько независимых методов определения этих параметров были известны с 1870 года или ранее, не говоря уже о многочисленных успехах кинетической теории в предсказании свойств газов.’

‘Ретроспективно, кажется очевидным, что критика кинетической теории в этот период была мотивирована в первую очередь не техническими проблемами, такими как удельная теплоемкость многоатомных молекул, а скорее общей философской реакцией против механистической или «материалистической» науки и предпочтением эмпирических или феноменологических теорий в противовес атомным моделям.’

С другой стороны, можно рассмотреть случившийся переход с точки зрения собственно науки без привлечения философских предпочтений физиков. Такая точка зрения выражена в статье ван Фраассена и она использована в книге Смита и Сета. Речь идет про эмпирическое обоснование теории физики (*empirically grounded*); на основе работ Германа Вейля в качестве такового ван Фраассен использует критерии определенности и соответствия:

‘*Определенность*: любой теоретически значимый параметр должен быть таким, чтобы существовали условия, при которых его значение могло быть определено на основе измерений.’

‘*Соответствие*, которое имеет два аспекта:

– Относительность к теории: это нахождение теоретического параметра может и, как правило, должно быть сделано на основе теоретически установленных связей.

– Уникальность: величины должны быть «однозначно скоординированы», должно быть соответствие в значениях, определенных различными способами.’

В рамках такой позиции к концу 19-ого века оценки числа Авогадро сильно отличались друг от друга и таким образом согласно критерию ван Фраассена молекулярно-кинетическую теорию нельзя было признать эмпирически обоснованной. Ситуация существенно изменилась за первое десятилетие 20-ого века. Отличие в значении числа Авогадро, определенного разными методами, перед первой Сольвеевской конференцией составляло менее 10%:

- Использование заряда электрона и числа Фарадея;
- Излучение черного тела — теория Планка;
- Эксперименты с альфа-частицами;
- Эксперименты Перрена по броуновскому движению — три разных метода.

В этом отношении есть выразительное высказывание Анри Пуанкаре, сделанное в 1912 году:

‘Многочисленные согласия между результатами, полученными совершенно различными способами, упрочивают наше убеждение [подтверждение атомистических идей]. Еще очень недавно считали себя счастливыми, видя, что найденные числа [Авогадро] имеют одинаковое число цифр; тогда даже не требовали, чтобы первая значащая цифра была та же; сейчас эта первая цифра найдена, и что особенно замечательно, так это то, что пользовались самыми разнообразными свойствами атома.’

В книге Смита и Сета приведено немало высказываний других ученых того времени, которые подтверждают рассмотрение ван Фраассена. Например, Вильгельм Оствальд в 1907 году аналогичным образом обосновывал статус гипотезы для молекулярно-кинетической теории (ср. с критерием ван Фраассена):

‘Мы имеем дело с гипотезой, когда выражения или обозначения величин встречаются в формуле, посредством которой должны быть представлены некоторые физические соотношения, но которые невозможно наблюдать и измерить и которые мы не можем заменить никаким определенным и эмпирически определяемым значением.’

Через два года в 1909 году Вильгельм Оствальд признал реальность молекул; интересно отметить, что он в том же году получил Нобелевскую премию по химии.

Важно отметить, что в 1907 году Эйнштейн предложил теорию теплоемкости кристаллов на основе квантования движения гармонического осциллятора. Это открыло путь к разрешению разногласий с экспериментальными значениями теплоемкостей в молекулярно-кинетической теории. Экспериментальные измерения теплоемкостей в лаборатории Вальтера Нернста (Арнольд Ойкен и др.) подтвердили теорию Эйнштейна теплоемкостей для твердых тел. Измерения низкотемпературных теплоемкостей газов из двухатомных молекул показали, что вращательные степени свободы при понижении температуры «замораживаются» и остается только теплоемкость, соответствующая поступательным степеням свободы.

В целом развитие науки идет разными путями и роль философских соображений при выборе учеными той или иной позиции невозможно отбросить. Тем не менее, в случае изменения отношения к атомной гипотезе вполне прослеживается линия, связанная с эмпирическим обоснованием теории. В любом случае Стивен Браш явно недооценил значение роли новых теорий, новых измерений и достижения хорошего согласия между значениями числа Авогадро, полученных в разных экспериментах.

Вполне возможно, что роль экспериментального изучения броуновского движения в этом переходе переоценена. В книге Смита и Сета хорошо разбираются эксперименты Перрена и следовавшие из них выводы. В пользу

броуновского движения, конечно, свидетельствует наглядность результатов. Так, Перрен сделал фильм, показывающий движение частиц, и этот фильм пользовался большой популярностью. С другой стороны, число Авогадро в экспериментах Перрена было систематически завышено на величину порядка 10% по сравнению с величинами в других экспериментах, результаты которых ближе к современному значению. Причина этого отклонения так и осталась неизвестной.

В заключение отмечу, что для ван Фраассена эмпирическое обоснование молекулярно-кинетической теории не связано напрямую с признанием реальности атомов и молекул. В определенной степени это идет от философской позиции ван Фраассена — конструктивный реализм, но в случае броуновского движения такое заключение достаточно просто обосновать. Теория броуновского движения построена в рамках классической физики, а по иронии судьбы признание атомизма в начале 20-ого века было связано с отказом от использования классической механики на молекулярном уровне.

Молекулярно-кинетическая теория возникла в рамках наглядных представлений атомизма 19-ого века о сталкивающихся между собой бильярдных шарах. Квантование энергии в теории излучения черного тела и в теории температурной зависимости теплоемкости заставило отказаться от такого представления; атомизм 19-ого века бесповоротно ушел в прошлое. Молекула стала представляться в виде энергетического спектра — попробуйте создать наглядное представление газа, в котором вместо бильярдных шаров используются энергетические спектры.

