

MANJIT KUMAR

QUANTUM

Einstein, Bohr and the great debate
about the nature of reality



Династия

Серия основана в 2007 г.

МАНЖИТ КУМАР

КВАНТ

Эйнштейн, Бор и великий спор
о природе реальности

Перевод с английского
канд. физ.-мат. наук Инны Кагановой



Издательство АСТ. Москва

УДК 001(091)

ББК 72.3

К 90

This edition published by arrangement with THE SCIENCE FACTORY and
THE VAN LEAR AGENCY.

Издание осуществлено при поддержке
Фонда некоммерческих программ Дмитрия Зимина “Династия”

Художественное оформление и макет серии Андрея Бондаренко

Кумар, Манжит

К 90 Квант: Эйнштейн, Бор и великий спор о природе реальности / Манжит Кумар;
пер. с. англ. И. Кагановой. — Москва : АСТ : CORPUS, 2013. — 592 с.

ISBN 978-5-17-078599-5

Однажды, когда Чарли Чаплина и Альберта Эйнштейна окружила восторженная толпа, Чаплин заметил: “Меня приветствуют потому, что меня понимают все, а вас — потому, что не понимает никто”. С тех пор наука стала еще менее доступной пониманию публики. Английский журналист рассказывает о проблемах, занимавших физиков первой половины XX века, искусно соединяя описание человеческих черт “небожителей” — авторов квантовой теории — с рассказом о трудной, но веселой науке, которую они творили. Что получилось? Биография идеи, которая читается как триллер. Путеводитель по парадоксальному миру. Научно-популярная книга, которая сбивает с толку и дает почувствовать себя почти гением.

УДК 001(091)

ББК 72.3

ISBN 978-5-17-078599-5

- © Manjit Kumar, 2009
- © Фонд Дмитрия Зимина “Династия”, 2013
- © И. Каганова, перевод на русский язык, 2013
- © А.Бондаренко, художественное оформление, макет, 2013
- © ООО “Издательство АСТ”, 2013
- Издательство CORPUS ®



Династия

Фонд некоммерческих программ

“Династия”

основан в 2002 году

Дмитрием Борисовичем Зиминым,
почетным президентом компании “Вымпелком”.
Приоритетные направления деятельности Фонда —
развитие фундаментальной науки и образования
в России, популяризация науки и просвещение.

В рамках программы по популяризации науки
Фондом запущено несколько проектов.

В их числе — сайт elementy.ru, ставший одним
из ведущих в русскоязычном Интернете
тематических ресурсов,

а также проект “Библиотека ‘Династии’” —
издание современных научно-популярных книг,
тщательно отобранных экспертами-учеными.

Книга, которую вы держите в руках,
выпущена в рамках этого проекта.

Более подробную информацию о Фонде “Династия”
вы найдете по адресу

www.dynastyfdn.ru

*Посвящается Ламберу Раму и Гурмиту Кауру,
Пандоре, Равиндеру и Ясвиндеру*

Оглавление

Пролог. Встреча великих 9

Часть I. Квант

Глава 1. Революционер поневоле 21

Глава 2. “Батрак патентного бюро” 55

Глава 3. “Золотой” датчанин 99

Глава 4. Квантовый атом 131

Глава 5. Эйнштейн встречается Бора 160

Глава 6. Дуальный герцог 193

Часть II. “Физика мальчишек”

Глава 7. Спиновые доктора 211

Глава 8. Квантовый кудесник 237

Глава 9. “Позднее извержение эротического вулкана” 265

Глава 10. Неопределенность в Копенгагене 295

Часть III. Битва за реальность

Глава 11. Сольвеевский конгресс 1927 года 331
Глава 12. Эйнштейн забывает теорию относительности 365
Глава 13. Квантовая реальность 388

Часть IV. Играет ли Бог в кости?

Глава 14. По ком звонит теорема Белла 425
Глава 15. Квантовый демон 451

Краткая история квантовой физики 463

Глоссарий 477

Примечания 494

Библиография 545

Благодарности 567

Предметно-именной указатель 569

Пролог

Встреча великих

Пауль Эренфест чуть не плакал. Он решился. Скоро начнется конгресс, который продлится неделю. Там будут многие участники квантовой революции, и они попытаются осмыслить значение сделанного ими. И именно там ему придется сказать старому другу Альберту Эйнштейну, что он, Эренфест, принял сторону Нильса Бора. Эренфест, тридцатичетырехлетний австриец, профессор теоретической физики из Лейденского университета (Голландия), был убежден: мир атомов на самом деле так странен и неосвязаем, как об этом говорит Бор¹.

В записке, переданной Эйнштейну во время заседания, Эренфест неразборчиво написал: “Не смейся! Для профессоров, преподающих квантовую теорию, в чистилище есть специальный семинар, где они вынуждены слушать лекции по классической физике десять часов каждый день”². “Меня умиляет их наивность, — ответил Эйнштейн. — Кто знает, кто посмеется последним?”³ На самом деле Эйнштейну было совсем не до смеха: на кону стояли сама природа реальности и основы физики.

Фотография участников V Сольвеевского конгресса “Электроны и фотоны”, прошедшего в Брюсселе 24–29 октября 1927 года, отражает финал самого драматического периода в истории физики. Семнадцать из двадцати девяти участников конгресса получили Нобелевскую премию, так что его можно назвать одной из самых впечатляющих “встреч великих”⁴. Она ознаменовала собой конец “золотого века” физики, конец невероятной эры научного творчества. Последний раз события подобного масштаба происходили во времена научной революции XVII века, во главе которой шли Галилей и Ньютон.

Пауль Эренфест — третий слева в последнем ряду. В первом сидят восемь мужчин и одна женщина. Шестеро из мужчин — лауреаты Нобелевской премии по физике или химии. У женщины сразу две премии: по физике (1903) и химии (1911). Это Мария Кюри. В центре, на почетном месте, восседает еще один нобелевский лауреат. Это Альберт Эйнштейн — самый знаменитый ученый со времен Ньютона. Он смотрит прямо в объектив, и, кажется, ему немного не по себе. Непонятно, что именно является причиной дискомфорта: жесткий воротничок и галстук — или же услышанное на конгрессе в течение прошедшей недели. Справа в конце второго ряда — Нильс Бор. Он выглядит расслабленным и хитрово улыбается. Конгресс для него прошел удачно. Тем не менее в Данию Бор вернулся разочарованным: ему так и не удалось убедить Эйнштейна в правильности “копенгагенской интерпретации”, договориться о природе реальности, открываемой нам квантовой механикой.

Не собиравшийся сдаваться Эйнштейн потратил неделю на то, чтобы показать: квантовая механика не самосогласованна, а “копенгагенская интерпретация” Бора — некорректна. Гораздо позднее Эйнштейн скажет: “Эта теория напоминает мне состряпанный из бессвязных обрывков мыслей набор бредовых идей исключительно умного параноика”⁵.

Справа от Марии Кюри, с сигарой и шляпой в руке, Макс Планк — человек, открывший кванты. В 1900 году он вынужден был выдвинуть гипотезу о том, что энергия световой волны или любого другого электромагнитного излучения, испускаемого или поглощаемого телом, может складываться только из разного числа небольших порций. Отдельную порцию энергии Планк назвал квантом. Введение кванта энергии означало принципиальный разрыв с давно устоявшимся представлением о том, что энергия излучается или поглощается непрерывно, как текущая из крана вода. В окружающем мире, где безраздельно царит физика Ньютона, вода может капать из крана, но обмен энергией не может происходить отдельными капельками разных размеров. Однако на атомном и субатомном уровнях хозяйничают кванты.

Позднее ученые открыли, что энергия электрона в атоме “квантована”: она может принимать только строго определенные значения. Когда стало понятно, что микромир неспокоен и лишен непрерывности, что он не является съезжившейся копией большого мира людей, в котором физические свойства меняются плавно и непрерывно, а при движении из пункта *A* в пункт *C* не миновать пункта *B*, выяснилось, что и другие физические величины квантованы. А квантовая физика утверждает, что электрон в атоме, находившийся в некотором определенном месте, испустив или поглотив квант энергии, может, как по волшебству, оказаться на новом месте, не появляясь в каком-либо промежуточном пункте. Такое поведение частицы находится за пределами понимания классической физики. Это казалось невероятным, равнозначным тому, что тело, вдруг исчезнувшее в Лондоне, в то же мгновение не менее неожиданно появилось бы в Париже, Нью-Йорке или Москве.

Уже к началу 20-х годов стало окончательно ясно, что достижения квантовой физики построены на зыбком фундаменте и не структурированы логически. Из этого состояния замеша-

тельства возникла дерзкая новая наука — квантовая механика. В школе до сих пор рассказывают, что атом похож на миниатюрную Солнечную систему, в которой электрон вращается по орбите вокруг ядра. Эта модель атома была забыта. Согласно новой теории, зримого образа атома просто не существует. В 1927 году Вернер Гейзенберг сделал открытие, настолько противоречившее здравому смыслу, что даже ему, вундеркинду квантовой механики, вначале трудно было понять его значение. Он сформулировал так называемый принцип неопределенности, который гласит: если вы хотите узнать точную скорость частицы, то определить точно, где она находится, невозможно (и наоборот).

