

Материалы к биографиям ученых и инженеров

ЛЮДВИГ БОЛЬЦМАН: ОТ АТОМИСТИКИ К СТАТИСТИЧЕСКОЙ МЕХАНИКЕ

О. В. КУЗНЕЦОВА

В 1877 г. Больцман открыл соотношение $S = k \ln W$, связывающее энтропию с вероятностью состояния системы [1]. Подобно установленному Максвеллом закону распределения молекул по скоростям, фундаментальное соотношение $S = k \ln W$, являющееся основанием статистической механики, было получено путем сочетания последовательно проводимой атомистической концепции и применения методов теории вероятностей к анализу систем, состоящих из большого числа частиц.

Классическая физика со времен Ньютона пыталась более или менее успешно свести все физические явления к движениям и взаимодействиям твердых и нелетящих атомов. Эта концепция атомистики просуществовала практически без изменений от Демокрита вплоть до конца XIX в. Ньютон считал атомы маленькими твердыми неделимыми объектами, из которых построена вся материя; он точно описывал силы, действующие между системами частиц, с помощью введенного им дифференциального исчисления. Уравнения движения Ньютона составляют фундамент классической механики и считаются точными законами, в соответствии с которыми движутся материальные точки. Ньютонская механика применялась в астрономии, при изучении движения жидкостей, колебаний упругих тел. Наконец, даже теория теплоты была сведена к механике, когда тепло стали рассматривать как энергию сложным образом колеблющихся молекул.

Однако изучение с помощью уравнений Ньютона крайне нерегулярных траекторий отдельных молекул казалось совершенно безнадежным предприятием. Это мнение было до тех пор, пока не начался процесс введения вероятностных методов в описание больших систем. Сейчас применение теории вероятностей в термодинамике или квантовой механике выглядит столь же естественным, как применение дифференциальных уравнений в астрономии. Однако в XIX в. статистические рассуждения вызывали у большинства физиков чувство неудовлетворенности. Первое доказательство Максвеллом закона распределения молекул по скоростям представлялось его современникам неубедительным, так как при доказательстве нигде не использовались какие-либо характеристики или свойства молекул газа. Для физиков XIX в. общие теоремы приобретали правдоподобность лишь в том случае, если их можно было подтвердить на примере хотя бы одной механической модели. Поэтому представляется вполне естественным, что в начале своей научной деятельности Л. Больцман пытался дать чисто механическое объяснение второго начала термодинамики. За год до опубликования докторской диссертации Больцмана «Механический смысл второго начала термодинамики» (1866 г.) Клаузиус придал феноменологической термодинамике завершенную форму, введя новую функцию состояния — энтропию. А еще через 15 лет Клаузиус осознал, что в основу теории тепловых явлений необходимо положить два закона, один из которых выводится из эквивалентности механической и тепловой энергий, а второй — из необратимости процессов превращения тепла в механическую работу. Экспериментальным обоснованием первого закона явился знаменитый опыт Джоуля. Второй закон, как отмечал Клаузиус, «значительно труднее для восприятия человеческим разумом, чем первый» [2, с. 127]. Посредством новой функции состояния — энтропии S — температура системы T связывалась с количеством тепла δQ , полученным системой при обратимых процессах, соотношением $\delta Q = TdS$; для необратимых процессов справедливо соотношение

в форме неравенства $\delta Q > T dS$ (при этом δQ — это приращение тепла, а dS — полный дифференциал энтропии, так что T здесь — интегрирующий множитель). В форме этих двух утверждений Клаузиус и сформулировал второе начало термодинамики.

Больцман, пытаясь отыскать те общие механические положения, из которых можно было бы получить обоснование закона энтропии, сначала выяснил, каким образом распределяется энергия между молекулами тела, находящегося в состоянии термодинамического равновесия. Эту проблему, сформулированную Максвеллом для специального случая, Больцман решил в общем виде. Тепловое равновесие при этом Больцман определял как такое, при котором число молекул, приобретающих некое значение скорости, равно числу молекул, изменяющих это значение на любое другое, — это есть статистическое определение. Из законов механики, в соответствии с которыми энергия системы распределяется между молекулами, Больцман вывел уравнение Карно — Клаузиуса $A = \frac{T_2 - T_1}{T_1} Q$, определяющее, какое количество тепла может быть превращено в механическую работу в обратимом циклическом процессе.

