



МАРС ПЛАНК
(1858—1947)

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

К СТОЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ М. ПЛАНКА

НАУЧНАЯ АВТОБИОГРАФИЯ*)

Макс Планк

С юности меня вдохновило на занятие наукой осознание того, отнюдь не самоочевидного факта, что законы нашего мышления совпадают с закономерностями, имеющими место в процессе получения впечатлений от внешнего мира и что, следовательно, человек может судить об этих закономерностях при помощи чистого мышления. Существенно важным при этом является то, что внешний мир представляет собой нечто не зависящее от нас, абсолютное, чему противопостойм мы, а поиски законов, относящихся к этому абсолютному, представляются мне самой прекрасной задачей в жизни ученого.

Эти мысли укрепились и получили развитие благодаря превосходному обучению, которое я в течение многих лет получал в мюнхенской Максимилиановской гимназии у преподавателя математики Германа Мюллера, общительного, проникательного, остроумного человека, умевшего на ярких примерах объяснять смысл тех физических законов, о которых он нам, ученикам, говорил. Так получилось, что в качестве первого закона, не зависящего от человека и имеющего абсолютное значение, я, как откровение, воспринял принцип сохранения энергии. Незабываем для меня рассказ Мюллера о том, как каменщик с трудом втаскивает на крышу дома тяжелую черепицу. Работа, которую он при этом совершает, не теряется, она полностью сохраняется, возможно, на долгие годы, до тех пор, пока в один прекрасный день эта черепица, быть может, сорвется и свалится кому-нибудь на голову.

После окончания гимназии я занимался в университете, сначала в течение трех лет в Мюнхене, а потом еще год в Берлине. Я слушал экспериментальную физику и математику; кафедры теоретической физики тогда еще не было. В Мюнхене моими учителями были физик Ф. фон Жолли и математики Людвиг Зейдель и Густав Бауэр. У всех троих я многому научился и храню о них благодарную память. Однако в научном отношении они были, в сущности, людьми ограниченными, как это я впервые понял в Берлине, где я значительно расширил свой научный кругозор под руководством Германа фон Гельмгольца и Густава Кирхгофа, работы которых, проложившие новые пути и завоевавшие мировое признание, были легко доступны для их учеников. Правда, я должен признаться, что мне эти лекции не принесли заметной пользы. Гельмголец, очевидно, никогда как следует не готовился к лекциям, говорил все время запинаясь, причем необходимые данные извлекал из небольшой записной книжки

*) M a x P l a n k, Wissenschaftliche Selbstbiographie, Leipzig, 1955. Перевод В. С. Кудрявцева

к тому же постоянно ошибался у доски, а нас не покидало такое чувство, как будто ему самому эта лекция по меньшей мере так же надоела, как и нам. Вследствие этого число слушателей мало-помалу уменьшалось, в конце концов осталось только три человека, в том числе я и мой друг Рудольф Леман-Филес, ставший впоследствии астрономом.

В противоположность этому Кирхгоф читал тщательно отработанный курс лекций, в котором была взвешена и стояла на своем месте каждая фраза. Ни словом меньше, ни словом больше. Но в целом это действовало как нечто заученное наизусть, сухое и однообразное. Мы восхищались самим лектором, а не тем, о чем он говорил.

При таких обстоятельствах я мог удовлетворить свою потребность в продолжении научного образования только тем, что читал труды, интересовавшие меня; это естественно были труды, связанные с законом сохранения энергии. Так случилось, что в мои руки попали работы Рудольфа Клаузиуса, доступный язык и ясность которых произвели на меня сильное впечатление, и я углублялся в них со все большим воодушевлением. В особенности ценил я точную формулировку обоих начал теории теплоты, данную Клаузиусом, и впервые проведенное им отчетливое их разграничение. Ведь до того времени в качестве вывода из материальной теории теплоты существовало представление, что переход тепла от тела с более высокой к телу с более низкой температурой аналогичен опусканию тяжелого тела с большей высоты до меньшей, и нелегко было вытеснить это ошибочное воззрение.

Клаузиус проводил свое доказательство второго начала, исходя из гипотезы, что «тепло само по себе не переходит от более холодного к более теплому телу». Но эта гипотеза требует особого пояснения, ибо она выражает не только то, что тепло не переходит от более холодного к более теплому телу прямым путем, но и тот факт, что не существует способа передачи тепла от более холодного к более теплому телу без того, чтобы в природе не осталось каких-либо изменений, служащих для компенсации такого перехода.

Стремясь в этом пункте достигнуть наибольшей ясности, я пришел к такой формулировке упомянутой гипотезы, которая мне кажется проще и удобнее. Эта формулировка гласит: «Никаким способом нельзя процесс теплопроводности сделать полностью обратимым». Этим выражается то же самое, что и в формулировке Клаузиуса, причем не требуется никакого дополнительного пояснения. Процесс, который никаким способом не может быть сделан полностью обратимым, я назвал «естественным» (теперь его называют «необратимым»).

