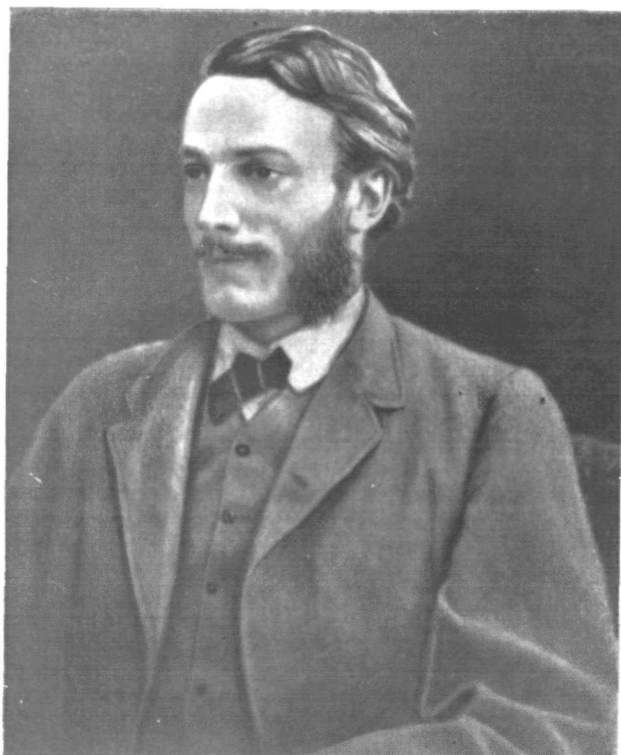




Дж. У. Стрэтт в возрасте двадцати восьми лет (1870 г.).
(Фотография сделана им самим способом мокрого
коллодия.)

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

53

ДЖОН УИЛЬЯМ СТРАТТ (ЛОРД РЭЛЕЙ) *)

Дж. Говард

ШКОЛЬНЫЕ ГОДЫ И КЭМБРИДЖ

Джон Уильям Стратт родился в Лэнгфорд-Гроф (Мелдон, Эссекс) 12 ноября 1842 г. Его начальное образование часто прерывалось из-за плохого здоровья. В десять лет он поступил в Итон, но пробыл там меньше года. Затем он некоторое время посещал Харроу. В основном он учился в школе в Торквей, где и был подготовлен в университет. В октябре 1861 г. Дж. Стратт поступил в Тринити-колледж в Кембридже, начиная свою университетскую карьеру без расчета на большой успех, но его самоуверенность быстро росла по мере того, как он продвигался в занятиях. На годовых экзаменах в колледже он всегда занимал высокое место, хотя и далеко еще от самого верха, так как эти экзамены включали классические и другие предметы. Но среди учеников Рауса, казалось, именно он и мог бы стать «первым рэнглером». В то время Кембриджский университет вообще, а Тринити-колледж в особенности, выпускал преимущественно английских математиков и ученых по естественным наукам и гордился такими выпускниками, как Бэкон, Ньютон и Кавендиш. Студент посещал колледж, слушал лекции, изучал курсы, но оценка его достижений и даже его будущая карьера зависела от его места в списке лучших, сдавших экзамены по естественным наукам или математике. Человек, сдавший лучше всех эти экзамены, стоявший во главе списка в первом классе, назывался (до 1912 г.) «первый рэнглер», следующие — «второй рэнглер», «третий рэнглер» и т. д., отличившийся во втором классе назывался «старший оптиме» и в третьем классе — «младший оптиме». Тот, кто имел несчастье быть в конце списка, получал на всю жизнь прозвище «деревянная ложка» **). Результаты экзаменов и ранги кандидатов публиковались в газетах, а также в бюллетене университета и играли решающую роль при определении звания и положения окончившего колледж, в том числе и при присуждении звания профессора. Лорд Кельвин (который был «вторым рэнглером» в 1845 г. ***), назвал эту систему «дурной». В его годы почетное звание «первого рэнглера» не всегда присуждалось лучшим математикам, а присуждалось тому, кто был лучше подготовлен к экзаменам постоянными репетициями и натаскиванием со стороны своих руководителей. Дж. Дж. Томсон, который был вторым после Джозефа Лармора в 1880 г., был такого же мнения. Математик Кэйли и астрономы Эйри и Адамс были в свое время «первыми рэнглерами». Математик Хоккинс прославился тем, что среди своих учеников имел семнадцать «первых рэнглеров», но этот рекорд был перекрыт его преемником Э. Д. Раусом, который в тридцать три года имел среди своих учеников двадцать семь «первых рэнглеров». Сам Раус был «первым рэнглером» в том году, когда Максвелл был вторым. Раус воспитывал своих студентов на исключительно ясных лекциях, которые давали слушателям гораздо больше, чем лекции математиков-профессоров университета. Дж. Дж. Томсон отмечал также исключительную регулярность этих лекций: тот, кто посещал их, мог точно сказать, что читал Раус в определенный день и час на протяжении двадцати пяти лет.