Никто не понимал, как интерпретировать уравнения квантовой механики и что именно может сказать эта теория о природе реальности на квантовом уровне. Вопросы о причинах и следствиях, а также, например, о том, существует ли Луна, когда никто на нее не смотрит, уже во времена Платона и Аристотеля перешли в ведение философии, но после появления квантовой механики они сделали предметом дискуссии самых выдающихся физиков XX столетия.

Хотя все основные понятия квантовой физики были уже введены, V Сольвеевский конгресс открыл новую главу в истории кванта. Дело в том, что разгоревшийся на этой конференции спор между Эйнштейном и Бором продолжается до сих пор. Многие выдающиеся ученые и философы все еще пытаются выяснить, какова природа реальности и какое описание реальности должно считаться осмысленным. “Никогда еще не велись столь глубокие интеллектуальные споры, — утверждал писатель и ученый Ч. П. Сноу. — Жаль, что их сущность не может стать общим достоянием”⁶.

Эйнштейн, один из двух главных участников этих дебатов, — легенда XX века. Однажды ему предложили выступить в лондонском театре “Палладиум”. Дамы в его присутствии падали в обморок. В Женеве девушки осаждали его. Сегодня так по-

клоняются только поп-певцам и кинозвездам. В 1919 году, когда стало известно об изгибании светового луча, наблюдавшемся в момент полного солнечного затмения и предсказанном на основании общей теории относительности, Эйнштейн превратился в научную звезду первой величины. В этом качестве он ездил с лекциями по Америке и в январе 1931 года в Лос-Анджелесе пришел на премьеру фильма Чарли Чаплина “Огни большого города”. Увидев Чаплина и Эйнштейна вместе, толпа начала бурно аплодировать. “Меня приветствуют потому, что все меня понимают, — сказал Чаплин Эйнштейну. — А вас — потому, что не понимает никто”⁷.

Нильса Бора и тогда, и сейчас знают гораздо меньше. Правда, в 1923 году Макс Борн, сыгравший центральную роль в развитии квантовой механики, писал, что “влияние Бора на теоретические и экспериментальные исследования нашего времени гораздо существеннее, чем какого-либо другого физика”⁸. В 1963 году, спустя сорок лет, Вернер Гейзенберг заявил, что “в нашем столетии влияние Бора на физику и физиков было самым сильным, сильнее даже влияния Альберта Эйнштейна”⁹.

В 1920 году, когда Эйнштейн и Бор впервые встретились в Берлине, каждый из них сразу понял, что нашел “спарринг-партнера” и что еще долго без ожесточения и затаенной вражды они будут обмениваться ударами, пытаясь точнее и полнее понять, что такое квант. Это им (и еще некоторым участникам Сольвеевского конгресса 1927 года) обязана своим рождением квантовая физика. “То было героическое время, — вспоминал американский физик Роберт Оппенгеймер, который в 20-е годы был еще студентом. — Период упорной работы в лабораториях, постановки критически важных экспериментов, отчаянных поступков, множества фальстартов и невероятных гипотез. Это было время открытой переписки, наспех созванных конференций, дебатов, критики и блестящих математических импровизаций. Для тех, кто принимал в этом участие, это

было время созидания”¹⁰. Согласно Оппенгеймеру, отцу атомной бомбы, “они испытывали одновременно и ужас, и экзальтацию, глядя на то новое, что им открылось”.

Без кванта мир, в котором мы живем, был бы совсем другим. Однако почти все XX столетие физики мирились с тем, что квантовая механика отрицает существование реальности за пределами той, которую можно измерить в эксперименте. Именно это заставило американского физика Мюррея Гелл-Манна, лауреата Нобелевской премии, сказать, что квантовая механика — это “мистическая, сбивающая с толку дисциплина, которую никто из нас по-настоящему не понимает, но все знают, как ею пользоваться”¹¹. И ею действительно пользуются. Квантовая механика определяет направление развития и формирует современный мир. Она делает возможным все: от компьютеров до стиральных машин, от мобильных телефонов до атомного оружия.

История кванта начинается в конце XIX века, когда, несмотря на недавнее открытие электрона, рентгеновских лучей, радиоактивности и продолжающейся дискуссии о том, существуют атомы или нет, многие физики были уверены, что ничего значительного уже открыть нельзя. “Наиболее важные фундаментальные законы и явления физической науки уже известны. Эти законы установлены настолько достоверно, что возможность их изменения в связи с новыми открытиями представляется почти невероятной”, — заявил американский физик Альберт Майкельсон в 1899 году. “Будущим исследователям, — утверждал он, — остается уточнять полученные результаты в шестом знаке после запятой”¹². Взгляд Майкельсона на физику как на науку “знаков после запятой” разделялся тогда многими. Считалось, что любая нерешенная задача не представляет угрозы для сложившихся физических представлений и что она рано или поздно будет решена с помощью освященных веками теорий и принципов.

Джеймс Клерк Максвелл, величайший физик-теоретик XIX века, еще в 1871 году выступал против такой самоуспокоенности: “Представление о современных экспериментах, сводящихся якобы только к измерениям, распространено так широко, что кажется, будто в скором будущем все основные физические постоянные будут приблизительно оценены, а единственное, что останется ученым — повторять эти измерения с точностью до следующего знака после запятой”¹³. Но сам Максвелл считал, что настоящей наградой за “тщательно проведенные измерения” является не увеличение точности, а “открытие новых областей исследований” и “формулировка новых научных идей”¹⁴. Открытие кванта было результатом именно таких “тщательно проведенных измерений”.

В 90-х годах XIX века многие ведущие немецкие физики были поглощены поиском ответа на давно мучивший их вопрос: какова связь между температурой, цветовой гаммой и интенсивностью света, излучаемого горячим железным прутом? Эта задача казалась тривиальной по сравнению с раскрытием тайны рентгеновских лучей и радиоактивности, заставлявшей физиков стремиться в лаборатории, ставить эксперименты и засиживаться над расчетами. Но для страны, образовавшейся только в 1871 году, поиск решения задачи о горячем железном пруте (позднее она стала называться задачей об абсолютно черном теле) был тесно связан с необходимостью сделать немецкую промышленность способной выдержать конкуренцию с английской и американской. Однако при всех затраченных усилиях лучшие немецкие ученые задачу о горячем пруте решить не могли. В 1896 году им показалось, будто решение найдено, но скоро новые эксперименты показали, что это не так. Эту задачу решил Макс Планк.

ЧАСТЬ I

КВАНТ

Коротко говоря, то, что я сделал, можно описать только как акт отчаяния.

МАКС ПЛАНК

Было ощущение, что земля уходит из-под ног, нигде не было видно того, на что можно опереться, на чем можно что-то построить.

АЛЬБЕРТ ЭЙНШТЕЙН

Тот, кто не испытал потрясения, столкнувшись впервые с квантовой механикой, не смог, вероятно, ее понять.

НИЛЬС БОР

ГЛАВА 1

Революционер поневоле

“Н овая научная истина торжествует не потому, что убедила оппонентов и обратила их в свою веру, а скорее из-за того, что со временем они умирают и вырастет новое поколение, для которого эта истина уже привычна”, — писал Макс Планк ближе к концу своей долгой жизни¹. Эта граничащая с трюизмом фраза вполне могла бы стать его научным некрологом, если бы он сам не отказался от идей, которые так долго считал истинными. Это был “акт отчаяния”². Планка — в его темном костюме, накрахмаленной сорочке и черном галстуке-бабочке — можно было бы принять за типичного прусского чиновника конца XIX века, если бы не “проницательные глаза под массивным сводом лысой головы”³. Принимаясь за какую-либо научную задачу, вообще собираясь что-либо предпринять, он был предельно, совсем по-чиновничьи, осторожен. “Мой принцип всегда был таков, — сказал он однажды студентам. — Сначала тщательно выверь каждый шаг, а потом, если уверен, что справишься, не останавливайся ни перед чем”⁴. Планк был не из тех, кто легко меняет свои решения.

Его манеры и внешний вид едва ли изменились к 20-м годам XX века. Один из его учеников вспоминал: “Невозможно было представить, что это тот самый человек, который возвестил о начале революции”⁵. Революционер поневоле, Планк и сам с трудом в это верил. По собственному признанию, он был “настроен миролюбиво”, избегал “сомнительных приключений”⁶ и был лишен “способности быстро реагировать на интеллектуальное воздействие”⁷. Чтобы примирить новые идеи со своим глубоким консерватизмом, ему требовались годы. Несмотря на это, в декабре 1900 года именно сорокадвухлетний Планк невольно начал квантовую революцию: он вывел уравнение, описывающее излучение абсолютно черного тела.



Все тела, если они достаточно горячи, излучают одновременно тепло и свет, причем интенсивность излучения и цвет меняются с температурой. Кончик железного прута, оставленного в огне, постепенно краснеет. Если его температура повышается, он становится вишнево-красным, затем желто-оранжевым и, наконец, голубым. Если прут вынуть из огня, он остывает, а его конец окрашивается в обратном порядке в указанные цвета, пока не остывает настолько, что перестает излучать видимый свет. Однако от него еще исходит невидимый поток тепла. Через некоторое время, когда прут остынет настолько, что к нему можно будет прикоснуться, излучение тепла тоже прекращается.