Однако ошибка, которую совершают при слишком узком толковании формулировки Клаузиуса, и против которой я неустанно боролся в течение всей моей жизни, по-видимому, не искоренена. И по сей день вместо указанного выше определения необратимости я встречаю следующее: «Необратимым является процесс, который не может протекать в обратном направлении». В действительности же этого недостаточно, потому что прежде всего очевидно, что процесс, который не может протекать в обратном направлении, каким-либо способом может быть сделан полностью обратимым.

Поскольку решение вопроса о том, является ли некоторый процесс обратимым или необратимым, зависит только от свойств начального и конечного состояний, но не от способа протекания процесса, то при необратимых процессах конечное состояние в известном смысле выделено по отношению к начальному состоянию, природа, так сказать, отдает ему большее «предпочтение». В качестве меры такого предпочтения у меня фигурирует энтропия Клаузиуса, а второе начало истолковывается как закон, ут-

верждающий, что в любом естественном процессе сумма энтропий всех тел, участвующих в процессе, возрастает. Вышеуказанные рассуждения я обработал в своей докторской диссертации, завершенной в Мюнхене в 1879 г.

Впечатление, произведенное этим трудом на тогдашнюю физическую общественность, было равно нулю. Из разговоров со своими университетскими преподавателями я точно знал, что они не имеют никакого понятия о его содержании. В качестве диссертации они пропустили его по-видимому только потому, что знали меня по прежним работам в физическом практикуме и на математических семинарах. У тех физиков, которым тема была более близка, я тоже не вызвал никакого интереса, не говоря уже об одобрении. Гельмгольц, по-видимому, вообще не читал этой моей диссертации, Кирхгоф категорически не соглашался с ее содержанием, утверждая, что понятие энтропии, которая может быть измерена, а следовательно, и определена только в обратимых процессах, не применимо к необратимым процессам. К Клаузиусу мне не удалось попасть; на мое письмо он не ответил, попытка лично представиться ему в Бонне оказалась безрезультатной, так как я не застал его дома. Я вел переписку с Карлом Нейманом, жившим в Лейпциге, однако и она ни к чему не привела.

Подобные испытания все же не помешали мне глубоко проникнуться сознанием важности этой задачи и продолжить изучение энтропии, которую я рассматривал наряду с энергией как важнейшее свойство физического состояния. Так как максимум энтропии отвечает состоянию равновесия, то знание энтропии позволяет установить все законы физического и химического равновесия. Эту программу я и реализовал в работах, выполненных в течение ряда последующих лет. Сначала, в моей Мюнхенской диссертации на право чтения лекций в 1880 г. это было сделано для изменения агрегатного состояния, а затем для газовых смесей. Повсюду это приводило к плодотворным результатам. К сожалению, оказалось, как я потом выяснил, что великий американский теоретик Джошуа Уиллард Гиббс опередил меня, еще раньше сформулировав те же самые положения, частично даже в еще более общем виде, так что и в этой области мои труды не увенчались внешним успехом.

Будучи приват-доцентом в Мюнхене в течение многих лет, я напрасно ждал приглашения в профессию, на что, конечно, было мало шансов, так как теоретическая физика тогда еще не была отдельным предметом. Тем более настоятельной была потребность так или иначе выдвинуться в научном мире.

С этим намерением я решил разработать проблему о сущности энергии, поставленную Геттингенским философским факультетом на соискание премии за 1887 г. Еще до окончания этой работы, весной 1885 г. меня пригласили в качестве экстраординарного профессора теоретической физики в Кильский университет. Это казалось мне спасением; тот момент, когда министериял—директор Альтгоф пригласил меня к себе в отель Мариенбад и более подробно сообщил мне условия, я считал самым счастливым в моей жизни. Это было потому, что хотя в доме родителей я и вел насколько возможно прекрасную и приятную жизнь, все же жажда самостоятельности становилась все сильнее, и я стремился обзавестись своим собственным домашним хозяйством.

Конечно, я не догадывался, что этому счастливому случаю я был обязан не столько своим собственным научным успехам, сколько тому обстоятельству, что профессор физики в Киле Густав Карстен был близким другом моего отца. Все же моя радость была неописуемой, мое честолюбие было удовлетворено оказанным мне доверием.

Вскоре я переехал в Киль; моя геттингенская работа была там вскоре закончена и увенчалась второй премией. Кроме моей разработки проблемы,

были представлены еще две другие, которые не удостоились премии. Я попытался выяснить вопрос, почему моя работа не получила первой премии, и ответ нашел в подробном решении Геттингенского факультета. После указания на несколько второстепенных недостатков там значилось: «Наконец, факультет должен признать несостоятельными те замечания, в которых автор пытается найти согласие с законом Вебера». С этими замечаниями дело обстояло так: В. Вебер был профессором физики в Геттингене, и между Вебером и Гельмгольцем тогда происходил острый научный спор, в котором я категорически стоял на стороне Гельмгольца. Думаю, что я не ошибался, когда в этом обстоятельстве видел главную причину того, почему Геттингенский факультет отказал мне в первой премии.