Атомизм 20-ого века основан на использовании квантовой механики, в которой отсутствует наглядная картина мира процессов на молекулярном и атомном уровне. По-моему, это является одной из причин современных обсуждений среди ряда физиков интерпретации квантовой механики. В то же время, никто из участвующих в обсуждении не сомневается, что квантовая механика эмпирически обоснована — критерий ван Фраассена выше в отношении квантовой механики полностью выполнен.

Обсуждению химической связи наилучшим образом показывает проблему ‘наглядность vs. реалистичность’ в современной квантовой физике. Никто не будет спорить, что квантовая механика объясняет химическую связь и строение молекул и что это объяснение эмпирически обосновано. В то же время невозможно совместить наглядность изображения химической связи с реалистичным представлением поведения электронов в молекулах. В учебниках химии можно увидеть наглядные изображения молекулярных орбиталей, но согласно квантовой химии они являются всего лишь вспомогательными функциями при решении уравнения Шрёдингера; в этом смысле молекулярные орбитали однозначно не соответствуют реальности. Другой вариант обсуждения химической связи связан с рассмотрением электронной плотности — где электронная плотность больше, там химическая связь прочнее. Однако,

вопрос реальности электронной плотности упирается в существование электронной волновой функции, а этот вопрос как раз заводит в метафизические дебри обсуждения физиков по поводу интерпретации квантовой механики.

Информация

George E. Smith and Raghav Seth, *Brownian Motion and Molecular Reality*, 2020.

В книге использован принцип эмпирического обоснования теории физики из статьи ван Фраассена:

Bas C. van Fraassen, *The perils of Perrin, in the hands of philosophers*, *Philosophical Studies* 143 (2009): 5-24.

Обсуждение

<https://evgeniirudnyi.livejournal.com/355384.html>

Излучение черного тела и появление неразличимых частиц

Неразличимость частиц из уравнения Планка для плотности энергии черного тела при создании квантовой статистики неразличимых частиц. Метафизики об онтологии неразличимых частиц.

В книге *‘Идентичность в физике: исторический, философский и формальный анализ’* современные метафизики ломают голову при размышлении об онтологии, соответствующей принципиально неразличимым частицам в квантовой механике. Такое противоречит метафизическому принципу тождества неразличимых Готфрида Лейбница, поэтому надо либо каким-то образом приписать идентичность неразличимым частицам, либо строить метафизику без тождества неразличимых. Кстати, это еще одна причина неадекватности атомизма 19-ого века в духе летающих бильярдных шаров.

Неразличимость впервые появилась в статистике, использованной Максом Планком в статье 1900 года для обоснования уравнения плотности энергии черного тела. Правда, у Планка неразличимость квантов энергии присутствовала еще в неявном виде и потребовались время для осознания этого факта; решающей на пути оформления идеи неразличимости в явном виде оказалась статья Шатъендраната Бозе 1924 года. Интересно отметить, что при преподавании физики часто говорится, что Планк предложил свое уравнение при поиске решения для ультрафиолетовой катастрофы. На самом деле ультрафиолетовая катастрофа разразилась и завершилась позже — в период с 1905 до 1910 года.

Одинаковость атомов предполагается уже в молекулярно-кинетической теории на основе классической механики. Так, добропорядочный христианин Джеймс Максвелл в конце лекции *‘Молекулы’* в 1873 году (*Nature*, Sept. 1873, 437-441) не смог удержаться от восхваления Того, кто смог создать такие удивительно одинаковые молекулы во всей вселенной; Максвелл был уверен, что природные процессы на такое в принципе не способны. Однако, в уравнениях классической механики частицы различимы, поскольку уравнения записываются для пронумерованных частиц, каждая из которых обладает пространственным положением и импульсом. Это аналогично ситуации, когда онтология одинаковых атомов не является проблемой для Того, кто их создал.

Людвиг Больцман в ходе разработке статистического обоснования энтропии пробовал разные способы подсчета числа состояний, но в конце концов осталась статистика Больцмана в предположении различимости частиц (статья 1877 года), когда пермутация двух частиц, находящихся в разных ячейках, приводит к новому состоянию. Следует отметить, что Больцман использовал дискретизацию по координатам и импульсам частиц для подсчета числа состояний, но считалось, что такое квантование состояний носило технический характер и что в дальнейшем можно вернуться к исходным уравнениям

классической механики.

Густав Кирхгоф в 1862 году ввел понятие абсолютно черного тела и доказал, что свойства излучения черного тела не зависят от материала стенок. Йозеф Стефан в 1879 году на основе обобщения экспериментальных данных предложил форму зависимости интегральной плотности энергии черного тела от температуры, а Больцман в 1884 году на основе классической термодинамики теоретически ее обосновал (закон Стефана-Больцмана).

Вильгельм Вин в 1893 году расширил подход Больцмана для вывода уравнения плотности энергии черного тела как функции частоты волны и температуры, но отсутствовало должное теоретическое обоснование полученного уравнения. Сорокалетний Макс Планк в 1897 году поставил своей целью найти строгий теоретический вывод уравнения плотности энергии черного тела. Как пишут, в первую очередь Планка привлекла универсальность этой функции, тем самым задача носила фундаментальный характер. Программа исследования включала использование энтропии в совокупности с заменой материала стенок полости, содержащей электромагнитное излучение, на набор гармонических осцилляторов. В силу доказательства Кирхгофа эта замена не должна повлиять на функцию плотности энергии черного тела.