В 1666 году двадцатитрехлетний Исаак Ньютон показал, что луч белого света состоит из набора лучей различных цветов. При прохождении через призму он легко разлагается на семь разноцветных полос: красную, оранжевую, желтую, зеленую, голубую, синюю и фиолетовую⁸. Ответ на вопрос, определяют ли красный и фиолетовый цвета границы оптического спектра или только той его части, которую может видеть человеческий глаз, был получен

в 1800 году. Тогда появились достаточно чувствительные и точные ртутные термометры, и астроном Уильям Гершель поместил один из них перед разноцветными полосами видимого спектра. Он обнаружил, что при перемещении термометра вдоль полосок разных цветов температура повышается, если двигаться от фиолетовой полосы к красной. К его удивлению, температура увеличилась еще немного, когда он случайно оставил термометр чуть дальше конца красной полосы. Гершель обнаружил излучение, которое позднее назвали инфракрасным: невидимый глазу свет, исходящий от нагретого тела⁹. В 1801 году Иоганн Риттер, изучавший почернение хлорида серебра под действием света, показал, что невидимый свет есть и на другом конце спектра, за фиолетовой полосой. Это ультрафиолетовое излучение.

Тот факт, что при одинаковой температуре все нагретые тела окрашиваются в один и тот же цвет, был известен гончарам задолго до 1859 года, когда Густав Кирхгоф, тридцатичетырехлетний немецкий физик из университета в Гейдельберге, начал теоретическое исследование природы этой корреляции. Чтобы упростить задачу, Кирхгоф ввел понятие “абсолютно черное тело”. Это такое тело, которое является идеальным поглотителем и генератором излучения. Выбор названия оказался вполне удачным. Идеально поглощающее тело не излучает и поэтому кажется черным. Однако если температура идеального генератора излучения настолько велика, что длина волны испускаемого света оказывается в пределах видимой части спектра, оно визуально имеет цвет.

Кирхгоф представлял себе абсолютно черное тело как полый ящик с небольшим отверстием в одной из стенок. Поскольку любое излучение, видимый или невидимый свет, попадает в ящик через отверстие, оно моделирует идеальный поглотитель и ведет себя как абсолютно черное тело. Попав внутрь, излучение поочередно отражается то от одной стенки, то от другой, пока не будет поглощено полностью. Кирхгоф предположил, что абсолютно черное тело окружено изолятором. Поэтому он мог быть уверен,

что при нагревании только внутренние поверхности стенок будут генерировать излучение, заполняющее полость.

Сначала стенки (совсем как нагретый железный прут) становятся вишнево-красными, хотя они еще излучают главным образом в инфракрасном диапазоне. Затем, когда температура повышается, стенки становятся бледно-голубыми, поскольку излучаются длины волн из всего спектра: от далекой инфракрасной области до ультрафиолета. Отверстие играет роль идеального излучателя, так как любое проходящее через него излучение представляет собой набор *всех* длин волн, имеющихся внутри полости при данной температуре.

Кирхгоф доказал математически то, что уже давно знали ремесленники, обжигавшие горшки. Согласно закону Кирхгофа, внутри полости спектр излучения и его интенсивность зависят только от температуры абсолютно черного тела, но не от размера, не от формы и не от материала, из которого оно сделано. Кирхгофу удалось удачно переформулировать задачу о нагретом железном пруте. В его редакции она звучала так: каково для абсолютно черного тела точное соотношение между цветовой гаммой и интенсивностью излучения и величиной излученной энергии при данной температуре? Задача, поставленная Кирхгофом, известна как проблема абсолютно черного тела: требуется измерить спектральное распределение энергии излучения абсолютно черного тела, то есть количество излученной энергии для каждой длины волны, начиная от инфракрасной области спектра и кончая ультрафиолетовой, и вывести формулу для этого распределения при произвольной температуре.

Кирхгоф не имел возможности экспериментировать с реальным абсолютно черным телом, поэтому не смог и продвинуться в построении теории, но направление исследований он указал правильно. Кирхгоф утверждал, что поскольку искомое распределение не зависит от материала, из которого изготовлено абсолютно черное тело, формула, которую надо вывести, должна со-

держат только две переменные — температуру абсолютно черного тела и длину волны испускаемого излучения. Так как свет является волной, основная характеристика, по которой различаются между собой цвета и оттенки, это длина волны — расстояние между двумя последовательными пиками или впадинами. Величина, обратно пропорциональная длине волны, называется ее частотой. Она равна числу пиков или впадин, через которое проходит некоторая выбранная точка за секунду. Чем больше длина волны, тем меньше ее частота, и наоборот. Есть и другое, эквивалентное определение частоты волны: она равна числу изгибов вверх и вниз, то есть “волнений”, за секунду¹⁰.



Рис. 1. Характеристики волны

Из-за технических трудностей при создании реального абсолютно черного тела и отсутствия достаточно точных измерительных приборов для обнаружения излучения и измерения его интенсивности продвижения в решении этой проблемы не было целых сорок лет. Лишь в начале 80-х годов XIX века немецкие компании поставили перед собой задачу сделать такие лампы накаливания, которые могли бы конкурировать с английскими и американскими. Измерение спектра излучения абсолютно черного тела и вывод уравнения, о котором мечтал Кирхгоф, стало приоритетной задачей.

В то время лампы накаливания были последней новинкой в ряду таких новшеств, как дуговая лампа, динамо-машина, электрический мотор и телеграф. Именно они обеспечивали бурное развитие электротехнической промышленности.

С каждым новым изобретением все острее чувствовалась нужда в общепризнанной системе единиц и стандартах, которые можно использовать при электрических измерениях.

В 1881 году на парижском Международном конгрессе электриков собрались двести пятьдесят делегатов из двадцати двух стран. Хотя вольт, ампер и некоторые другие единицы уже были определены и поименованы, согласия в вопросе о том, какой стандарт надо использовать при определении светимости, не было, и это мешало разработке наиболее энергосберегающего способа создания искусственного света. Поскольку абсолютно черное тело — идеальный излучатель, оно испускает максимальное количество тепла, то есть инфракрасного излучения. Спектр абсолютно черного тела мог служить эталоном при калибровке и производстве лампочек, которые должны были излучать максимально возможное количество света и при этом как можно меньше нагреваться.

“В условиях конкуренции государств, столь интенсивно продвигающих свои интересы, страна, первой вступившая на новую тропу и начавшая первой развивать новую индустрию, имеет решающий голос”, — писал промышленник и изобретатель динамо-машины Вернер фон Сименс¹¹. Чтобы стать первым, немецкое правительство в 1887 году основало Имперский физико-технический институт (*Physikalisch-Technische Reichsanstalt*). Расположенный на окраине Берлина, в Шарлоттенбурге, на земле, подаренной Сименсом, PTR был задуман как институт, способный обеспечить победу Германской империи в соревновании с Британией и Америкой. Строительство комплекса продолжалось более десяти лет. В конце концов PTR стал самым оснащенным и самым дорогим исследовательским институтом в мире. Он был создан для того, чтобы, устанавливая стандарты и испытывая новую продукцию, обеспечить полное превосходство Германии в использовании научных достижений. Разработка международно признанного стандарта для измерения яркости свечения была одним из приори-

тетов института. В *PTR* необходимость улучшить качество электрических лампочек стала в 90-х годах XIX века движущей силой программы по изучению свойств абсолютно черного тела. Планк оказался нужным человеком в нужном месте в нужное время: кроме улучшения качества лампочек, был открыт квант.



Макс Карл Эрнст Людвиг Планк родился 23 апреля 1858 года в Киле, городе, входившем тогда в состав датской Голштинии. Члены семьи Планков всегда служили церкви и государству. Блестящее положение в гуманитарных науках было обеспечено Максиму по праву рождения. Его дед и прадед по мужской линии — выдающиеся теологи, а отец — профессор конституционного права в Мюнхенском университете. Эти люди, чтившие законы божеские и человеческие, были искренними и горячими патриотами. Макс не стал исключением.

Планк учился в одной из самых известных школ Мюнхена — в гимназии им. Максимилиана. Всегда один из лучших в классе, но никогда не первый ученик, он отличался трудолюбием и самодисциплиной. Именно эти качества и требовались: школьная система зиждилась на механическом запоминании множества фактов. Учителя отмечали, что, “несмотря на ребячество”, десятилетний Планк умеет “ясно и логически мыслить” и подает “блестящие надежды”¹². В шестнадцатилетнем возрасте Макса привлекали не знаменитые мюнхенские пивные, а опера и концертные залы. Талантливый пианист, он подумывал выбрать карьеру профессионального музыканта. Сомневаясь в правильности такого выбора, он спросил совета. И услышал: “Если вы *спрашиваете*, то лучше займитесь чем-нибудь другим”¹³.

В октябре 1874 года, в возрасте шестнадцати лет, Планк стал студентом Мюнхенского университета. Он выбрал физику. Ему все сильнее хотелось узнать, как устроен мир. В отличие от гимназий

с их почти военными порядками, немецкие университеты фактически предоставляли студентам полную свободу. Контроля над успеваемостью почти не было. Не было и установленных требований. Такая система позволяла студентам переходить из одного университета в другой, выбирая те курсы, которые им нравились. Рано или поздно желающие сделать научную карьеру становились слушателями самых известных профессоров в самых престижных университетах. После трех лет учебы в Мюнхене, услышав, что “вряд ли еще стоит заниматься физикой”, поскольку в ней ничего стоящего сделать больше нельзя, Планк перешел в ведущий университет немецкоязычного мира — в Берлинский¹⁴.