Если своим поведением я нанес себе ущерб в Геттингене, то, с другой стороны, я привлек к себе внимание в Берлине, и это мне предстояло вскоре почувствовать.

После окончания работы для Геттингена я опять вернулся к своей излюбленной теме и написал ряд статей, которые я собрал вместе под общим заголовком «О принципе возрастания энтропии». В них разрабатывались законы протекания химических реакций, а также диссоциации газов и, наконец, свойства разбавленных растворов. В отношении последних, моя теория привела к выводу, что для большинства растворов солей наблюдаемая величина понижения точки замерзания может быть объяснена только диссоциацией растворенного вещества. Это давало термодинамическое обоснование теории диссоциации электролитов, установленной Сванте Аррениусом примерно в то же время. Из-за этого обоснования я, к сожалению, имел досадный конфликт, потому что Аррениус в довольно недоброжелательной форме оспаривал применимость моего способа доказательства, причем он подчеркивал, что его гипотеза относится к ионам, т. е. к электрически заряженным частицам, на что я мог возразить только то, что термодинамические законы применимы независимо от того, заряжены частицы или нет.

Весной 1889 г., после смерти Кирхгофа, по предложению Берлинского философского факультета я был приглашен в качестве его преемника на кафедру теоретической физики в университете, сначала экстраординарным, а с 1892 г.—ординарным профессором. Это были годы, в течение которых я испытал, пожалуй, сильнейшее расширение всего своего научного кругозора. Это было потому, что я непосредственно общался с людьми, занимавшими тогда ведущее положение в мировых научных исследованиях. Таким человеком был, прежде всего, Гельмгольц. Я узнал его и с общечеловеческой стороны и столь же высоко оценил его в этом, как уже издавна—в научном отношении. Вся его личность, неподкупность его суждений, его скромный характер воплощали в себе достоинство и истинность науки. К этому присоединялась человеческая доброта, которая глубоко запала мне в душу. Когда во время разговора он смотрел на меня своим спокойным, пронизательно пытливым и вместе с тем доброжелательным взглядом, меня охватывало чувство безграничной детской преданности, я откровенно мог довериться ему все, что было у меня на сердце, с полной уверенностью, что в его лице я найду справедливого и снисходительного судью, а какое-нибудь одобрительное или даже хвалебное слово из его уст могло осчастливить меня больше, чем любой внешний успех.

Такое происходило со мной несколько раз. К этому я отношу подчеркнутую благодарность, которую он мне высказал после моей речи, посвященной памяти Генриха Герца в Физическом обществе, а также согласие с моей теорией растворов, которое он выразил незадолго до моего избра-

ния в Прусскую Академию Наук. Каждое такое небольшое событие я сохраняю в моей памяти на всю жизнь как бесценное сокровище.

Кроме Гельмгольца, я вскоре более близко познакомился и с Вильгельмом фон Бецольдом, которого я знал еще в Мюнхене, и с Августом Кундтом, директором Физического института, человеком темпераментным и всеми любимым за его подлинную сердечность.

Не так легко удавалось мне ладить с другими физиками. Таким был, например, Адольф Паальцов, физик в Высшей Технической школе в Шарлоттенбурге, тонкий экспериментатор и притом истый берлинец. Он обходился со мной очень любезно, но у меня всегда было такое чувство, что он меня считает, в сущности, ненужным человеком. Ведь я тогда был среди всех физиков единственным теоретиком, до некоторой степени физиком *sui generis*, что делало мое положение не совсем легким. Я также ясно чувствовал, что в Физическом институте господствуют ассистенты встречают меня с подчеркнутой сдержанностью. Однако со временем, когда мы лучше познакомились друг с другом, мы сблизились, а с одним из них, Генрихом Рубенсом, я потом был связан сердечной дружбой в продолжении многих лет, вплоть до его безвременной кончины.

По какой-то случайности, одновременно с началом моей деятельности в Берлине, некоторое время я был занят работой в области, далекой от моих специальных физических интересов. А именно, как раз в это время за счет министерства Институту теоретической физики в качестве инвентаря была передана большая физгармония с натуральной чистой настройкой, сконструированная гениальным учителем народной школы Карлом Айтцом в Эйслебене и изготовленный на фортепианной фабрике Шидмейера в Штутгарте. Мне было дано задание изучить на этом инструменте натуральную настройку. Это я делал также с большим интересом, особенно с целью выяснения вопроса о той роли, которую играет натуральная настройка в нашей современной вокальной музыке, где отсутствует инструментальное сопровождение. При этом до некоторой степени неожиданно я пришел к тому результату, что при всех обстоятельствах наше ухо предпочитает темперированную настройку натуральной настройке. Даже в гармоничном мажорном трезвучии натуральная терция звучит слабее и менее выразительно, чем темперированная терция. Нет сомнения в том, что этот факт для нынешнего поколения объясняется привычкой, выработанной в течение многих лет и поколений, так как до Иог. Себ. Баха темперированная настройка была отнюдь не общеизвестной.