Планк доказал теорему о связи искомой функции плотности энергии черного излучения со средней энергии гармонического осциллятора при данной температуре, а далее он занимался поиском этой функции. Эту функцию можно было бы непосредственно получить из теоремы о равномерном распределении энергии по степеням свободы молекулярно-кинетической теории (впоследствии этот путь использован Рэлеем и Джинсом), но Планк был убежден, что правильный путь связан с поиском уравнения для энтропии осциллятора. Важно отметить, что Планк до решения проблемы излучения черного тела занимался классической термодинамикой; возможно поэтому теорема о равномерном распределении не вызывала у него доверия.

Кстати, в мифе об ультрафиолетовой катастрофе говорится, что лорд Кельвин в лекции 1900 года о двух облачках на горизонте обсуждал именно ультрафиолетовую катастрофу. Ничего подобного — в качестве второго облачка Кельвин рассматривал рассогласование предсказываемых значений теплоемкости по теореме о равномерном распределении энергии по степеням свободы с экспериментальными значениями. Кельвин в отличие от других сторонников молекулярно-кинетической теории в лекции подвергал сомнению правильность этой теоремы, поскольку он не видел возможности достижения согласия с экспериментом. Это другая возможная причина для подозрительного отношения Планка к теореме о равномерном распределении молекулярно-кинетической теории. См. также заметку *‘Теорема о равномерном распределении энергии против атомизма 19-ого века’*.

Планк смог найти выражение для энтропии гармонического осциллятора,

которое приводило к закону Вина, но вскоре появились новые экспериментальные результаты, которые указывали на отклонения закона Вина от эксперимента в области низких и средних частот. Планк проанализировал свой путь и нашел возможность изменений, которые давали распределение, точно согласующееся с новыми экспериментальными результатами. Однако найденное решение оставалось без должного теоретического обоснования и поэтому окончательной задачей для Планка стал теоретический вывод необходимой функции энтропии гармонического осциллятора, находящегося в равновесии с излучением черного тела.

Окончательное решение Планк представил осенью 1900 года. Он исходил из уравнения Больцмана для энтропии (энтропия пропорциональна логарифму числа состояний), но подсчет числа состояний распределения энергии по осцилляторам опирался на квантование энергии, а выбранная статистика подсчетов состояний соответствовала неразличимости квантов энергии. Важно отметить оба компонента теоретического вывода Планка для энтропии гармонических осцилляторов, находящихся в равновесии с излучением черного тела — квантование энергии и неразличимость квантов. В конце концов, одно оказалось неразрывно связано с другим, но потребовалось значительное время для осознания этого обстоятельства.

Историк спорят, понимал ли Планк, что его уравнение (как квантование, так и неразличимость) ознаменовало полный разрыв с классической механикой. Сам Планк в воспоминаниях говорил таким образом (напоминает ‘И значит нам нужна одна победа, Одна на всех — мы за ценой не постоим’):

‘теоретическое объяснение должно было быть ... найдено любой ценой, и никакая цена не была бы слишком высока. ... Я пришел к этой точке зрения благодаря тому, что твердо держался обоих законов теории теплоты. Эти оба закона казались мне тем единственным, что при всех обстоятельствах должно оставаться неизменным. В остальном я был готов к любой жертве в моих прежних физических убеждениях.’

Весной 1900 года вышла статья Джона Рэля, которая, по всей видимости, послужила причиной возникновения мифа о том, что Планк (и лорд Кельвин) боролся с ультрафиолетовой катастрофой. В статье Рэлей получил уравнение плотности энергии излучения черного тела на основе теоремы о равномерном распределении, но заметив, что такое решение идет в бесконечность в области высоких частот, Рэлей без долгих размышлений умножил полученное выражение на ниспадающую экспоненту. Поэтому формально ультрафиолетовая катастрофа в этой статье еще не зародилась.

Статьи Планка и Рэля не привлекли сразу же внимание других физиков-теоретиков и теория излучения черного тела осталась без внимания до 1905 года. В контексте различимости — неразличимости частиц важно отметить появление статистической механики Гиббса в 1902 году. Гиббс заметил, что

статистика на основе различимых частиц приводит к энтропии газа, которая не пропорциональна количеству вещества (неэкстенсивная энтропия), что в свою очередь приводит к проблемам в химической термодинамике. Для разрешения Гиббс предложил ввести множитель $N!$, который делает частицы неразличимыми. Этот множитель сыграл важную роль в последующем обсуждении статистики идеального газа — это оказалось вторым путем размышлений физиков на пути к неразличимости частиц в квантовой механике.

С 1905 года среди физиков-теоретиков разгорелась оживленная дискуссия по поводу излучения черного тела. С одной стороны Альберт Эйнштейн в серии статей подчеркивал реальность квантов излучения, а Пауль Эренфест проверял законность вывода Планка уравнения энтропии осциллятора методом статистической термодинамики. С другой стороны, Рэлей и Джеймс Джинс в серии статей показали, что теорема о равномерном распределении приводит к параболическому возрастанию энергии плотности излучения черного тела как функции частоты.

В ходе обсуждения выяснилось невозможность решения проблемы излучения черного тела в рамках классической физики. Стало ясно, что использование теоремы о равномерном распределении с неизбежностью ведет к нефизическому распределению Рэля-Джинса (ультрафиолетовая катастрофа), когда плотность энергии излучения квадратично возрастает с увеличением частоты. Джинс пытался объяснить расхождение с экспериментом вследствие недостижения равновесия между телом и излучением при высоких частотах, но такое объяснение не было принято. С другой стороны, Эренфест показал, что попытка убрать квантование энергии при расчете энтропии осциллятора по методу Планка также ведет к распределению Рэля-Джинса. Интересно отметить, что квантование энергии в сочетании с различимостью введенных квантов приводило к закону Вина, а не к правильной плотности энергии черного тела по Планку.