Впоследствии, перейдя к необратимым процессам, Больцман предположил, что число молекул, которые вследствие соударений выбывают из каких-либо состояний, будет отличаться от числа молекул, которые за то же время перейдут в соответствующее состояние. В 1872 г. в статье «Дальнейшее исследование равновесия газовых молекул» Больцман вывел свое знаменитое кинетическое уравнение для функции распределения $f(x, t)$ из характера изменения этой функции за небольшой отрезок времени в результате парных столкновений молекул. В этой же статье Больцман построил H-функцию, аргументы которой зависят от числа молекул, находящихся в том или ином состоянии; H-функция достигает минимального значения в состоянии равновесия и на этом основании была отождествлена Больцманом с энтропией. Величина этой функции определяет меру отклонения от статистического равновесия. Больцман доказал, что при выполнении предположения о молекулярном беспорядке (Stosszahlansatz) H-функция изменяется только в одном направлении, т. е. необратима.

В 1877 г. в работе «К вопросу о связи второго закона механической теории тепла с теорией вероятностей» Больцман сопоставил различные мыслимые распределения молекул в газе с их вероятностью. Новый метод Больцмана заключался в прямом подсчете числа различных способов, которыми может быть реализовано данное распределение при помощи комбинаторики. Полное описание молекулярного состояния, или комплекси, по терминологии Больцмана, требовало знания энергии каждой отдельной молекулы. Молекулярное распределение, где указаны числа $w_0, w_1, \dots, w_p$ (w_r — число молекул, обладающих энергией re ; r — целое число; e — некоторое малое значение энергии), может осуществляться некоторым числом различных комплекси. Это число P дается выражением

$$P = \frac{N!}{w_0! w_1! \dots w_p!}.$$

Больцман предложил считать P пропорциональным вероятности распределения.

В соответствии с исчислением вероятностей наиболее вероятным будет то распределение, для которого вероятность $P = N!/(w_0! w_1! \dots w_p!)$ будет максимальной.

Варьирование P при этих условиях приводит к формуле для w_r

$$w_r = e^{-\beta re}.$$

Тот факт, что после преобразования (по формуле Стирлинга) Больцман пришел к выражению

$$\log P = - \sum_r w_r \ln w_r \text{ const},$$

которое с точностью до постоянного множителя совпадает с полученным в 1872 г. выражением для H-функции $H = \sum f \log f$, позволил Больцману связать энтропию с вероятностью состояния: $S = k \ln P$.

Установление связи между энтропией и вероятностью, по словам Лауэ, есть вершина творчества Больцмана и одно из глубочайших достижений всей физики. Это соотношение содержит наиболее глубокое определение фундаментального понятия энтропии.

Основание энтропии на расчете вероятности часто применял Эйнштейн, который называл его «принципом Больцмана» и считал, что благодаря созданию этих понятий Больцман проложил путь квантовой теории.

В 1897 г. Планк, основной идеей которого была идея об абсолютном смысле термодинамической энтропии и который в течение всей своей жизни занимал резкую позицию по отношению к атомистике и больцмановской вероятностной трактовке энтропии, решил продемонстрировать плодотворность своего подхода на примере изучения излучения абсолютно черного тела.

Известно, что, «не видя иного пути», Планк вынужден был воспользоваться соотношением Больцмана, связывающим энтропию системы с вероятностью ее состояния, и понял, что подход Больцмана был необходим для объяснения квантового характера излучения. Планк стал известен как автор теории квантов, для создания которой он применил фундаментальную идею своего давнего оппонента*.

Ни Планк, ни Мах не принимали статистической интерпретации второго начала термодинамики. Мах всегда был настроен критически по отношению к вероятностному толкованию второго начала термодинамики Больцманом. В 1896 г. в «Теории тепла» Мах писал: «Механическая концепция второго закона, основанная на различении упорядоченного и неупорядоченного движения и установлении параллелизма между возрастанием энтропии и возрастанием неупорядоченности движения, кажется достаточно искусственной. Если принять, что из рассмотрения механической системы, состоящей из абсолютно упругих атомов, можно реально вывести тепловые процессы, и так как в такой системе нельзя получить действительный аналог возрастания энтропии, то вряд ли целесообразно предполагать, что в такой системе возможно нарушение второго закона, причем без вмешательства некоего демона» [7, с. 364].