Помимо знакомства с новыми интересными людьми, мой переезд в Берлин привел к значительному расширению моей научной переписки. Прежде всего, я обратил внимание на весьма плодотворную теорию, предложенную В. Нернстом в Геттингене, согласно которой электрические напряжения, появляющиеся в растворах электролитов с неоднородной концентрацией, образуются от взаимодействия электрической силы, вызываемой зарядами, с осмотическим давлением. На основании этой теории мне удалось вычислить разность потенциалов двух электролитических растворов. Моя формула, как мне письменно сообщил Нернст, была подтверждена его измерениями.

В связи с проблемами теории электрической диссоциации у меня вскоре завязалась оживленная переписка с находившимся в Лейпциге Вильгельмом Оствальдом, который делал различные критические разъяснения, но всегда проводил их в дружеском тоне. Оствальд, по своей натуре имевший большую склонность к систематике, различал три вида энергии, в соответствии с тремя измерениями пространства: энергию, зависящую от расстояния, поверхностную энергию и пространственную энергию. Он говорил, что энергией, зависящей от расстояния, может являться гравитация,

поверхностной энергией может быть поверхностное натяжение в жидкости, а пространственной энергией—объемная энергия. На это я возражал, утверждая, между прочим, что никакой объемной энергии в остальдовском смысле не существует. Например, в случае идеального газа энергия даже вообще не зависит от объема, а зависит только от температуры. Если идеальный газ расширяется без совершения внешней работы, то объем его увеличивается, но энергия не меняется, хотя по Остальду энергия должна была бы уменьшиться, в соответствии с уменьшением давления.

Другой спор возник в связи с вопросом об аналогии между переходом тепла от тела с более высокой температурой к телу с более низкой температурой и опусканием весомого тела с большей высоты до меньшей. Еще раньше я подчеркивал необходимость отчетливого разделения этих двух процессов, потому что они принципиально отличаются друг от друга, в такой же степени, как различаются друг от друга первое и второе начала теории теплоты. При этом я натолкнулся на противоречие с воззрениями, имевшими тогда всеобщее распространение, и я не мог добиться у своих коллег признания моей точки зрения. Существовали даже такие физики, которые считали ход мыслей Клаузиуса излишне усложненным и к тому же неясным, и которые, в частности, не соглашались с предоставлением теплоте исключительного места среди различных видов энергии, обусловленного введением понятия необратимости. В противовес теории теплоты Клаузиуса они создали так называемую энергетику, в которой первое начало, так же как и у Клаузиуса, выражало принцип сохранения энергии, но второе начало, которое должно указывать направление всего происходящего, проводило полную аналогию между переходом тепла от тела с более высокой температурой к телу с более низкой температурой и опусканием весомого тела с большей высоты до меньшей. Из этого следовало, что предположение о необратимости не является существенным для доказательства второго начала; далее опровергалось существование нуля абсолютной температуры ссылкой на то, что можно измерять только разности температур, так же как и разности высот.

Горьким испытанием в моей научной жизни являлось то, что лишь изредка мне удавалось, а точнее — никогда не удавалось, получить всеобщее признание какого-нибудь нового утверждения, правильность которого я мог доказать совершенно строго, но только теоретически. Так же вышло и на этот раз. Вся моя аргументация не была услышана. Ведь нельзя было выступать против таких авторитетов, как В. Остальд, Г. Гельм, Э. Мах. Я был совершенно уверен, что мое утверждение о принципиальном различии между теплопроводностью и падением груза в конце концов окажется правильным. Но досадным было то, что я вовсе не испытывал удовлетворения от того, что я должен одержать успех в конечном счете. Всеобщее признание правоты моего утверждения пришло совсем с другой стороны, не имеющей никакой связи с соображениями, на которых было основано мое утверждение, а именно со стороны атомистической теории в том ее виде, как она была развита Людвигом Больцманом.

Для заданного газа, находящегося в заданном состоянии, Больцману удалось составить некоторую величину H , которая обладает тем свойством, что ее значение постоянно уменьшается со временем. Следовательно, для того, чтобы получить принцип возрастания энтропии, нужно только взять отрицательное значение этой величины и отождествить его с энтропией. При этом доказывается также и то, что для процессов в газах характерна необратимость.

Таким образом, фактический ход событий оказался таким, что хотя мое утверждение о принципиальном различии между теплопроводностью

и некоторым чисто механическим процессом и одержало победу над воззрением, предлагавшимся тогдашними авторитетами, однако мое участие в борьбе оказалось совершенно излишним, так как и без него точно так же наступил бы перелом.