Хендрик Лоренц на конференции в Риме в 1908 году предложил свой вывод для плотности энергии черного тела еще одним путем, но результат совпал с распределением Рэля-Джинса. После конференции Эрнст Прингсгейм (Ernst Pringsheim) и Отто Люммер (Otto Lummer) написали небольшую статью, в которой они показали, что согласно распределению Рэля-Джинса стальная пластинка должна быть видимой при комнатной температуре в темноте. Лоренц включил подобный расчет как приложение в свою книгу 1909 года и это было по сути дела концом ультрафиолетовой катастрофы (сам термин появился лишь в статье Эренфеста 1911 года). Физики пришли к окончательному заключению о невозможности в рамках классической физики дать объяснение наблюдаемой плотности энергии излучения черного тела.

Последующее развитие событий с попытками отделить идею квантования энергии от неразличимости частиц. Эйнштейн в 1907 году показал, что квантование энергии гармонического осциллятора открывает путь для решения

проблемы низкотемпературных теплоемкостей твердых тел. Вальтер Нернст в 1911 году указал, что введение квантования энергии также решает проблему теплоемкостей газов в молекулярно-кинетической теории. Теорема о равнораспределении работает в пределе высоких температур, а при понижении температуры из-за квантования энергии дополнительные степени свободы как бы замораживаются — их вклад в теплоемкость становится равным нулю.

Параллельно шел поиск для правильного вывода уравнения Планка при введении квантования энергии на уровне принципа новой физики. В то же время обсуждалась статистика идеального газа в рамках введения множителя $N!$ по Гиббсу. Таким образом квантование энергии излучения и неразличимость частиц идеального газа рассматривались независимо друг от друга. Решающей оказалась статья Бозе 1924 года, в которой был дан последовательный вывод уравнения Планка и которая дала толчок к появлению квантовых статистик Бозе-Эйнштейна и Ферми-Дирака. В конце концов рассмотрение излучения черного тела и идеального газа было объединено в рамках единого формализма, в котором вводилась принципиальная неразличимость частиц на уровне квантовой статистики.

К сожалению метафизиков уравнения квантовой статистики не позволяют сделать однозначный вывод о соответствующей онтологии. В книге предлагается один из возможных ответов, но вряд ли это завершит споры среди метафизиков. Можно только гадать, может ли Тот, кто создал принципиально неразличимые частицы, их различить.

Информация

Steven French, Décio Krause, *Identity in Physics, A Historical, Philosophical and Formal Analysis*, 2006.

Гельфер Я. М., *История и методология термодинамики и статистической физики*, 2-е изд., 1981, Глава XVII. *История термодинамики и статистики теплового излучения. Возникновение квантовой теории.*

Клейн, М.Д., *Макс Планк и начало квантовой теории. Успехи физических наук*, 1967, 92(8), pp.679-700.

S. Bergia, L. Navarro, *Early quantum concepts and the theorem of equipartition of energy in Einstein's work (1905-1925)*, Physis-Firenze, 1997.

Monaldi, Daniela. *A note on the prehistory of indistinguishable particles*. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 40, no. 4 (2009): 383-394.

Обсуждение

<https://evgeniirudnyi.livejournal.com/362821.html>

Леон Бриллюэн: Наука и теория информации

Обсуждение книги. Анализ пути Бриллюэна от термодинамической энтропии к негэнтропийному принципу информации. Критика интерпретации термодинамической энтропии как информационной энтропии.

Конец 1940-ых — начало 1950-ых годов были ознаменованы желанием физиков включить информацию в рассмотрение физики — см. раздел '*Реконструкция 'термического двигателя' бандвагона Шеннона в физике*' в последующей заметке. Первым физиком, кто довел до конца объединение информационной теории и статистической механики, был Леон Бриллюэн (Leon Brillouin, 1889-1969). После серии статей в 1956 году вышла его книга '*Наука и теория информации*' и таким образом Бриллюэн на год опередил Эдвина Джейнса, статьи которого вышли в 1957 году.

По содержанию книгу можно разделить на три части. В первых восьми главах рассматривается теория информации (информация по Шеннону, избыточность языка, кодирование, пропускная способность, исправляющие ошибки коды) плюс Фурье-анализ сигналов. Далее вводится связь информации и термодинамической энтропии и формулируется негэнтропийный принцип информации (пять глав). После этого Бриллюэн переходит к применению введенного принципа к рассмотрению измерений в физике, проблем связи и вычислений (семь последних глав). Одна из глав называется '*Письмо, печать и чтение*', в которой Бриллюэн решается на обобщение принципа далеко за пределами собственно физики.

Наиболее важными являются главы в середине книги, которые можно в свою очередь разделить на рассмотрение негэнтропии и информации (две главы, ниже им будет уделено основное внимание), флуктуационно-диссипационной теоремы (броуновское движение и тепловые шумы, две главы) и демона Максвелла (одна глава).

В начале девятой главе '*Основы термодинамики*' кратко рассматривается классическая термодинамика, а энтропии связывается с деградацией энергии. В целом такая интерпретация вполне допустима, но следует уточнить, что количественная связь между возможностью системы совершать работу и значением энтропии системы достаточно сложна. В случае изолированной системы в качестве такой меры можно использовать разность текущего значения энтропии и максимально возможного значения — чем меньше эта разность, тем меньше остается возможность для совершения работы. В случае неизолированных систем связь существенно усложняется.