После объединения Германии под эгидой Пруссии и победы над Францией в войне 1870–1871 годов Берлин стал столицей молодого могучего европейского государства. Город, расположенный в месте слияния рек Хафель и Шпрее, благодаря французским контрибуциям быстро менял облик, пытаясь сравняться с Лондоном или Парижем. В 1871 году население Берлина составляло всего 865 тысяч человек, но к 1900 году оно возросло до двух миллионов, и город стал вторым по величине в Европе¹⁵. Среди новых горожан были евреи, бежавшие от преследований в Восточной Европе, в частности — от жестоких погромов в царской России. Неизбежно взлетели и цена на жилье, и стоимость жизни. Увеличилось число нищих и бездомных. Когда в разных частях города как грибы после дождя начали появляться лачуги, фабриканты, изготавливавшие картонные коробки, стали предлагать “хорошие дешевые ящики для проживания”¹⁶.

И все же, хотя Берлин и демонстрировал приезжим неприглядные стороны жизни, Германия вступала в период беспрецедентного индустриального роста, технологического прогресса и экономического процветания. Страна быстро развивалась главным образом за счет контрибуций и отмены внутренних таможенных тарифов после объединения германских государств. К началу Первой мировой войны Германия вышла на второе

место в мире по валовому продукту и экономической мощи, уступая только Соединенным Штатам. В то время она выплавляла две трети европейской стали, добывала половину угля и производила больше электроэнергии, чем Британия, Франция и Италия вместе взятые. Даже рецессия и спад, потрясшие Европу после краха фондовой биржи в 1873 году, лишь замедлили на несколько лет поступательное движение Германии.

После объединения было решено организовать в Берлине — новом государстве в миниатюре — лучший в мире университет. Из Гейдельберга переманили самого известного немецкого физика и выдающегося физиолога Германа фон Гельмгольца. Опытный хирург, изобретатель офтальмоскопа, он внес фундаментальный вклад в понимание работы человеческого глаза. Пятидесятилетний эрудит знал себе цену. Кроме жалования, в несколько раз превышавшего обыкновенное, Гельмголец потребовал создать физический институт. Он еще строился, когда в 1877 году Планк появился в Берлине и начал посещать лекции в главном здании университета, бывшем дворце на Унтер-ден-Линден, напротив Оперы.

Гельмголец как преподаватель его жестоко разочаровал. “Было заметно, — вспоминал Планк, — что Гельмголец никогда тщательно не готовился к лекциям”¹⁷. А Густав Кирхгоф, перешедший из Гейдельберга на должность профессора теоретической физики, напротив, готовился к лекциям настолько хорошо, что читал их “как заученный текст, сухо и монотонно”¹⁸. Планк, который столь много ждал от учебы в Берлине, признавался, что “лекции этих людей затягивали в болото”¹⁹. Пытаясь утолить жажду научного знания, он много читал и однажды наткнулся на работу Рудольфа Клаузиуса, пятидесятишестилетнего физика из Боннского университета²⁰.

По контрасту с бесцветным преподаванием двух почтенных профессоров “прозрачность стиля и ясность аргументации” Клаузиуса покорили Планка²¹. После чтения статей Клаузиуса

по термодинамике к Планку вернулось страстное желание заниматься физикой. Основы термодинамики — науки, изучающей соотношение между теплотой и различными формами энергии, — в то время сводились к двум законам²². Первый гласит: энергия, в какой бы форме она ни существовала, сохраняется. Ее нельзя ни создать, ни уничтожить. Энергия только может менять форму. Яблоко, висящее на дереве, обладает потенциальной энергией в силу того, что находится в поле тяжести Земли, на некотором расстоянии от ее поверхности. Когда яблоко падает, его потенциальная энергия преобразуется в кинетическую — энергию движения.

Планк услышал о законе сохранения энергии еще в школе. Позднее он скажет, что этот закон был для него “откровением, поскольку имел абсолютную, универсальную, не зависящую от человека ценность”²³. В тот момент ему удалось соприкоснуться с вечностью, и с тех пор он считал открытие абсолютных или фундаментальных законов природы “высшей научной целью”²⁴. Теперь зачарованный Планк читал данную Клаузиусом формулировку второго закона термодинамики: “Невозможен процесс, единственным результатом которого является самопроизвольная передача тепла от более холодного тела к более горячему”²⁵. (Что означает слово “самопроизвольная”, можно понять на примере холодильника. Этот прибор должен быть подсоединен к внешнему источнику энергии, в данном случае электрической, и именно это приводит к тому, что тепло переходит от более холодного тела к более горячему.)

Планк понял, что Клаузиус не просто утверждает очевидное: за его словами скрывается нечто гораздо более важное. Тепловой поток, перенос энергии от тела *A* к телу *B*, происходящий из-за разности температур, объясняет такие повседневные события, как остывание чашки с кофе или таяние кубиков льда в стакане. Но если систему оставить в покое, обратный процесс никогда не произойдет. А почему бы нет? Закон

сохранения не запрещает чашке с кофе нагреваться при одновременном остывании окружающего ее воздуха, стакану воды становиться теплее, а льду — холоднее. Этот закон не запрещает образование потока тепла от холодного тела к горячему. Однако существует нечто, что этому препятствует. Клаузиус назвал это нечто энтропией. Это понятие — центральное для понимания того, почему в природе одни процессы идут, а другие — нет.

Когда чашка с кофе остывает, окружающий воздух становится теплее, поскольку энергия рассеивается и необратимо теряется, что и обеспечивает невозможность обратного процесса. Закон сохранения энергии является тем способом, с помощью которого природа подводит баланс при проведении *любой возможной* физической “сделки”, однако она требует платить лишь за те сделки, которые *действительно* имели место. Согласно Клаузиусу, энтропия — это цена, которая определяет, произойдет сделка или не произойдет. В любой изолированной системе оказываются возможными только те процессы, при которых энтропия возрастает либо остается постоянной. Все процессы, при которых энтропия уменьшается, строго запрещены.

Клаузиус определил энтропию как количество тепла, получаемого или отдаваемого телом или системой, деленное на температуру, при которой происходит процесс. Если горячее тело при температуре 500°C передает 1000 единиц энергии более холодному телу, находящемуся при температуре 250°C , его энтропия уменьшается: $-1000 \div 500 = -2$. Если более холодное тело, находящееся при температуре 250°C , приобретает 1000 единиц энергии, то: $1000 \div 250 = 4$, и энтропия этого тела возрастает на 4. Суммарная энтропия системы, объединяющей горячее и холодное тело, возросла на 2 единицы энергии на градус. Все действительно имеющие место процессы необратимы, поскольку должны приводить к возрастанию энтропии. Это тот закон природы, который препятствует самопроизвольной передаче тепла от холодного к горячему. Только идеальные процессы, в которых

энтропия остается постоянной, могут быть обратимы. Они, однако, никогда не реализуются и происходят только в головах физиков. Энтропия Вселенной стремится к максимуму.

Планк считал, что энтропия является, наряду с энергией, “самым важным из свойств физических систем”²⁶. Вернувшись в Мюнхенский университет после годовичного пребывания в Берлине, он посвятил диссертацию концепции необратимости. Эта работа должна была стать его визитной карточкой. Однако, к ужасу Планка, “даже те физики, которым эта проблема была близка, не только не одобрили, но даже не проявили интерес” к его исследованию²⁷. Гельмгольц даже не прочитал диссертацию; Кирхгоф прочитал, но не согласился с выводами, а Клаузиус, оказавший такое сильное влияние на Планка, так и не ответил на его письмо. “Воздействие моей диссертации на физиков тех дней было нулевым”, — с горечью вспоминал Планк даже семьдесят лет спустя. Но, повинаясь “некоему внутреннему импульсу”, он не отступил²⁸. Термодинамика, в частности второй ее закон, — вот чем занимался Планк в начале своей научной карьеры²⁹.

Немецкие университеты были государственными учреждениями. Экстраординарные и ординарные профессора (и те, и другие занимали кафедру, при этом оклад экстраординарного профессора был меньше) становились государственными служащими. Их утверждением в должности занималось Министерство образования. В 1880 году Планк стал приват-доцентом Мюнхенского университета. Он не был ни государственным служащим, ни сотрудником университета, а просто приобрел право преподавать за вознаграждение, которое платили студенты, посещавшие лекции. Пять лет спустя он все еще ждал должности экстраординарного профессора. Шансов было мало. Планк был теоретиком. Постановка экспериментов его не интересовала, а теоретическая физика еще не оформилась как самостоятельная дисциплина. Даже в 1900 году в Германии было всего шестнадцать профессоров теоретической физики.

Планк знал: продвижение по карьерной лестнице будет означать, что ему “удалось добиться научного признания”³⁰. Его час пробил, когда было объявлено, что работа, которую следовало представить для получения престижной премии Геттингенского университета, должна называться “Природа энергии”. Когда он работал над ней, в мае 1885 года пришло “спасительное письмо”³¹: двадцатисемилетнему Планку предложили место экстраординарного профессора в Киле. Макс заподозрил, что этим он обязан дружбе своего отца с главой факультета физики в Киле. Он знал, что перед ним в очереди было много известных людей, ждущих места. Тем не менее он принял предложение, а работу для участия в конкурсе закончил сразу после прибытия в родной город.