Мах считал атомы искусственными, умственными конструкциями. «Ценность этих понятий для специальных, ограниченных целей неоспорима,— писал он.— Они остаются экономическим описанием символического опыта. Но мы не имеем права ожидать от них, как и от алгебраических символов, чего-либо большего, чем мы вложили в них, и какой-либо ясности, большей, чем от самого опыта» [8, с. 1589].

В. П. Карцев в работе, посвященной соотношению методологических концепций Максвелла, Больцмана и Маха, пишет, что Мах был неспособен признать решающий шаг, сделанный Больцманом в направлении отказа от феноменологической энтропии и введения вероятностной ее трактовки. Если для Больцмана чувственно наполненный внутренний образ («осязаемые» Больцманом атомы) явился тем основанием, без которого не могло бы быть возведено второе начало термодинамики до степени реального принципа, то для Маха с его принципом экономии мышления «введения новой сущности — вероятности — было бы глубоко чуждым его методологии и сделало бы для него невозможным получение столь важного физического вывода» [9, с. 99].

Планк изменил свое отношение к больцмановской статистической механике после дискуссии с Больцманом по проблемам необратимости излучения. Изучая проблему распределения энергии в спектре излучения абсолютно черного тела, Планк решил применить при исследовании равновесия между материей и излучением наряду с максвелловскими уравнениями электромагнитной теории света и соображения, основанные на понимании термодинамической природы равновесия между веществом и излучением.

Рассматривая законы рассеяния плоских электрических волн на линейных осцилляторах, Планк получил правильное выражение для распределения энергии, исходя из выражения Больцмана, связывающего энтропию и вероятность. Он вычислил вероятность, соответствующую определенной энергии монохроматических резонаторов, затем энтропию системы, а отсюда и ее температуру. При этом он предположил, что энергия системы резонатора состоит из дискретных квантов энергии величины $h\nu$.

В своей научной автобиографии Планк пишет, что он рассказал Больцману об атомистическом обосновании своего закона излучения, однако Лиза Мейтнер отмечала удивительный факт: в своих лекциях в Вене с 1902 по 1906 г. Больцман никогда не упоминал квантовой теории Планка, а также объяснения Эйнштейном явлений фотоэффекта и броуновского движения.

* Все эти коллизии подробно рассмотрены в книге: *Kuhn T. S. Bloch-Boggy theory and the quantum discontinuity (1884—1912): Oxford, 1978.*

Возможно, это связано с тем, что начиная с конца 70-х годов, когда Планк защитил свою докторскую диссертацию, в которой он делал попытки построить общую феноменологическую теорию энтропии, и вплоть до открытия Планком квантов излучения, он находился в оппозиции по отношению к кругу идей Больцмана; в этой связи кажется вполне объяснимым, что Больцман мог весьма настороженно воспринять такое резкое изменение позиции Планка.

Впоследствии Планк признавал, что он был неправ, отвергая вероятностную интерпретацию энтропии и необходимость атомистического мировоззрения в физической картине мира.

Для Больцмана же атомистика всегда являлась той базовой компонентой его научного мировоззрения, благодаря которой он пытался дать объяснение многим фактам, идеям и даже первоосновам природы и творчества.

По-видимому, существуют глубокие психологические корни, которые определяют стиль мышления ученого и часто являются основой для выбора в научной работе, когда некая гипотеза принимается, а другая, формально ей равноправная, отвергается или когда весь подход к определенной научной области принят или отброшен. По мнению Зоммерфельда, Больцман обладал «атомистически структурно устроенным интеллектом» [3, с. 197]. Эренфест писал: «Больцман как бы видит и осваивает молекулы в их неупорядоченном движении. В этом хаосе он сумел указать на строгие закономерности, существование которых гарантируется известными термодинамическими законами» [4, с. 132].

В историко-научной литературе иногда утверждается, что нападки на атомистическое учение, игравшее столь важную роль в научных представлениях Больцмана, со стороны Маха и энергетистов привели Больцмана к решению покончить жизнь самоубийством. Это крайне, на наш взгляд, несостоятельное утверждение, поскольку к концу жизни Больцмана его идеи, в частности атомистический подход, получили заслуженное признание.

Шредингер, например, вспоминал (в 1929 г.): «Старый Венский институт Людвиг Больцмана... дал мне возможность проникнуться идеями этого могучего ума. Круг этих идей стал для меня как бы первой любовью к науке, ничто другое меня так не захватывало и, пожалуй, никогда уже не захватит. К современной теории атома я приближался очень медленно. Ее внутренние противоречия звучат как пронзительные диссонансы по сравнению с чистой, неумолимо ясной последовательностью мысли Больцмана» [5, с. 678].