Бриллюэн однако решил опереться на абсолютное значение энтропии системы, при этом он посчитал, что лучшим выражением деградации энергии будет служить отрицательное значение энтропии, которое он назвал негэнтропией. В качестве обоснования была ссылка на цитату из работы Питера Тэйта

(современник Кельвина и Максвелла), а также Шрёдингера (питание отрицательной энтропией). В то же время негэнтропия определяется формально просто как отрицательное значение энтропии:

‘Негэнтропия ($N = -S$) представляет качество энергии и она должна всегда убывать. В этом состоит смысл кельвинова принципа деградации энергии ...’

‘Изолированная система обладает негэнтропией, если она обнаруживает возможность совершения механической или электрической работы: ...’

Формулировки выше, к сожалению, достаточно небрежны и это ведет к недоразумениям в последующем изложении Бриллюэна. Во-первых, согласно определению даже при достижении равновесного состояния система обладает негэнтропией, то есть второе утверждение фактически неверно. Оно будет правильным только в случае рассмотрения разности между текущим значением негэнтропии и негэнтропии в равновесном состоянии изолированной системы. Оба утверждения будут неправильными в случае рассмотрения неизолированной системы.

Далее вводится статистическая интерпретация энтропии по Больцману, которая будет играть основную роль в связи энтропии и информации. К сожалению, Бриллюэн не говорит про ограниченность известного уравнения Больцмана. Практически его можно использовать только для идеального газа, а в более сложных системах подсчитать число допустимых микросостояний для данного макросостояния не представляется возможным. Таким образом, Бриллюэн вступает в противоречие с принципом, который он сформулировал во Введении (Бриллюэну нравится философия науки Бриджмена):

‘Экспериментальные науки ввели другой тип определения, часто называемый операционным. Сила, масса, скорость и т.д. определяются кратким описанием эксперимента, необходимым для измерения этих величин. ... Как правило, считается целесообразным вводить в научный язык только те величины, которые могут быть определены операционно.’

В этом смысле невозможно ввести практическую метрологию измерения энтропии на основе уравнения Больцмана; тем самым последующее рассмотрение энтропии в книге оказывается полностью оторванным от экспериментальных измерений. Более того, в книге есть такие высказывания (из Введения):

‘Термодинамическая энтропия есть мера недостатка информации о некоторой физической системе.’

Следует ли воспринимать сказанное, что качество энергии системы связано с недостатком информации о системе? По-моему, интерпретация энтропии как деградации энергии невозможно совместить с озвученной субъективностью энтропии. Это одна из проблем книги Бриллюэна — в разных частях книги

даются утверждения, противоречащие друг другу.

После двух глав, связанных с рассмотрением флуктуационно-диссипационной теоремы, Бриллюэн в главе 12 '*Негэнтропийный принцип информации*' вводит означенный принцип. Логика незамысловатая — посмотрите на выражение для информации в теории Шеннона и сравните с таковым в уравнении Больцмана. Отсюда делаем вывод (уравнение 12.4, негэнтропийный принцип информации):

‘связанная информация = убыванию энтропии S = увеличению негэнтропии N ’

Связанная информация у Бриллюэна является информацией в физическом устройстве. Бриллюэн также рассматривает свободную информацию, связанную с человеком: человек (свободная информация) — коммуникация (связанная информация) — другой человек (свободную информацию); но я ограничу свое рассмотрение только связанной информацией (ниже просто информация).

В этой главе появляются утверждения, значение которых я не смог разгадать:

‘энтропия убывает с получением информации, уменьшающей число микросостояний, и эта информация должна доставляться внешним агентом, энтропия которого будет возрастать.’

‘Получение информации о физической системе соответствует понижению энтропии этой системы.’

‘энтропия есть мера недостатка информации о действительной структуре системы.’

В примерах, приведенных в этой главе, Бриллюэн рассматривает самопроизвольное расширение газа в вакуум и смешение двух газов. Приведу описание первого процесса, только опущу уравнения:

‘Предположим, что мы имеем дополнительную информацию о состоянии газа; например, нам удалось узнать, что в некоторый предшествующий момент газ занимал меньший объем V_1 . Так обстояло бы дело, если бы газ содержался в сосуде V_1 , который мы внезапно соединили бы с другим объемом V_2 Начальная энтропия S_1 меньше энтропии S после расширения ... [информация в уравнении определяется как разница энтропий]. Когда мы впускаем газ в объем V_2 , между обоими сосудами возникают колебания плотности, и постепенно устанавливается равновесное состояние с плотностью, однородной во всем объеме V . Возрастание энтропии и потеря информации происходит совместно. Мы можем сказать, что газ постепенно «забывает» информацию.’

При смешении газов вывод аналогичный: ‘возрастание энтропии соответствует потере информации’. Однако из этих примеров остается совершенно

непонятной связь вывода о забывании информации в рассмотренных примерах с утверждениями выше об уменьшении энтропии системы при измерении. Такие утверждения остались на уровне декларации, реальных примеров в подтверждение сказанного приведено не было.

Как бы то ни было, пример с расширением газа можно использовать, чтобы попытаться понять значения количества информации у Бриллюэна. Возьмем один литр идеального газа при нормальных условиях — это соответствует $1\text{e}5 \cdot 0.001 / (8.314 \cdot 298) = 0.044$ молю или $0.044 \cdot 6.022\text{e}23 = 2.65\text{e}22$ молекул. Рассмотрим процесс расширения до двух литров. Изменение энтропии равно «забытой информации»: $0.044 \cdot 8.314 \cdot \log(2) = 0.25$ Дж/К. Теперь требуется понять, о каком количестве забытой информации говорит это число.