Понятно, что эта борьба, в которой противостояли друг другу главным образом Больцман и Оствальд, велась довольно оживленно и давала повод для многих ярких эффектов, потому что оба противника по находчивости и природному остроумию были достойны друг друга. При этом я сам мог играть лишь роль секунданта Больцмана, причем мои услуги он, конечно, совершенно не ценил и даже не считал желательными, так как Больцман очень хорошо знал, что моя точка зрения существенно отличалась от его точки зрения. Особенно неприятно ему было то, что к атомистической теории, которая составляла основу всей его исследовательской работы, я относился не только равнодушно, но даже несколько отрицательно. Причина этого заключалась в том, что принципу возрастания энтропии, как и принципу сохранения энергии, я приписывал тогда применимость во всех без исключения случаях, в то время как по Больцману первый из указанных принципов являлся только вероятностным законом, который, как таковой, допускает исключения. Величина H в некоторые моменты может также и возрастать. При выводе своей так называемой H -теоремы Больцман совершенно не обращал внимания на этот пункт, и один мой талантливый ученик, Е. Цермело, подчеркнул обусловленную этим нестрогость обоснования теоремы. В самом деле, в вычислениях Больцмана отсутствует упоминание о допущении молекулярного беспорядка, необходимом для справедливости его теоремы. По-видимому, он считал это чем-то само собой разумеющимся. Во всяком случае он ответил молодому Цермело с большой остротой, которая отчасти задела также и меня, так как работа Цермело появилась с моего одобрения. Так вышло, что всю жизнь, как при последующих встречах, так и в своих публикациях и в нашей частной переписке Больцман сохранял со мной раздраженный тон и лишь в последние годы его жизни, когда я рассказал ему об атомистическом обосновании своего закона излучения, этот тон уступил место дружескому согласию.

То, что в борьбе против Оствальда и энергетиков в конце концов победил Больцман, для меня было, как это видно из сказанного, само собой разумеющимся фактом. Принципиальное отличие теплопроводности от чисто механических процессов стало общепризнанным. При этом я смог установить один, по моему мнению, замечательный факт. Обычно новые научные истины побеждают не так, что их противников убеждают и они признают свою неправоту, а большей частью так, что противники эти постепенно вымирают, а подрастающее поколение усваивает истину сразу.

В остальном описанные здесь дискуссии представляли для меня лишь относительно малую привлекательность, так как из этого не могло получиться чего-то нового. Поэтому вскоре мои интересы сосредоточились на иной проблеме, которая захватила меня на долгое время и привела к ряду новых работ. Измерения О. Люммера и Е. Прингсгейма по исследованию теплового спектра, проведенные в Государственном физико-техническом институте, привлекли мое внимание к закону Кирхгофа. Этот закон утверждает, что если в отечанном пустом пространстве, ограниченном полностью отражающими стенками, находятся совершенно произвольные излучающие и поглощающие тела, то с течением времени устанавливается такое состояние, при котором все тела имеют одну и ту же температуру, а излучение по всем своим свойствам, в том числе по спектральному распределению энергии, зависит только от температуры, но не от свойств тел. Таким образом это, так называемое нормальное, распределение энергии

представляло собой нечто абсолютное, и так как поиски этого абсолютного всегда представлялись мне самой прекрасной задачей исследователя, то я с рвением принялся за работу. В качестве прямого пути решения проблемы предлагалось использовать максвелловские уравнения электромагнитной теории света. Я также думал, что если пустое пространство заполнить простыми линейными осцилляторами или резонаторами со слабым затуханием и различными собственными периодами, то можно ожидать, что обмен энергией между осцилляторами, вызванный взаимным переизлучением, с течением времени приведет к стационарному состоянию, соответствующему (по закону Кирхгофа) нормальному распределению энергии.

В результате целого ряда этих исследований, некоторые из которых могли быть проведены сравнением с имевшимися наблюдениями, такими, как, например, измерения затухания В. Бьеркнеса, и потому были надежными, было установлено общее соотношение между энергией некоторого осциллятора, обладающего определенным собственным периодом, и энергией излучения окружающего поля в соответствующей спектральной области при стационарном обмене энергией. При этом получился тот замечательный результат, что такое соотношение совершенно не зависит от постоянной затухания осциллятора — обстоятельство, которое для меня было очень радостным и желанным, потому что оно позволяло до такой степени упростить всю проблему, что вместо энергии излучения можно было взять энергию осциллятора, и таким образом вместо запутанной системы, имеющей много степеней свободы, возникала простая система с одной единственной степенью свободы.

Конечно, этот результат был не более чем подготовительным шагом к началу решения первоначальной проблемы, которая теперь столь неприступно встала передо мной со всей своей головокружительной высотой. Первая попытка по ее преодолению не удалась, так как мои первоначальные тайные надежды на то, что излучение, испускаемое осциллятором, каким-нибудь характерным образом отличается от поглощаемого излучения, оказались обманчивыми. Осциллятор реагирует лишь на такое излучение, которое он сам испускает, и не проявляет ни в малейшей мере чувствительности к соседним областям спектра.

К тому же мое предположение о том, что осциллятор должен оказывать одностороннее и, следовательно, необратимое воздействие на энергию окружающего поля, вызывало энергичное возражение со стороны искушенного в этом вопросе Больцмана, который доказал, что по законам классической динамики каждый из рассматриваемых мною процессов может протекать также в строго противоположном направлении.