Популярность Больцмана среди ученых всего мира была необычайно высока, он был членом 39 академий наук (Геттингена, Вены, Берлина, Стокгольма, Упсалы, Турина, Рима, Амстердама, Петербурга, Нью-Йорка, Лондона, Парижа, Вашингтона и др.), а также почетным доктором университета в Оксфорде.

В Голландии группа физиков и физикохимиков во главе с Ван-дер-Ваальсом убедительно интерпретировала новые эксперименты на основе молекулярной теории. Х. А. Лоренц применил кинетическую теорию Больцмана к изучению распространения звука и поведению электронов в металле. Пуанкаре с живым интересом следил за развитием кинетической теории, а Марсель Бриллюэн и Поль Ланжевен пытались интерпретировать работы Максвелла и Больцмана.

Получал признание и больцмановский атомизм. В 1907 г., уже после того как объяснение броуновского движения убедило Оствальда в существовании атомов, в статье «Судьба атома» Оствальд, объясняя свой прежний скептицизм, отмечал, что атомизм был для него слишком украшен «цветами фантазии». «Чтобы создать картину, соответствующую разнообразию химических свойств, на помощь должна была прийти вся геометрия и все богатство форм, хранящееся в недрах строительного искусства» [10, с. 313].

В 1904 г. в юбилейном сборнике в честь 60-летия Людвиг Больцмана [18] появилась работа Смолуховского «О неравномерностях в распределении молекул в газе и их влиянии на энтропию в уравнении состояния», в которой он на примере локальных колебаний плотности идеального газа показывал, что в каждом элементе объема с вероятностью, определяемой законом ошибок Гаусса, происходят отклонения плотности от среднего значения. Смолуховский также показал, что для очень малых объемов, в которых содержится все же еще большое число молекул, происходит вырожде-

ние этого закона Гаусса, которое впоследствии оказалось существенным для объяснения опытов Сведберга.

В 1906 г. Смолуховский дал полное объяснение броуновского движения. По словам Зоммерфельда, «можно лишь удивляться, что Больцман, положивший всему основу, сам не извлек этого очевиднейшего следствия его кинетических принципов» [12, с. 150].

К 1905 г. относится также и появление короткой заметки Эйнштейна о броуновском движении, основанном целиком на атомизме материи. Эйнштейн писал: «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» [13, с. 108].

Уже в 1908 г., исходя из формулы Эйнштейна, Ж. Перрен экспериментально определил число Авогадро и заряд электрона. Уверенность Перрена в реальности атомов и его блестящие эксперименты привели к решительным изменениям в мировоззрении ученых в пользу атомистики.

Атомистическая программа в науке завершилась в XIX в. созданием статистической механики. Эту мысль четко выразил Хинчин: «Специфика систем, изучаемых статистической механикой, состоит, главным образом, в том огромном числе степеней свободы, которыми располагают эти системы. Методологически это означает, что позиция статистической механики определяется не механической природой, а атомистическим строением материи» [6, с. 8].

С первыми успехами атомистики навсегда останется связанным имя Больцмана — горячего приверженца этой концепции, одного из создателей статистической механики.

Литература

1. Boltzmann L. Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatzes der Wärme-theorie und Wahrscheinlichkeitsrechnung, Wien, Ber. 76, 1877.
2. Klein M. J. Gibbs on Clausius, Historical Studies in the Physical Sciences/Ed. McCormach.-Philadelphia, 1969.
3. Sommerfeld A. Ludwig Boltzmann zum Gedächtnis.—Chem. Z., 47, 1944.
4. Ehrenfest P. Ludwig Boltzmann. Coll. Sci. Pap.—Amsterdam, 1959; русск. перев. в кн.: Л. Больцман. Статьи и речи. М., 1970.
5. Шредингер Э. Вступительная академическая речь 4 июня 1929 г.— В кн.: М. Планк. Избранные труды.— М., 1975.
6. Хинчин А. Я. Математические основания статистической механики.— М.— Л., 1943.
7. Mach E. Wärmelehre.— Leipzig, 1896.
8. Mach E. Zur Geschichte und Kritik der Carnot'schen Wärmegesetzes. Wien, Ber., 1892, 101.
9. Карцев В. П. Максвелл и чувственный образ физического мира.— Вопр. истории естеств. и техн., 1980, № 1.
10. Оствальд В. Насыщенная потребность.— СПб., 1912.
11. Festschrift L. Boltzmann gewidmet zum 60 Geburtstag.— Leipzig, 1904.
12. Sommerfeld A. Zum Andenken an Marian Smoluchowski.— Phys. Z. 18, 1917; русск. перев. в кн.: Зоммерфельд А. Пути познания в физике.— М., 1973.
13. Einstein A. Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geordnete Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen.— Ann. Phys., 1905, t. 17.