В первой главе при обсуждении единиц информации Бриллюэн говорит, что информацию можно измерять либо в битах, либо в энтропийных единицах. Пересчет от энтропийных единиц к битам согласно уравнению (1.4а) дает $0.25 / (1.38\text{e}-23 \cdot \log(2)) = 2.61\text{e}22$ бит. Что означает потеря такого числа бит в случае расширения идеального газа от одного до двух литров? Было бы интересно узнать, что Бриллюэн думал по этому поводу, но, к сожалению, ответа в книге на этот вопрос не найти.

Название следующей главы *‘Демон Максвелла и негэнтропийный принцип информации’* передает ее суть. Интересно отметить, что в самом начале этой главы Бриллюэн кратко обращается к рассмотрению Смолуховского. Поскольку любое устройство, претендующее на роль демона Максвелла, является физическим устройством, то флуктуации не дадут возможности такому устройству работать в продолжительном режиме. Так, Бриллюэн обсуждает вечный источник тока (вечный двигатель второго рода) в виде диода, работающего при использовании тепловых флуктуаций. Тепловые флуктуации вызывают ток, направленный то в одну, то в другую сторону, диод же оставляет ток только в одном направлении. Однако флуктуации в работе диода не дают возможности реализовать этот проект.

Тем не менее, Бриллюэна не устраивает такое решение в общем случае и далее он начинает рассмотрение демона Максвелла как устройства, перерабатывающего информацию; в духе мысленного эксперимента Лео Силарда (в другой транскрипции Сцилард). Я ограничусь только двумя общими комментариями к такому рассмотрению. Во-первых, в этой главе Бриллюэн полностью выходит за рамки экспериментальных измерений, поскольку, как уже упоминалось, у Бриллюэна отсутствует метрология измерения энтропии. Расчет энтропии по уравнению Больцмана в ограниченном числе случаев приводит к значениям энтропии, совпадающим с результатами экспериментов в классической термодинамике. Однако в случаях, далеко выходящих за пределы классической термодинамики, требуются отдельные экспериментальные исследования, в особенности при использовании декларации о субъективности энтропии.

Во-вторых, рассмотрение в этой главе, с моей точки зрения, смешивает два уровня описания устройства. Рассмотрим в качестве примера кабель связи, через который по Бриллюэну протекает связанная информация. С одной стороны, есть техническое задание — устройство должно выполнять определенные действия. На этом уровне при рассмотрении кабеля появляется информация, кодирование, шумы, мешающие передаче информации, и пропускная способность. С другой стороны, есть инженерная реализация этого устройства — структура кабеля. Физическое описание относится к структуре кабеля и к передаче электромагнитного поля через кабель при заданных условиях. В данной ситуации необходимо рассмотрение влияния внешних полей, тепловых потерь, температурного режима и т.д. Однако на этом уровне описания информация в явном виде отсутствует, описанию подлежит только изменение компонентов электромагнитного поля вдоль кабеля при заданных условиях.

Энтропия кабеля как физическая величина также относится исключительно к физическому уровню описания кабеля. В то же время информационная энтропия связана с техническим заданием, с кодированием информации, которая будет передаваться в ходе распространения электромагнитных волн вдоль кабеля. В настоящее время использование сжатия в архивах для сохранения информации позволяет хорошо подчеркнуть принципиальную разницу двух энтропий, термодинамической и информационной. Следует вспомнить, что сжатие связано с увеличением информационной энтропии — сжатый архив приближается к случайной последовательности и тем самым позволяет сохранить больше информации. Таким образом, чем больше информационная энтропия, тем больше информации можно сохранить в сжатом архиве. Это явно противоречит концепции Бриллюэна, который связал информацию с уменьшением энтропии. См. также выразительную цитату по этому поводу в заметке: [‘Рудольф Арнхэйм: Энтропия и искусство’](#).

В 1964 году вышла книга Бриллюэна *‘Научная неопределенность и информация’*, в которой он использовал негэнтропийный принцип информации при рассмотрении науки. Я потерял мысль Бриллюэна практически с самого начала, поэтому отмечу только один интересный факт. Книга была переведена на русский язык в 1966 году, всего через два года после выхода на английском языке. В то же время во введении книги содержится такое утверждение:

‘Было провозглашено много метафизических учений, в том числе и так называемый диалектический материализм. Вскоре оказалось, что все эти искусственные сооружения ограничивают свободу мышления.’

В послесловии книги содержится критика взглядов Бриллюэна с точки зрения диалектического материализма, но сам факт остается, по-моему, примечательным. По всей видимости в то время был запрос на книги с рассуждениями об информации и поэтому книга известного физика была так быстро переведена на русский.

Информация

Леон Бриллюэн, *Наука и теория информации*, 1960.

Leon Brillouin, *Science and Information Theory*, 1956.

Леон Бриллюэн, *Научная неопределенность и информация*, 1966.

Leon Brillouin, *Scientific Uncertainty and Information*, 1964.

Обсуждение

<https://evgeniirudnyi.livejournal.com/368906.html>

История появления информационной физики

Краткая информация по истории становления информационной физики из диссертации Хавьера Анта. Информатизация термической физики. Золотой век информационной физики.

Хавьер Анта в диссертации *‘Исторические и концептуальные основания информационной физики’* рассматривает процесс проникновения концепции информации в современную физику. Толчком к такому развитию событий явились разногласия в интерпретации энтропии в статистической механике плюс появление теории информации Шеннона. Далее шаг за шагом произошел переход к другим разделам физики — термодинамика черных дыр, физическая природа информации Ландауэра и ‘Оно из бита’ Джона Уиллера.

Рассмотрение истории показывает в том числе каким образом физики дошли до отождествления термодинамической и информационной энтропии. Я столкнулся с этим фактом лет десять назад в ходе обсуждений на everything-list, где для большинства участвующих это представлялось само собой разумеющимся. В то время я ограничился небольшой заметкой по этому поводу ([Entropy and Information](#)), в которой обосновал свое недоумение.