Хотя на соискание премии было представлено всего три работы, прошло два года, прежде чем объявили, что победителей не будет. Планку присудили второе место, но жюри отказалось вручить ему премию из-за того, что он поддержал Гельмгольца во время научного диспута с представителем Геттингенского университета. Поведение судей заставило Гельмгольца обратить внимание на Планка и его работу. Планк провел в Киле немногим более трех лет, когда в ноябре 1888 года его удостоили неожиданной чести. В списке возможных кандидатов Планк не был ни первым, ни вторым, но когда те, кто был впереди него, отказались, при поддержке Гельмгольца именно его пригласили занять вместо Густава Кирхгофа пост профессора теоретической физики в Берлинском университете.

Весной 1889 года столица была уже не той, какой Планк покинул ее одиннадцать лет назад. Зловоние, шокировавшее приезжих, исчезло после того, как современная канализационная система заменила открытые стоки. Главные улицы теперь освещались электрическими фонарями. Гельмголец уже не был главой университетского института физики. Он возглавлял Имперский физико-технический институт — удивительное исследова-

тельское учреждение, расположенное в трех милях от университета. Август Кундт, его преемник, к назначению Планка отношения не имел, но приветствовал “чудесное приобретение” и считал нового профессора “прекрасным человеком”³².

В 1884 году семидесятирехлетний Гельмгольц и Кундт, которому было всего пятьдесят пять, умерли один за другим в течение месяца. Тридцатишестилетний Планк, который лишь двумя годами ранее получил наконец должность ординарного профессора, остался во главе физического отделения самого известного немецкого университета. Ему пришлось взвалить на себя весь груз ответственности. В обязанности Планка входило также рецензирование статей для “*Annalen der Physik*”. Теперь он обладал огромным влиянием, поскольку имел право наложить вето на публикацию любой работы по теоретической физике, представленной в главный немецкий физический журнал. Ощущая гнет нового высокого положения и глубоко скорбя о потере коллег, Планк искал утешения в работе.

Как глава группы берлинских физиков он был хорошо осведомлен о связанных с интересами промышленников исследованиях по проблеме абсолютно черного тела, идущих в *PTR*. Хотя термодинамика была основой теоретического анализа излучения абсолютно черного тела, Планка останавливало отсутствие надежных экспериментальных данных. Он и не пытался вывести уравнение, которое не сумел получить Кирхгоф. Однако вскоре открытие, сделанное одним из его старых друзей из *PTR*, не позволило Планку больше уклоняться от решения задачи об абсолютно черном теле.



В феврале 1893 года двадцатидевятилетний Вильгельм Вин получил простую математическую формулу, описывающую, как изменение температуры влияет на распределение излу-

чения абсолютно черного тела³³. Вина обнаружил, что при возрастании температуры абсолютно черного тела длина волны, при которой излучение достигает своего максимального значения, всегда уменьшается³⁴. Уже было известно, что увеличение температуры приводит к увеличению полной излученной энергии, но, согласно закону смещения Вина, тут имеет место точное соотношение: произведение длины волны, на которую приходится максимум излучения, и температуры абсолютно черного тела остается постоянным. Если температура увеличивается вдвое, пиковая длина вдвое уменьшается.

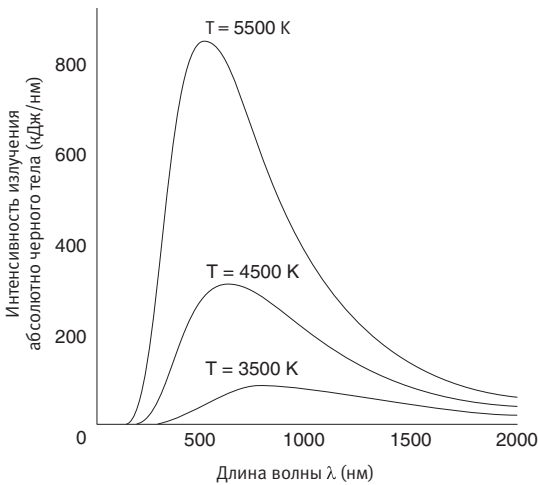


Рис. 2. Распределение интенсивности излучения абсолютно черного тела, иллюстрирующее закон смещения Вина

Открытие Вина означало, что достаточно вычислить значение этого остающегося постоянным числа, измеряя при данной температуре “пиковую” длину волны (длину волны, соответствующей максимальной интенсивности излучения), и тогда пиковую длину волны можно будет найти при любой другой температуре³⁵. Этот закон объяснял и изменение цвета нагретого желез-

ного прута. Если нагревать прут, то при низкой температуре излучаются главным образом длинные волны из инфракрасной области спектра. При повышении температуры интенсивность излучения при всех длинах волн становится больше, а длина волны, на которую приходится пик излучения, уменьшается. Соответственно и цвет излученного света меняется от красного к оранжевому, затем прут становится желтым и, наконец, светло-голубым, по мере того, как увеличивается излучение из ультрафиолетовой области спектра.

Вин принадлежал к тому уже почти исчезнувшему типу физиков, которые были одновременно очень образованными теоретиками и искусными экспериментаторами. Он открыл закон смещения в свободное от работы время и после уговоров опубликовал его как “частное сообщение”, не получив разрешения PTR на публикацию. В то время он работал в лаборатории оптики PTR под руководством Отто Люммера. В обязанности Вина входила практическая работа по подготовке экспериментального исследования излучения абсолютно твердого тела.

Первой ступенью этих исследований было конструирование достаточно хорошего фотометра — прибора, позволяющего сравнивать интенсивность света (количество энергии в данном диапазоне длин волн) от разных источников, таких как газовая лампа и электрическая лампочка. Лишь осенью 1895 года Люммеру и Вину удалось улучшить модель полого абсолютно черного тела, которое можно было однородно нагревать.

В то время как Вин и Люммер продолжали днем разрабатывать новую модель абсолютно черного тела, вечером первый пытался найти уравнение Кирхгофа для распределения излучения абсолютно черного тела. В 1896 году Вин на основании своих данных об энергии излучения абсолютно черного тела в коротковолновой области спектра вывел формулу, которую очень скоро подтвердил Фридрих Пашен из университета в Ганновере.

В июне того же года, когда сообщение о законе распределения появилось в печати, Вин оставил *PTR* ради должности экстраординарного профессора в Высшей технической школе в Ахене. В 1911 году он получил Нобелевскую премию по физике за открытия в области законов, управляющих тепловым излучением. А Люммер, оставшийся в *PTR*, продолжил экспериментальную проверку закона распределения. Для чистоты эксперимента ему требовалось провести измерения в таком широком диапазоне высоких температур, который никогда прежде не исследовался. Два долгих года совместной работы с Фердинандом Курльбаумом и Эрнстом Прингсгеймом ушли на усовершенствование модели абсолютно черного тела. Наконец в 1898 году у него в руках оказалось соответствовавшее последнему слову техники нагревающееся электричеством устройство — итог более чем десятилетней кропотливой работы. С его помощью можно было достичь температуры 1500°C.

Отложив на графике интенсивность излучения вдоль вертикальной оси, а длину волны излучения — вдоль горизонтальной, Люммер и Прингсгейм обнаружили, что сначала при росте длины волны интенсивность возрастает, а затем, достигнув максимума, начинает падать. Спектральное распределение энергии излучения абсолютно черного тела по форме напоминает плавник акулы. Форма кривой тем отчетливее, чем выше температура. Нагревая абсолютно черное тело до разных температур, снимая показания приборов и строя графики, Люммер и Прингсгейм убедились, что при увеличении температуры длина волны, при которой излучение достигает максимума, смещается по направлению к ультрафиолетовому концу спектра.

Свои результаты они представили 3 февраля 1899 года на заседании Немецкого физического общества³⁶. Доклад делал Люммер. Он объявил собравшимся (среди них был Планк), что измерения подтверждают закон смещения Вина, однако ситуация с этим законом ясна не до конца. Эксперимен-

тальные данные в целом согласуются с теорией Вина, но имеет место небольшое расхождение в инфракрасной области спектра³⁷. Все считали такие результаты ошибкой эксперимента. Но это будет достоверно доказано, только “если удастся поставить новые эксперименты, охватывающие еще более широкий интервал длин волн и еще более широкую область температур”³⁸.

Через три месяца Фредерик Пашен сообщил, что его измерения, хотя и выполненные при более низких температурах, чем измерения Люммера и Прингсгейма, полностью согласуются с предсказаниями закона смещения Вина. Планк вздохнул с облегчением и представил работу Пашена на сессии Прусской академии наук. Закон Вина овладел его воображением. Для Планка теоретический вывод выражения для спектрального распределения энергии излучения абсолютно черного тела был ничем иным, как поиском абсолюта, а поскольку он “всегда считал поиск абсолюта сверхзадачей всей научной деятельности, то с легким сердцем принял за работу”³⁹.