А. С. ПОПОВ И ПРОЕКТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОСВЕЩЕНИЯ В ПЕРМИ

Д. Д. СОНИНА (Пермь)

А. С. Попов родился 4(16) марта 1859 г. на Западном Урале, в поселке Турьинский рудник. Начальное образование он получил в Пермской духовной семинарии. Это было единственно доступное для детей сельского духовенства среднее учебное заве-

дение, в котором можно было подготовиться в университет. В разное время в этой семинарии обучались писатель Д. Н. Мамин-Сибиряк, известный специалист по сельскому хозяйству А. В. Варушкин, крупный русский математик, член-корреспондент Петербургской, Парижской, Неаполитанской академий наук И. М. Первушкин. Здесь сложились устойчивые демократические традиции. Попов окончил четыре общеобразовательных класса семинарии и затем сдал экзамен на аттестат зрелости в Пермской мужской гимназии.

Интерес к точным наукам Попов обнаружил очень рано, еще в семинарии за ним закрепилось прозвище «математик». Первые импульсы к увлечению физическими науками дали Попову курсы физики К. Д. Краевича, Н. А. Любимова и особенно учебники физики А. Гано.

«Популярная физика» А. Гано, автора известного «Полного курса физики», была переведена Ф. Павленковым в 1871 г., в 1875 г. было выпущено ее 2-е издание, которым и пользовался Попов. Ф. Павленков дополнил перевод большим количеством практических вопросов (более 200), «разрешение которых требует осмысленного применения тех или иных физических законов». Чтение этой книги побудило Попова избрать своей специальностью физику, единственную естественнонаучную дисциплину, которая преподавалась в семинарии. Уже позже, в Петербурге, он заинтересовался электротехникой, хотя, по образному выражению самого 24-летнего Попова, русская электротехника того времени «барахталась в пеленках».

Связи изобретателя радио с Уралом, Пермью в последующие годы не прекращались. Уральский краевед А. И. Шарц передал в Пермский государственный архив «Записку к проектам электрического освещения в Перми», написанную Поповым [1]. Под запиской стоит пометка: «Кронштадт, 15 сентября 1900 г.». Когда в Перми было решено устроить электрическое освещение, все семь проектов, предложенных иностранными и российскими фирмами, были отправлены в Кронштадт на экспертизу знаменитому ученому. Ни один из этих проектов его не удовлетворил. Попов считал, что 2 тыс. электрических ламп, запроектированных для освещения города на Каме, недостаточно. Он предлагал установить в частных домах и общественных зданиях города 4 тыс. электрических ламп, а на улицах установить дополнительно 75 электрических фонарей с вольтовой дугой (с силой тока 10 А). Он дал подробный анализ выбора вида тока в зависимости от расстояния между станцией и потребителем, предложил заменить постоянный ток на переменный, что было весьма прогрессивным решением, и предложил свой расчет динамомашин. «Электростанцию,— писал он,— надо строить не только для освещения центральной части города, но и окраины» [1, с. 2]. Поэтому он вдвое увеличил мощность станций. Практически родился новый, 8-й проект освещения города, который и был осуществлен в 1902 г. «Записка ...» на 33 страницах включает расчет стоимости освещения [1, с. 16—27], краткий перечень отдельных частей стоимости оборудования электрической станции и электрического освещения в г. Перми [1, с. 29], список необходимых аппаратов для устройства электрической станции и электрического освещения в г. Перми.

По просьбе Пермской городской управы Попов консультировал составление проекта первой городской электростанции. По этому проекту в городе была построена электростанция, ее заложили в 1901 г. На вступившей в действие в 1902 г. станции были установлены паровая машина мощностью 150 л. с. и генератор на 100 кВт.

Уральский период жизни Попова отражен в коллекциях Пермского областного краеведческого музея. Его именем названа одна из улиц Перми.

Литература

1. Попов А. С. Записка к проектам электрического освещения в Перми, 1900 г. Рукопись, Библиотека им. А. М. Горького, г. Пермь.