Ниже краткая информация по истории становления информационной физики из двух глав диссертации: глава 3 *‘Информатизация термической физики’* и глава 4 *‘Золотой век информационной физики’*. При изложении истории Анта отталкивается от небольшой заметки Клода Шеннона 1956 года *‘Повальное увлечение (Bandwagon)’*, в которой призывалось к осторожности в применении теории информации в областях, для которых она не предназначалась. Но бандвагон информации было уже невозможно остановить (буду использовать транслитерацию английского слова).

Реконструкция ‘термического двигателя’ бандвагона Шеннона в физике

Норберт Винер: комплементарная связь между информацией и энтропией

В 1948 году во влиятельной книге *‘Кибернетика’* Винер соединил концепции информации и энтропии. Кибернетический агент использовал полученную информацию для предсказания поведения системы, которое в свою очередь связывалось с порядком или беспорядком; предсказание поведения упорядоченной системы было более легким делом. Далее Винер отталкивался от ‘отрицательной энтропии’ Шрёдингера в книге *‘Что такое жизнь’*, а также от рассуждений химика Гильберта Льюиса (Gilbert Lewis); он еще в 1930 году утверждал: ‘Увеличение энтропии всегда означает потерю информации, и ничего больше.’

Таким образом Винер ввел связь между информацией, которой обладает кибернетический агент, и энтропией системы, которой агент управляет:

‘Понятие количества информации очень естественно соотносится с классическим понятием статистической механики — энтропией. Точно

так же, как количество информации в системе является мерой ее степени организованности, так и энтропия системы является мерой ее степени дезорганизации; и одно является просто отрицательным значением другого (...) Мы сказали, что количество информации, являющееся отрицательным логарифмом величины, которую мы можем рассматривать как вероятность, по сути, является отрицательной энтропией.'

Джон фон Нейман: Теория информации как натурализованная эпистемология науки

Джон фон Нейман в 1932 году в книге 'Математические основы квантовой механики' обсуждал решение, предложенное Лео Сцилардом при рассмотрении демона Максвелла. Фон Нейман считал, что такое решение позволяет объединить вместе физическое состояние системы и эпистемическое состояние агента. Возможно, что таким путем фон Нейман надеялся прийти к интерпретации измерения в квантовой механики. После появления работ Шеннона и Винера фон Нейман активно пропагандировал возможность сочетания формальной логики и статистической механики путем использования связи между информацией и энтропией. Авторитет фон Неймана в научных кругах способствовал распространению этой идеи.

История о рекомендации фон Нейманом термина энтропии для использования в теории информации Шеннона всплыла в 60-х годах в работах Трайбуса (Tribus). Анта пишет, что никто не знает, правдива ли эта история, но в любом случае она хорошо соответствует отношению фон Неймана к энтропии и информации.

Уоррен Уивер: теория информации Шеннона выходит за рамки Шеннона

Уоррен Уивер (Warren Weaver) работал вместе в Шенноном, но Уивер в отличие от Шеннона поставил задачей популяризацию теории информации Шеннона в виде, доступном для просвещенной публики. На этом пути он распространил техническое значение информации в теории Шеннона до семантической и прагматической, а также связал информационную энтропию с термодинамической. Административные ресурсы Уивера обеспечили успех его предприятию.

Информатизация Леона Бриллюэна

Леон Бриллюэн (Leon Brillouin, 1889-1969) был первым физиком, кто довел до конца объединение информационной теории и статистической механики в духе рассмотрения демона Максвелла по Сциларду. В 1956 году вышла книга 'Наука и теория информации', а в 1964 году книга 'Научная неопределенность и информация' (обе книги переведены на русский язык). Бриллюэн ввел термин негэнтропия (сокращение от отрицательной энтропии) и приравнял ее информации; Бриллюэн использовал интерпретацию статистической энтропии по Больцману.

В разделе рассказываются об истоках идей Бриллюэна, связанных с английской школой информации. На русском есть реферат статьи Анта:

Думов, А. В. *Реф. ст.: Анта Х. Информация, значение и физика: интеллектуальная эволюция английской школы теории информации в 1946-1956 гг.* Социальные и гуманитарные науки. Отечественная и зарубежная литература. Сер. 3, Философия: Реферативный журнал 3 (2023): 84-90.

Говорится о популярности идей Бриллюэна, но отмечается, что эти работы не привели к созданию научной школы; скорее следует говорить о традиции интерпретации статистической энтропии и информации по Бриллюэну.

См. [Леон Бриллюэн: Наука и теория информации](#)

Информатизация Эдвина Джейнса

Физик Эдвин Томпсон Джейнс (Edwin Thompson Jaynes, 1922-1998) в 1957 году предложил другое решения для связи информации и энтропии. Он соединил эпистемическую интерпретацию вероятности (вероятность как мера незнания агента) с статистической интерпретацией энтропии в методе ансамблей Гиббса (принцип максимума энтропии). На [everything-list](#) мне рекомендовали познакомиться с его статьями 1957 года. Я сломался на следующих утверждениях Джейнса:

‘При такой интерпретации выражение «необратимый процесс» представляет собой семантическую путаницу; необратим не физический процесс, а скорее наша способность следовать за ним. Тогда второй закон термодинамики становится просто утверждением о том, что, хотя наша информация о состоянии системы может быть утеряна различными способами, единственный способ ее получения — это проведение дальнейших измерений.’

‘Важно понимать, что тенденция энтропии к увеличению не является следствием законов физики как таковых, Увеличение энтропии может происходить неизбежно из-за нашего неполного знания сил, действующих на систему, или же это может быть полностью сознательным действием с нашей стороны.’