В мае 1896 года, вскоре после того, как Вин опубликовал свой закон распределения, Планк предпринял попытку обосновать этот закон и вывести формулу Вина, исходя из начал термодинамики. Тремя годами позднее, в мае 1899-го, ему показалось, что, призвав на помощь непререкаемый авторитет второго закона термодинамики, он добился успеха. С ним согласились и, несмотря на непрекращающиеся споры экспериментаторов, начали называть закон Вина законом Вина — Планка. Последний был убежден в своей правоте и утверждал, что “границы применимости нового закона, если они вообще есть, совпадают с границами применимости второго закона термодинамики в теории теплоты”⁴⁰. Планк выступал за проверку закона распределения, считая ее необходимой, поскольку для него это одновременно означало проверку второго закона термодинамики. И он получил то, что хотел.

В начале ноября 1899 года, потратив девять месяцев на дополнительные измерения с целью исключить возможность экспериментальных ошибок, Люммер и Прингсгейм сообщили: обнаружено “систематическое расхождение между теорией и экспериментом”⁴¹. Хотя при малых длинах волн теория и эксперимент прекрасно согласовались, при больших длинах волн закон Вина систематически завышает интенсивность излучения. Однако через несколько недель Пашен выступил с противоположным заявлением. Его новые данные свидетельствовали, что закон распределения “представляется строго исполняющимся законом природы”⁴².

Так как большинство ведущих экспертов работало в Берлине, проходившие в столице заседания Немецкого физического общества стали основной ареной дискуссий об излучении абсолютно черного тела и статусе закона Вина. Это стало главной темой собрания Немецкого физического общества 2 февраля 1900 года (такие собрания проходили каждые две недели), когда Люммер и Прингсгейм обнародовали результаты новейших измерений. В инфракрасной области спектра они обнаружили систематическое расхождение между результатами измерений и предсказаниями закона Вина. Оно не могло быть ошибкой эксперимента.

Когда стало очевидно, что закон Вина неверен, начались отчаянные попытки найти ему замену. Но все предлагавшиеся паллиативные варианты не подходили. Было ясно: чтобы установить, где и в какой мере нарушается этот закон, требуются новые опыты при еще больших длинах волн. Ведь выполнялся же он в области более коротких длин волн и не противоречил всем экспериментам, кроме тех, которые были выполнены Люммером и Прингсгеймом.

Планк прекрасно понимал, что любая теория отдана на милость твердо установленным экспериментальным данным. Но столь же хорошо он понимал: “Можно не сомневать-

ся, что расхождение между экспериментом и теорией имеет место, если данные разных наблюдателей в основном согласуются”⁴³. Тем не менее раскол между экспериментаторами заставил его пересмотреть обоснованность своих рассуждений. В конце сентября 1900 года, когда Планк еще занимался проверкой вывода своей формулы, нарушение закона Вина глубоко в инфракрасной области спектра подтвердилось.

Точку в этом вопросе поставили Генрих Рубенс (близкий друг Планка) и Фердинанд Курльбаум. Постоянным местом работы Рубенса была Высшая техническая школа на Берлинерштрассе, где тридцатипятилетний физик незадолго до этого получил должность профессора. Однако основное время Рубенс проводил в расположенном по соседству *PTR*, куда его приглашали работать коллеги. Именно здесь вместе с Фердинандом Курльбаумом он изготовил модель абсолютно черного тела, позволявшую проводить измерения в неисследованной далекой инфракрасной области спектра. В течение лета они проверяли выполнение закона Вина в интервале длин волн от 0.03 мм до 0.06 мм в интервале температур от 200 до 1500°C. Оказалось, что при таких больших длинах волн различие между теорией и экспериментом настолько велико, что может свидетельствовать только об одном: закон Вина не выполняется.

Рубенс и Курльбаум хотели представить свои результаты в виде доклада Немецкому физическому обществу. Ближайшее заседание было назначено на пятницу, 5 октября. Написание доклада времени почти не оставалось, и они решили подождать две недели до следующего заседания. Однако Рубенс знал, что Планку не терпится узнать новости.



Дом, в котором полвека прожил Планк, стоял посреди огромного сада в Грюневальде, богатом пригороде Западного Бер-

лина, среди элегантных вилл профессоров, банкиров и юристов. Седьмого октября, в воскресенье, на обед к Планку пришли Рубенс с женой. Вскоре разговор друзей неизбежно свернул на физику и на задачу об абсолютно черном теле. Рубенс рассказал, что его последние измерения не оставляют места для сомнений: закон Вина нарушается при больших длинах волн и высоких температурах. Планк узнал, что при таких длинах волн интенсивность излучения абсолютно черного тела пропорциональна температуре.

Тем вечером Планк попытался вывести формулу, которая позволила бы воспроизвести энергетический спектр излучения абсолютно черного тела. Ему было известно три очень важных факта. Во-первых, в области коротких длин волн закон Вина для интенсивности излучения справедлив. Во-вторых, он нарушается в инфракрасной области спектра, где, как показали Рубенс и Курльбаум, интенсивность пропорциональна температуре. В-третьих, закон смещения Вина правилен. Планку предстояло найти способ собрать вместе эти три детали головоломки и написать формулу для интенсивности излучения. Взвешившись за решение этой задачи, он использовал весь свой опыт, накопленный за годы упорной работы.

После нескольких неудачных попыток формулу он получил. Она выглядела многообещающе. Но было ли это именно то уравнение Кирхгофа, которое так давно искали? Справедливо ли оно при любых температурах и для любой области спектра? Планк написал Рубенсу записку и среди ночи пошел ее отправлять. Через несколько дней Рубенс снова появился в доме Планка. Сравнив формулу Планка со своими данными, он обнаружил почти идеальное совпадение.

В пятницу 19 октября на заседании Немецкого физического общества, где присутствовали Рубенс и Планк, Фердинанд Курльбаум сделал формальное сообщение о том, что закон Вина справедлив только для коротких длин волн и что он на-

рушается при больших длинах волн в инфракрасной области спектра. После того как Курльбаум закончил говорить, встал Планк. В повестке дня тема его краткого “сообщения” была обозначена так: “Об одном улучшении закона излучения Вина”. Планк начал выступление словами: “Я сам на заседаниях общества высказывал ту точку зрения, что закон Вина с необходимостью должен быть справедлив”⁴⁴. Но когда Планк продолжил, стало ясно, что предлагается не просто “улучшение”, не просто попытка поправить закон Вина: речь идет о совершенно новом законе — собственном законе Планка.

Проговорив менее десяти минут, Планк написал на доске свое уравнение для излучения абсолютно черного тела. Обернувшись, он посмотрел на знакомые лица в зале и сказал, что эта формула, “насколько я могу судить, соответствует всем экспериментальным данным, опубликованным к настоящему времени”⁴⁵. Ответом были вежливые кивки. Молчание зала можно было понять. В конце концов то, что только что предложил Планк, было еще одной подгоночной формулой для описания экспериментальных результатов. Ведь уже предлагались другие уравнения, призванные восполнить пробел, если все же подтвердится отклонение от закона Вина при больших длинах волн.

На следующий день Рубенс пришел поддержать Планка и сказать ему, что “после окончания заседания он в ту же ночь сравнил формулу с результатами своих измерений... и обнаружил удовлетворительное согласие по всем пунктам”⁴⁶. Меньше чем через неделю Рубенс и Курльбаум сообщили, что они проверили пять разных формул. Сравнив их со своими данными, они выяснили, что наиболее точной является формула Планка. Пашен также подтвердил, что формула Планка согласуется с экспериментом. Однако, несмотря на поддержку экспериментаторов, Планк был озабочен.

Формулу он получил, но что она означала? Какова стоящая за этим физика? Планк понимал, что если ответа на эти вопро-

сы не будет, его результат в лучшем случае окажется “улучшением” закона Вина, “просто формулой, обнаруженной в результате счастливой догадки”, “лишь формально имеющей какое-то значение”⁴⁷. “Именно поэтому, — скажет Планк позднее, — в первый же день после того, как я сформулировал этот закон, я постарался сделать все, чтобы наполнить его истинным физическим смыслом”⁴⁸. Для этого надо было вывести искомую формулу, используя шаг за шагом основные физические принципы. Планк знал, куда он должен прийти, но ему надо было определить путь, которым туда можно было попасть. У него был бесценный указатель: уравнение. Вопрос заключался лишь в том, какую цену он готов заплатить за путешествие?

Следующие шесть недель, вспоминал Планк, он “работал так рьяно, как никогда в жизни”, а затем “тьма рассеялась, и неожиданно забрезжил свет в конце туннеля”⁴⁹. Тринадцатого ноября он написал Вину: “Моя новая формула хороша, а теперь у меня есть и ее теоретическое обоснование, которое через четыре недели я представлю здесь [в Берлине] на Физическом обществе”⁵⁰. Планк ничего не сказал Вину ни о той напряженной интеллектуальной борьбе, результатом которой стала эта теория, ни о самой теории. Все это время он долго и упорно добивался того, чтобы привести свою формулу в соответствие с двумя великими теориями, лежащими в основании физики XIX столетия: с термодинамикой и электродинамикой. Эту борьбу он проиграл.

Планк был убежден, что “теоретическое объяснение должно быть получено любой ценой, не важно, сколь она будет высока”⁵¹. Он “готов был пожертвовать любым из физических законов, в справедливость которых свято верил”⁵². Планк уже не заботился о том, чего это будет ему стоить, лишь бы удалось “получить правильный ответ”⁵³. Для удивительно сдержанного человека, чувствовавшего себя свободно только за пианино, это было очень громкое заявление. Доведенный до изнеможения

борьбой за объяснение своей формулы, он был вынужден совершить “акт отчаяния”. Это и привело его к открытию кванта⁵⁴.