Таким образом, сферическая волна, испущенная осциллятором, может быть обращена и будет распространяться вовнутрь до тех пор, пока не сойдется на осцилляторе и опять поглотится им, что формально должно давать поглощение энергии осциллятором в том направлении, откуда пришла волна. Такие особые процессы, как сферические волны, направленные внутрь, я мог, конечно, исключить потому, что я ввел некоторое особое условие — гипотезу об естественном излучении, которая в теории излучения играет такую же роль, как и гипотеза о молекулярном беспорядке в кинетической теории газов. Указанная выше гипотеза вводит необратимость в процессы излучения. Однако вычисления все более отчетливо показывали, что в моем понимании узлового пункта проблемы все еще отсутствует существенное звено.

Мне не оставалось ничего другого, как подойти к проблеме еще с противоположной стороны, с точки зрения термодинамики, в которой к тому же я чувствовал себя уверенно, как дома. В самом деле, мое прежнее изучение

второго начала теории теплоты здесь мне весьма пригодилось, потому что я сразу же почувствовал, что нужно вывести соотношение не между температурой и энергией осциллятора, а между его энтропией и энергией. В процессе работы над этой проблемой по прихоти судьбы оказалось, что обстоятельство, которое прежде я воспринимал как неприятное, а именно недостаток интереса у моих коллег к избранному мною направлению исследований, теперь наоборот принесло известное облегчение в моей работе. Ибо тогда проблемой распределения энергии в нормальном спектре как с экспериментальной, так и с теоретической стороны, занимался целый ряд выдающихся физиков. Но все они вели поиски только в том направлении, что старались установить зависимость интенсивности излучения от температуры, тогда как я подозревал о существовании глубокой связи между энтропией и энергией. Так как смысл понятия энтропии тогда еще не получил подобающей ему оценки, то никто не интересовался методом, которым я пользовался, и я мог проводить свои вычисления не спеша и основательно, не опасаясь помех или опережения с чьей-либо стороны.

Так как для необратимости процесса обмена энергией между некоторым осциллятором и возбужденным им излучением определяющее значение имеют вторые производные энтропии осциллятора по его энергии, то я, подсчитав значение этой величины для того случая, когда для распределения энергии справедлив закон Вина, находившийся тогда в центре внимания, и пришел к тому замечательному результату, что в этом случае обратная величина указанной производной, которую я обозначу здесь через R , пропорциональна энергии. Эта связь была столь поразительно простой, что некоторое время я считал ее совершенно общей и старался обосновать теоретически. Тем временем в результате уточненных измерений такая точка зрения оказалась все же несостоятельной. В то время как при малых значениях плотности энергии и соответственно при малых длинах волн указанная связь, а также и закон Вина превосходно подтверждались, при больших плотностях энергии и соответственно для длинных волн были установлены (впервые Люммером и Прингсгеймом) заметные отклонения. Далее, в измерениях с остаточными инфракрасными лучами плавленого шпата и каменной соли, выполненных Г. Рубенсом и Ф. Курлбаумом, обнаружилось совершенно отличное от закона Вина поведение, но оно было столь же простым, потому что при переходе к большим плотностям энергии и большим длинам волн величина R становится пропорциональной не энергии, а квадрату энергии.

Таким образом, прямыми опытами для функции R были установлены два простых предельных вида: при малых энергиях R пропорционально энергии, а при больших энергиях — квадрату энергии. Понятно, что если из заданного закона распределения по энергии получается некоторое определенное значение R , то и обратно, каждое выражение для R тоже приводит к определенному закону распределения энергии. Таким образом, дело теперь состояло в том, чтобы найти такое выражение для R , которое давало бы закон распределения энергии, совпадающий с экспериментально установленным. Теперь ничего другого не оставалось, как приравнять в общем случае величину R сумме двух членов — одного линейного, а другого — квадратичного по энергии, так что при малых энергиях решающее значение имел первый член, а при больших — второй. При этом была найдена новая формула для излучения, которую я представил на заседании Берлинского физического общества 19 октября 1900 г. и рекомендовал проверить.

На следующий день утром меня разыскал мой коллега Рубенс и рассказал мне, что после закрытия заседания в ту же ночь моя формула была

аккуратно сравнена с данными его измерений и повсюду было найдено удовлетворительное совпадение. Было найдено совпадение также и с данными Люммера и Прингсгейма, которые, правда, вначале считали, что существуют отклонения, но вскоре сняли свое возражение, так как оказалось, как мне устно сообщил Прингсгейм, что найденные отклонения были обусловлены вычислительной ошибкой. Более поздние измерения все снова и снова подтверждали формулу для излучения и притом тем точнее, чем к более тонким методам измерений переходили.

Однако даже если формулу для излучения предполагать справедливой с абсолютной точностью, то все же она имеет только формальный смысл удачно угаданного закона. Поэтому со дня установления этой формулы я был занят тем, что старался придать ей ее истинный физический смысл, и этот вопрос привел меня к рассмотрению связи между энтропией и вероятностью, т. е. к больцмановскому ходу мыслей. Так как энтропия S есть величина аддитивная, а вероятность W является мультипликативной величиной, то я просто положил, что $S = k \ln W$, где k — универсальная постоянная. При этом я исследовал вопрос, может ли то выражение для W , которое получится, если для энтропии S подставить значение, соответствующее найденному из закона излучения, быть истолковано как величина вероятности.