Анта пишет, что Джейнс вводил субъективность на уровне человечества, а не на уровне отдельного человека. Для отдельного человека процесс увеличения энтропии в изолированной системе оставался объективным, но эта объективность, насколько я понял, ограничивалась возможностями человечества как вида.

Работы Джейнса были очень популярными и Анта отмечает, что можно говорить о появлении научной школы, поскольку в последующем проводились конференции и симпозиумы, посвященные исключительно принципу максимума энтропии Джейнса.

Критика Карнапа информационного бандвагона

См. заметку *Рудольф Карнап: Два эссе об энтропии*

Интеллектуальная эволюция информационной теплофизики

В этом разделе рассматриваются основные события 60-х — 80-х годов прошлого века.

Рассмотрена роль инженера по образованию Майрона Трайбуса (Myron Tribus, 1921-2016), который во влиятельной книге *‘Термостатика и термодинамика’* (переведена на русский язык) и в последующих работах предложил синкретичный синтез идей Бриллюэна и Джейнса. Анта отмечает, что именно работы Трайбуса способствовали принятию в физике идеи о тождественности термодинамической и информационной энтропии.

Другая линия развития была связана с появившейся алгоритмической теорией информации Колмогорова; был предложен математический формализм для рассмотрения сложных систем — энтропия Колмогорова-Синая в теории хаоса. Аналогичная логика была использовано в совместных работах Грегори Хайтина (Gregory Chaitin) и Чарльза Беннетта (Charles Bennett), что привело к появлению концепции алгоритмической энтропии и ее использования в задачах статистической механики.

Важную роль в распространении информационных идей сыграла теория термодинамики черных дыр Джейкоба Бекенштейна (Jacob Bekenstein). Джон Уилер предложил Бекенштейну изучение сингулярностей в общей теории относительности, которые Уилер в 1967 году окрестил черными дырами. Вначале предполагалось, что черная дыра обладает для внешнего наблюдателя только тремя характеристиками (массой, зарядом и моментом). Дальнейшее рассмотрение (демон Уилера) привело к необходимости введения энтропии, что было выполнено Бекенштейном в рамках позиции, основанной на идеях Бриллюэна и Джейнса. Таким образом, информация связывалась с черной дырой, а далее из этого следовало наличие температуры черной дыры.

Бурный рост физики информации в 1990-х годах и информационные онтологии

Большим событием в информационной физике явился симпозиум *‘Сложность энтропия, и физика информации’* в 1989 году. Сборник статей участников появился в 1990 году под редакцией Войцеха Зурека (Wojciech Zurek ed, Complexity, Entropy, and the Physics of Information). Предисловие Зурека характеризуется в диссертации как манифест информационной физики, поскольку Зурек объединяет все линии развития вместе, в том числе связывая информацию с проблемой измерения в квантовой механике.

В этом разделе диссертации излагаются взгляды Зурека на энтропию под слоганом *‘Физическая энтропия = упущенная информация + известная стохастичность’*. Также рассматриваются взгляды Карлтона Кейвса (Carlton M.

Caves), который предлагал несколько отличную от Зурека программу объединения информации и энтропии.

После этого Анта рассматривает появившиеся взгляды физиков на онтологию информации.

Джон Уилер — Оно из бита, см. [Джон Уилер: Информация, физика, квант — поиск связей](#)

Ландауэр — Информация является физической, см. [Рольф Ландауэр: Физическая природа информации](#)

Пол Дэвис — Алгоритмическая информационная структура. Ученые в рамках алгоритмической теории информации ищут регулярности, которые сжимаются законами-алгоритмами.

В завершении упоминаются книги ‘Программируя Вселенную: Квантовый компьютер и будущее науки’ Сета Ллойда и ‘Расшифровка реальности: Вселенная как квантовая информация’ Влатко Ведрала (Vlatko Vedral, *Decoding Reality: The Universe as Quantum Information*) как пример всеохватывающей информационной метафизики.

Информация

Javier Anta Pulido, *Historical and Conceptual Foundations of Information Physics*. (2021). Chapter III, *The Informationalization of Thermal Physics*, Chapter IV, *The Golden Age of Information Physics*.

Леон Бриллюэн, *Наука и теория информации*, 1960.

Rudolf Carnap, *Two essays on entropy*, Univ of California Press, 1977.

John A. Wheeler. (1990) *Information, Physics, Quantum: The Search for Links*. In W. Zurek (ed.), *Complexity, Entropy and the Physics of Information*. p. 3 — 28.

[Джон Уилер: Информация, физика, квант — поиск связей](#)

Landauer R. *The physical nature of information*. *Physics letters A*. 1996, 217(4-5):188-93.

Landauer R. *Information is a physical entity*. *Physica A: Statistical Mechanics and its applications*. 1999, 263(1-4):63-7.

[Рольф Ландауэр: Физическая природа информации](#)

Дополнительная информация

[Цифровая физика](#): Обзор идей, лежащих в основе цифровой физики. Вычисления, связанные со вселенной, ограничиваются таковыми в рамках машины Тьюринга. Ландауэр, Фейнман, Цузе, Фредкин, Вольфрам.

[Физические процессы как вычисления](#): Как найти вычисления среди физических процессов? Ответ понятен, когда человек проводит вычисления, но без человека вопрос остается открытым.

Бруно Маршал: Метафизика вычислений: Описание идей логика Бруно Маршала. Он доказывает, что вычислительная теория сознания отвергает материализм и приводит к нейтральному монизму — существуют только вычисления.

Обсуждение

<https://evgeniirudnyi.livejournal.com/367152.html>