При нагревании стенок абсолютно черного тела внутри полости излучается весь спектр частот: инфракрасные, видимые и ультрафиолетовые. Последовательный теоретический вывод формулы Планка должен был основываться на физической модели, с помощью которой можно было бы воспроизвести спектральное распределение энергии излучения абсолютно черного тела. Кое-что уже приходило Планку на ум. Его не смущало, что такая модель не отражала в полной мере реальность. Единственное, чего хотел Планк, — найти правильное соотношение между частотами и, следовательно, длинами волн излучения внутри полости. Наиболее простую модель удалось придумать, воспользовавшись тем, что распределение частот зависит только от температуры, но не от материала, из которого изготовлено абсолютно черное тело.

В 1882 году Планк писал: “Несмотря на все успехи, достигнутые атомной теорией, ясно, что в конце концов она уступит место предположению о непрерывности материи”⁵⁵. Восемнадцать лет спустя он все еще не верил в атомы: неопровержимо доказательство их существования не было. Из теории электромагнетизма Планк знал, что электрический заряд, колеблющийся с определенной частотой, испускает и поглощает излучение только той же частоты. Поэтому он представил себе стенки абсолютно черного тела в виде набора огромного числа осцилляторов. Хотя каждый осциллятор излучает всего одну частоту, вместе они могут излучать весь спектр частот, которые присутствуют внутри абсолютно черного тела.

Маятник — это осциллятор, частота которого равна числу колебаний за одну секунду. Одно колебание — это отдель-

ное качание туда и обратно, возвращающее маятник в исходное положение. Другой пример осциллятора — груз на пружине. Его частота равна числу прыжков вверх и вниз, совершаемых грузом за секунду, если покоящийся груз потянуть вниз и отпустить. К тому времени, когда Планк для своей теоретической модели использовал то, что он назвал осцилляторами, физика таких колебаний давно уже была известна, а сами колебания маятника или груза получили название “простого гармонического движения”.

Чтобы иметь возможность генерировать разные частоты, Планк представил себе совокупность осцилляторов как набор невесомых пружинок различной жесткости, каждая из которых обладает электрическим зарядом. Нагревание стенок абсолютно черного тела доставляет системе энергию, нужную, чтобы привести осцилляторы в движение. Возбужден данный осциллятор или нет, зависит только от температуры. Если осциллятор активен, он испускает и поглощает излучение внутри полости. Если поддерживать постоянную температуру, через определенное время устанавливается баланс такого динамического обмена энергией излучения и достигается состояние термодинамического равновесия.

Спектральное распределение энергии излучения абсолютно черного тела описывает то, как полная энергия делится между частотами. Планк предположил, что интенсивность излучения определяется числом осцилляторов, колеблющихся на данной частоте, и теперь должен был придумать способ, позволяющий распределить энергию излучения по осцилляторам. Через несколько недель упорного труда Планк понял, что не может вывести формулу, исходя из физических представлений, так долго воспринимавшихся им как символ веры. В отчаянии он обратился к идеям австрийского физика Людвиг Больцмана, наиболее рьяного сторонника теории атомов. На пути к заветной формуле Планку пришлось стать вероотступником и по-

сле долгой “открытой неприязни к атомной теории”⁵⁶ признать, что атом представляет собой нечто большее, чем просто удобное допущение.

Людвиг Больцман был плотным, небольшого роста человеком со впечатляющей бородой, какие носили в конце XIX века. Он родился в Вене 20 февраля 1844 года в семье акцизного чиновника. Некоторое время Больцман учился игре на пианино у композитора Антона Брукнера, но физиком оказался лучшим, нежели пианистом. В 1866 году Больцман защитил докторскую диссертацию в Венском университете и быстро стал известен благодаря своему фундаментальному вкладу в кинетическую теорию газов, названную так потому, что ее сторонники верили: газы состоят из атомов или молекул, находящихся в постоянном движении. Позднее, в 1884 году, Больцман теоретически обосновал закон, ранее сформулированный на основе анализа экспериментальных данных его прежним наставником Йозефом Стефаном. Согласно этому закону, полная энергия излучения абсолютно черного тела возрастает пропорционально четвертой степени температуры T^4 , или $T \times T \times T \times T$. Это значит, что если температуру абсолютно черного тела увеличить в два раза, излученная энергия увеличится в шестнадцать раз.

Больцман был знаменитым педагогом. Несмотря на сильную близорукость, он, хотя и был теоретиком, оказался очень талантливым экспериментатором. Когда в одном из ведущих европейских университетов освобождалось место профессора, его имя обычно стояло в списке претендентов. Только после того, как Больцман отказался от места профессора Берлинского университета, освободившегося после смерти Густава Кирхгофа, эту вакансию, переведя ее в более низкую категорию, предложили Планку. К 1900 году Больцман, всеми признанный теоретик, много раз переезжавший с места на место, был преподавателем Лейпцигского университета. Однако мно-

гие, в их числе и Планк, все еще считали его подход к термодинамике неприемлемым.

Больцман верил, что свойства газов, например давление, — это макроскопическое проявление микроскопических процессов, управляемых законами механики и теории вероятности. Те, кто верил в существование атомов, полагали, что законы классической физики Ньютона управляют движением каждой молекулы газа, но использовать эти законы для определения положения и скоростей всего несметного числа молекул газа практически невозможно. В 1860 году двадцативосьмилетнему шотландскому физики Джеймсу Клерку Максвеллу удалось описать движение молекул газа, не измеряя отдельно скорость каждой из них. Воспользовавшись методами статистики и теории вероятности, он нашел наиболее вероятное распределение скоростей молекул газа, беспрестанно сталкивающихся друг с другом и со стенками сосуда. Применение статистики и теории вероятности было смелым новаторством, позволившим Максвеллу объяснить многие свойства газов. Больцман, который был на тринадцать лет моложе Максвелла, пошел по его стопам при обосновании кинетической теории газов. В 70-х годах он продвинулся еще на шаг вперед. Связав энтропию с беспорядком, он предложил статистическую интерпретацию второго закона термодинамики.

Согласно утверждению, известному как принцип Больцмана, энтропия есть мера вероятности осуществления какого-либо определенного состояния системы. Например, хорошо перетасованная колода карт — это неупорядоченная система с высокой энтропией. Однако новая упаковка, в которой карты упорядочены по мастям и по значениям от двойки до туза, — строго упорядоченная система с низкой энтропией. Согласно Больцману, второй закон термодинамики имеет отношение к эволюции системы из состояния, реализующегося с малой вероятностью (и поэтому с малой энтропией) в более вероятное

состояние с большой энтропией. Второй закон термодинамики не является непреложным. Система может перейти из неупорядоченного состояния в более упорядоченное, как и перетасованную колоду можно упорядочить, разложив карты по мастям. Однако шанс, что такой переход произойдет самопроизвольно, настолько мал, что время, которое предстоит ждать этого события, может во много раз превышать возраст Вселенной.

Планк верил, что второй закон термодинамики непреложен и энтропия возрастает *всегда*. Согласно же интерпретации Больцмана, энтропия возрастает *почти* всегда. С точки зрения Планка, между этими двумя формулировками лежала огромная пропасть. Для него стать на точку зрения Больцмана было равнозначно отречению от всего, что он как физик считал святым, но выбора у него не оставалось — надо было вывести правильную формулу для излучения абсолютно черного тела: “До тех пор я не обращал внимания на соотношение между энтропией и вероятностью, совершенно не интересовался им, считая, что каждый вероятностный закон допускает существование исключений. А я в то время был убежден, что второй закон термодинамики справедлив без всяких исключений”⁵⁷.

Состояние с максимальной энтропией и максимальным беспорядком — наиболее вероятное состояние системы. Для абсолютно черного тела это состояние теплового равновесия — именно то, что требовалось Планку, чтобы найти наиболее вероятное распределение энергии по осцилляторам. Если имеется всего тысяча осцилляторов и десять из них колеблются с частотой ν , именно они определяют интенсивность излучения на этой частоте. Поскольку частота каждого из электрических осцилляторов Планка фиксирована, количество излучаемой и поглощаемой им энергии зависит только от его амплитуды, то есть от размаха колебаний. Частота колебаний маятника, совершающего пять взмахов за пять секунд, равна одному колебанию в секунду. Однако если при раскачивании дви-

жение происходит по большой дуге, маятник обладает большей энергией, чем если бы дуга была меньше. Частота остается неизменной, поскольку она определяется длиной маятника, но избыточная энергия позволяет ему двигаться быстрее, описывая большую дугу. Поэтому маятник совершает то же число колебаний, как такой же маятник,двигающийся по более короткой дуге.

Планк понял, что, используя технику Больцмана, он может получить свою формулу для распределения излучения абсолютно черного тела, только если осцилляторы поглощают и излучают энергию порциями, размер которых пропорционален частоте колебаний. Планк говорил, что “самым важным местом всего расчета” было предположение о том, что при данной частоте энергия состоит из набора равных и неделимых “элементов энергии”. Позднее он назвал их квантами⁵⁸.