В результате этого исследования*) оказалось, что это в самом деле возможно, и что при этом k представляет собой так называемую абсолютную газовую постоянную, отнесенную не к грамм-молекуле или к молю, а к одной молекуле. Нередко она по понятной причине называется постоянной Больцмана. Необходимо, впрочем, заметить, что Больцман никогда не вводил этой постоянной и, насколько я знаю, вообще не думал о ее численном значении, так как для этого необходимо было ввести истинное число атомов. Эту последнюю задачу он целиком передал своему коллеге И. Лошмидту, а сам в своих вычислениях всегда имел в виду возможность того, что кинетическая теория газов представляет только механическую картину. Поэтому для него была достаточной постоянной, отнесенная к грамм-атому. Обозначение этой постоянной буквой k вводилось постепенно. После ее введения еще в течение многих лет вместо этой постоянной в вычислениях пользовались числом Лошмидта L , которое равно числу атомов в одном грамм-атоме.

Что касается величины W , то оказалось, что для того, чтобы можно было истолковать ее как некоторую вероятность, необходимо было ввести некоторую новую универсальную постоянную, которую я обозначил через h , и так как она имела размерность произведения (энергия \times время), то я назвал ее элементарным квантом действия. Таким образом и для излучения было установлено существование энтропии как меры вероятности в больцмановском смысле. Особенно отчетливо это проявляется в одном предложении, в справедливости которого меня убедил в многократных беседах мой ближайший ученик Макс фон Лауэ. Указанное предложение гласит, что энтропия двух когерентных пучков излучения меньше суммы энтропий отдельных пучков, в полном соответствии с предложением, утверждающим, что вероятность события, состоящего из двух зависящих друг от друга событий, отличается от произведения вероятностей отдельных событий. Теперь, когда был окончательно установлен смысл кванта действия для связи между энтропией и вероятностью, оставался еще полностью неясным вопрос о той роли, которую играет эта новая константа в закономерностях физических процессов. Поэтому я тогда же попытался как-то

*) Этот результат, содержащий введение конечного кванта энергии для осциллятора, был снова доложен Максом Планком перед Берлинским физическим обществом 14 декабря 1900 г. Это было днем рождения квантовой теории. (Прим. Лауэ.)

ввести h в рамки классической теории. Однако, вопреки всем таким попыткам, эта величина оказалась весьма строптивой. До тех пор, пока ее можно было рассматривать как бесконечно малую, т. е. при больших энергиях и при более медленных изменениях во времени, все было в полном порядке. В общем случае, однако, в том или ином месте возникала зияющая трещина, которая тем сильнее бросалась в глаза, чем более быстрыми были рассматриваемые колебания. Провал всех попыток перекинуть мост через эту пропасть вскоре не оставил более никаких сомнений в том, что квант действия играет фундаментальную роль в атомной физике, и с его появлением в физической науке наступила новая эпоха, ибо в нем заложено нечто, до того времени неслыханное, что призвано радикально преобразить наше физическое мышление, построенное на понятии непрерывности всех причинных связей с тех самых пор, как Ньютоном и Лейбнидем было создано исчисление бесконечно малых.

Мои тщетные попытки как-то ввести квант действия в классическую теорию продолжались в течение ряда лет и стоили мне немалых трудов. Некоторые из моих коллег усматривали в этом своего рода трагедию. Но я был другого мнения об этом, потому что польза, которую я извлекал из этого углубленного анализа, была весьма значительной. Ведь теперь я точно знал, что квант действия играет в физике гораздо большую роль, чем я вначале был склонен считать, и благодаря этому полностью осознал то, что при разработке атомистических проблем необходимы совершенно новые методы рассматривания. Развитию таких методов, в которых я сам уже, конечно, не мог принимать участия, послужили прежде всего работы Нильса Бора и Эрвина Шредингера. Своей моделью атома и своим принципом соответствия Бор заложил основы разумной связи квантовой и классической теорий. Шредингер же создал с помощью своего дифференциального уравнения волновую механику и этим установил дуализм волн и частиц.

Е то время как, таким образом, квантовая теория все в большей степени оказывалась в центре моих научных интересов к ней, в один прекрасный день присоединился еще один принцип, который ввел меня в новый круг идей. В 1905 г. в «*Annalen der Physik*» появилась статья А. Эйнштейна, содержащая основные идеи теории относительности, появление которой тотчас же живо меня заинтересовало. Во избежание возможного недоразумения я должен здесь сделать некоторые замечания. В самом начале этой автобиографии я подчеркнул, что самой прекрасной научной задачей мне всегда представлялись поиски абсолютного. Может показаться, что это противоречит моему интересу к теории относительности. Однако такое суждение основано на принципиальной ошибке, так как само относительное предполагает существование чего-то абсолютного, оно только тогда имеет смысл, когда ему противостоит нечто абсолютное. Часто произносимая фраза: «Все относительно» также вводит в заблуждение, потому что она бессмысленна. Таким образом в основе так называемой теории относительности заложено нечто абсолютное; таковым является определение меры пространственно-временного континуума, и как раз особенно привлекательная задача состоит в том, чтобы разыскать то абсолютное, что придает относительному его подлинный смысл.

Мы можем исходить всегда только из относительного. Все наши измерения имеют относительный характер. Материал инструмента, которым мы работаем, обусловлен месторождением, из которого он происходит, его конструкция обусловлена умением техника, который его придумал, обращение с ним обусловлено теми конкретными целями, которых хочет достигнуть экспериментатор с его помощью. Речь идет о том, чтобы во всех этих данных обнаружить то абсолютное, общезначимое, инвариантное, что в них заложено.

Такое же положение имеется и в теории относительности. Ее привлекательность для меня состоит в том, что я стремился из всех ее положений вывести то абсолютное, инвариантное, что лежит в ее основе. Это удастся сделать сравнительно простым образом. Прежде всего теория относительности придает абсолютный смысл такой величине, которая в классической теории имела лишь относительный характер, а именно скорости света. Как квант действия в квантовой теории, так и скорость света в теории относительности является абсолютным центральным пунктом. В связи с этим оказывается, что такой общий принцип классической теории, как принцип наименьшего действия, остается инвариантным и в теории относительности и соответственно этому в ней сохраняет свою значимость такая величина, как действие. Это имеет место, в частности, и для одной материальной точки, и для излучения в пустом пространстве. При этом между прочим получается, что излучение обладает инерцией и что энтропия инвариантна по отношению к скорости системы отсчета.

Но это еще не все. В самом существе законов природы абсолютное имеет более глубокие корни, чем это долгое время считали. В 1906 г. В. Нернст выдвинул свою новую тепловую теорему или, как ее часто называют, третье начало теории теплоты, содержание которого, как я вскоре установил, сводится к гипотезе о том, что энтропия, которая до того времени была определена только с точностью до адитивной постоянной, является существенно положительной величиной. Ее значение, из которого вытекают все условия равновесия, может быть непосредственно вычислено. Для химически однородных, т. е. состоящих из одинаковых молекул, твердых или жидких тел при температуре абсолютного нуля энтропия равна нулю. Уже это предложение содержит некоторый важный факт, а именно, что удельная теплоемкость твердого или жидкого тела при температуре абсолютного нуля обращается в нуль. Из третьего начала получается также ряд следствий для температуры плавления твердых тел и для температуры перехода аллотропных модификаций. Если переходить от химически однородных твердых или жидких тел к телам с молекулами различного сорта или к растворам и газам, то вычисление абсолютной энтропии производится при помощи комбинаторного рассмотрения с привлечением элементарного кванта действия. Отсюда определяются химические свойства любых тел, и решаются все вопросы о физико-химическом равновесии. Правда, что касается протекания процессов во времени, то здесь вступают в игру другие силы, о которых из значения энтропии нельзя сделать никакого заключения.

Когда с течением времени я вынужден был постепенно принимать все меньшее участие в научных исследованиях, я расширил свою научную переписку, которая меня по-настоящему увлекала и поддерживала. В этом отношении я хочу особо отметить переписку с Кл. Шефером, «Введение в теоретическую физику», которого я считаю непревзойденным в педагогическом отношении по изложению второго начала теории теплоты, а также переписку с Зоммерфельдом по проблеме квантования систем с несколькими степенями свободы. Эта переписка завершилась даже поэтической концовкой, которую я хочу здесь привести, хотя я и считаю, что в ней Зоммерфельд явно несправедлив по отношению к своим собственным заслугам в этой области. Так, имея в виду мои исследования по структуре фазового пространства, Зоммерфельд писал:

«Der sorgsam urbar macht das neue Land,
Dieweil ich hier und da ein Blumensträußchen fand»*).

*) «Ты целину усердно поднимал,
А я лишь изредка букет цветов срывал».

На это я мог лишь возразить:

«Was ich gepflückt, was Du gepflückt,
Das wollen wir verbinden,
Und da sich eins zum andern schickt,
Den schönsten Kranz draus winden*»).

Я всегда испытывал потребность по возможности полно изложить как надежно установленные результаты своей научной работы, так и выработавшиеся с течением времени взгляды по более общим вопросам: о значении точных наук, об их отношении к религии, о взаимоотношении причинности и свободы воли. В соответствии с этой потребностью я охотно принимал многочисленные и с течением лет все более частые приглашения на доклады в академиях, университетах, научных обществах и учреждениях для широкого круга лиц. Такое общение дало мне много ценных стимулов личного характера, которые я с благодарностью сохраняю до конца моих дней.

*) «Цветы, что ты и я сорвали,
Друг друга дивно дополняли,
И мы из них с тобой вдвоем
Прекраснейший венок сошьем».