Ведомый своей формулой, Планк был вынужден разделить энергию (E) на порции размером $h\nu$, где ν — частота осциллятора, а h — константа. Позднее равенство $E = h\nu$ станет одной из самых известных формул. Если, например, частота будет равна 20, а $h = 2$, то величина каждого кванта энергии будет равна $20 \times 2 = 40$. Если при этой частоте полная энергия равна 3600, то, значит, $3600 \div 40 = 90$ квантов распределены между десятью осцилляторами, колеблющимися с данной частотой. У Больцмана Планк научился методу, позволяющему определить наиболее вероятное распределение этих квантов среди осцилляторов.

Оказалось, что энергия каждого из осцилляторов может равняться только: 0, $h\nu$, $2h\nu$, $3h\nu$, $4h\nu$ и так далее до значения $nh\nu$, где n — целое число. Это соответствует тому, что поглощается или испускается целое число “элементов энергии” (квантов) размером $h\nu$. (Напоминает кассира в банке, который может выдавать купюры только достоинством в 1, 2, 5, 10, 20 и 50 фунтов стерлингов.) Поскольку осцилляторы План-

ка не могут иметь другой энергии, амплитуда их колебаний ограничена. Необычность такого вывода в применении к повседневному миру особенно наглядна, если рассмотреть груз, подвешенный на пружине.

Если амплитуда колебаний груза равна 1 см, его энергия равна 1 (не будем останавливаться на единицах измерения энергии). Если пружину с привязанным к ней тем же грузом растянуть на 2 см, частота колебаний остается прежней. Однако энергия, пропорциональная квадрату амплитуды, будет равна 4. Если правило для энергии осцилляторов Планка применить к грузу на пружине, то в интервале от 1 см до 2 см возможны только колебания с амплитудами 1,42 см и 1,73 см, поскольку соответствующие энергии равны 2 и 3^{59} . Например, амплитуда колебаний не может равняться 1,5 см, поскольку в этом случае энергия равнялась бы 2,25. Квант энергии неделим. Осциллятор не может получить часть кванта энергии: либо все, либо ничего. Это не согласуется с повседневной физикой. В обычном мире нет ограничений на размах колебаний и, значит на величину энергии, которая может излучаться или поглощаться или быть испущена одновременно. Она может принимать любое значение.

От безысходности Планк открыл нечто столь важное и неожиданное, что и сам не сумел сразу оценить значение своего открытия. Его осцилляторы не могут поглощать или испускать энергию непрерывно, наподобие воды, текущей из крана. Вместо этого они могут получать и терять энергию дискретно, маленькими порциями величиной $E = h\nu$, где ν — частота колебаний, совпадающая с частотой излучения, которое может испускать или поглощать осциллятор.

Причина, по которой нельзя увидеть, что макроскопические осцилляторы ведут себя, как осцилляторы атомного размера Планка, в том, что значение h равно 0,000000000000000000000000000000006626 эргов, помноженных

на секунду, или $6,626$, деленное на тысячу триллионов триллионов. Согласно формуле Планка, энергия может увеличиваться или уменьшаться только шажками, размер которых пропорционален значению h . Однако из-за того, что величина h бесконечно мала, в нашем мире квантовые эффекты незаметны. Речь идет о маятниках, детях на качелях и грузах на пружинах.

Осцилляторы заставили Планка “нарезать” энергию излучения так, чтобы их можно было снабдить порциями нужного размера, равного $h\nu$. Он не верил, что энергия излучения действительно “нарезана” на кванты. Для него это был просто способ, которым его осцилляторы могли получать и испускать энергию. Трудность состояла в том, что, согласно методу Больцмана, после разделения энергии в конце требовалось делать порции все меньше и меньше — до тех пор, пока их размер с точки зрения математики не станет равным нулю, сами порции не исчезнут, а полученный результат все равно останется неизменным. Основой всего расчета был прием, позволявший собрать обратно разделенные кванты. К несчастью для Планка, при использовании такого приема его формула тоже исчезала. Ему некуда было деваться от квантов, но его это не волновало. Формула получена, а с остальным можно было разобратся позднее.



“Господа!” — начал Планк, представ перед членами Немецкого физического общества, собравшегося в одной из аудиторий Физического института Берлинского университета. Рубенс, Люммер и Прингсгейм присутствовали на заседании. Доклад начался в пять часов вечера в пятницу, 14 декабря 1900 года, и назывался “К теории распределения энергии излучения нормального спектра”. “Несколько недель назад я имел честь привлечь ваше внимание к новому выражению, описывающему,

как мне кажется, распределение энергии излучения во всех областях нормального спектра”, — говорил Планк⁶⁰. Теперь он рассказывал о физической модели, позволившей вывести новое уравнение.

Коллеги поздравляли докладчика. Они, как и сам Планк, считали введение кванта, порции энергии, “чисто формальным приемом”, о котором “не стоит слишком задумываться”. Важно было то, что Планку удалось обосновать формулу, о которой он рассказывал в октябре. Конечно, идея разделения энергии осциллятора на кванты была достаточно странной, но об этом на время можно было забыть. Все были уверены, что это трюк теоретика, остроумный математический прием, использованный, чтобы получить правильный ответ. Он не имеет истинного физического смысла. Что продолжало удивлять, так это точность полученной формулы для энергии излучения. Никто, включая самого Планка, не придавал кванту энергии большого значения.

Однажды рано утром Планк вышел из дома с семилетним сыном Эрвином. Они направлялись в соседний Грюневальдский лес — любимое место прогулок семьи. Позднее Эрвин вспоминал, как отец сказал: “Сегодня я сделал открытие такое же важное, как открытие Ньютона”⁶¹. Рассказывая эту историю много лет спустя, он не смог точно вспомнить, когда именно это произошло. Вероятно, незадолго до декабрьской лекции. Возможно ли, что Планк уже тогда полностью осознавал, что такое квант? Или просто старался объяснить сыну, насколько важен новый закон излучения? Ни то, ни другое. Он просто выражал переполнявшую его радость открытия не одной, а сразу двух фундаментальных постоянных: постоянной k , которую он назвал постоянной Больцмана, и постоянной h — кванта действия. Позднее эту константу физики назовут постоянной Планка. Обе эти константы неизменны и вечны. Это две абсолютные величины, описывающие природу⁶².

Планк понимал, чем обязан Больцману. Он назвал именем этого австрийского физика постоянную k , введенную им при создании формулы для излучения абсолютно черного тела. Кроме того, Планк дважды, в 1905 и в 1906 годах, номинировал Больцмана на Нобелевскую премию. Но было поздно. Больцмана давно мучили болезни: астма, мигрень, слабое зрение, ангины. Но сильнее всего он страдал от приступов тяжелой маниакальной депрессии. В сентябре 1906 года, во время отдыха в Дуино вблизи Триеста, он повесился. Больцману было шестьдесят два года, и хотя некоторые из его друзей давно боялись худшего, известие о его смерти стало для них ужасным ударом. Больцман все больше чувствовал себя одиноким и недооцененным, хотя это было совсем не так. Он был одним из самых известных и уважаемых физиков своего времени. Но в периоды отчаяния непрекращающиеся споры о существовании атомов заставляли его считать, что дело всей его жизни разрушено. В 1902 году Больцман в третий и последний раз вернулся в Венский университет. После смерти Больцмана Планку предложили занять его место. Планк, считавший работы Больцмана “триумфом красоты теоретического исследования”, был польщен, но отказался⁶³.

Постоянная h — это тот “топор”, который “рубит” энергию на кванты, и Планк был первым, кто поднял его. Но для него квантование было лишь способом, с помощью которого вообразимые осцилляторы испускали и поглощали энергию. Планк не делил на порции величиной $h\nu$ саму энергию. Есть разница между открытием и его осмыслением. Планк выполнил только действия, которые были необходимы для вывода формулы, хотя ему они не были понятны. Он квантовал только энергию набора осцилляторов, но, хотя это и следовало сделать, не энергию отдельного осциллятора.

Частично это было связано с тем, что Планк надеялся избавиться от кванта. Только гораздо позже он осознал далеко

идущие последствия своих действий. Глубоко консервативные взгляды заставили его потратить почти десятилетие на попытки уместить квант в рамки существовавшей физики. Он знал, что многие его коллеги считали это пустой тратой времени. “Я считал иначе, — писал Планк. — Я твердо знал, что элементарный квант действия [h] играет более важную роль в физике, чем мне представлялось вначале”⁶⁴.

В 1947 году, спустя много лет после смерти Планка, семидесятидевятiletний Джеймс Франк, его ученик и коллега, вспоминал безнадежную борьбу Планка, его попытки “уйти от квантовой теории, понять, может ли он... насколько возможно уменьшить ее влияние”⁶⁵. Франку было ясно, что Планк был “революционером поневоле”, который “в конце концов пришел к выводу, что ‘сделать ничего нельзя. Нам надо жить с квантовой теорией. И, поверьте мне, она будет развиваться’”⁶⁶. Это была вполне подходящая эпитафия для упирающегося революционера.

Физикам действительно пришлось научиться “жить с квантом”. И первым это сделал совсем молодой человек, живший в Швейцарии, в Берне. Он был клерком, а не профессиональным физиком, но именно его имя Планк связывал с открытием квантования энергии. Этого клерка звали Альберт Эйнштейн.