Во время пребывания в колледже Стратт увлекался теннисом и фотографией. Одна из первых его статей называлась «К вопросу о беспорядочном полете теннисного

*) John N. Howard, John William Strutt, Third Baron Rayleigh, Appl. Optics 3 (10), 1091 (1964). Перевод Э. Н. Лотковой.

**) Такой подарок и преподносился ему символически его одноклассниками.

***) «Первым рэнглером» в тот год был преподаватель Стивен Паркинсон, впоследствии наставник Сент-Джонс-колледжа и автор курса оптики, по которому учился Дж. У. Стратт.

мича». Его интерес к (пластиночной) фотографии заставил его особенно остро почувствовать отсутствие в университете какого-либо оборудования для экспериментальных работ.

Стрэтт посещал лекции Стокса по оптике и упорно намекал своему профессору, что он хотел бы ассистировать при демонстрациях, но Стокс, человек молчаливый, никак не реагировал на его просьбы.

В январе 1865 г. Дж. У. Стрэтт получил степень и звание «старшего рэнглера». Несколько вопросов на экзамене были связаны с геометрической и физической оптикой, а один из них предвосхитил эксперимент, поставленный позже Майкельсоном



Рис. 1. Терлинг (Челмсфорд, Эссекс).

В правом крыле расположены комнаты прислуги и кухня, а в левом — бывшие конюшни, превращенные Рэлеем в лабораторию. Купол на крыше лаборатории построен в 1930 г. четвертым бароном Рэлеем для изучения ночного неба.

и Морли: «Френель предполагает, что когда тела движутся в среде, скорость среды относительно тела имеет то же направление, но изменяется в пропорции $1 : \mu$. Покажите, что замедление стеклянной пластинки не будет зависеть от движения Земли, если квадрат скорости Земли по сравнению со скоростью света будет пренебрежимо мал». Один из экзаменаторов сказал: «Работы Стрэтта настолько хороши, что могут быть посланы сразу в печать без каких-либо поправок».

Стрэтт увенчал свой триумф, представив работу на премию Смита — другой знак признания достижений в Кембридже по естественным наукам. Первым лауреатом премии Смита был Кельвин, а Максвелл разделил ее с Наусом. В двадцать два года Стрэтт уже был известен во всей Великобритании как способный, многообещающий физик-теоретик. Затем Стрэтт получил место в Тринити-колледж. Потом, вместо традиционного турне по Европе, он с приятелем съездил в Соединенные Штаты, все еще переживавшие последствия гражданской войны. Он даже встретился там с президентом Эндрю Джонсоном (и отметил, что тот говорит грамматически неправильно). Об этой поездке у Стрэтта сохранилось много воспоминаний.

ПЕРВЫЙ НАУЧНЫЙ ПЕРИОД И ТЕРЛИНГ

Шустер дал полный отчет о положении в физике в 1865 г. к началу деятельности Джона У. Стрэтта *). Опыты Джоуля о преобразовании энергии только что получили признание и Уильям Томсон (позднее лорд Кельвин), почти сорока лет от роду, дал свою формулировку второму закону термодинамики, когда Стрэтт еще ходил в школу. Ко времени поступления Стрэтта в университет Максвелл уже применил законы теории вероятности к кинетической теории газов, и пока Стрэтт готовился к заключительным экзаменам, статья Максвелла «О динамической теории электромагнитного поля» была доложена Королевскому обществу. Грин и Стокс переложили волновую теорию света в упругую, а Фуко показал экспериментально, что свет распространяется в воде более медленно, чем в воздухе. Фарадей был все еще жив, хотя стар и немощен. В области эксперимента Бунзен и Кирхгоф только что ввели спектральный анализ, фото-

*) За исключением специальных оговорок, источники всех цитат могут быть найдены в библиографии, помещенной в *Applied Optics* 3(10), 11 (1964). Там же приводится список основных работ Рэля. (Прим. перев.)

графия все еще была в стадии зарождения, и проводились первые исследования излучения, наблюдаемого при электрическом разряде в вакуумных трубках. В лаборатории вакуум получали лишь после нескольких часов работы ручного насоса Тёплера, электричество получали от генераторов, а также ручным способом или от батарей, а бунзеновской горелке было всего восемь лет от роду.

Четыре года прошло со времени получения Страттом степени в 1865 г. до выхода его первой статьи в 1869 г. В этот период он работал в Тринити-колледж и посещал также дополнительные лекции, например, лекции Стокса, но в основном в этот период он читал и изучал научную литературу. Один из его профессоров посоветовал ему изучить немецкий язык, и он знал работу Гельмгольца «*Die Lehre von den Tonempfindungen*» (которая появилась в 1862 г.) как свою собственную. Отсюда начался его громадный интерес к акустике и физиологии слуха. Эта же работа привела его к работам Гельмгольца о цветном зрении. Юнг и Максвелл также писали о цветном восприятии, и это стало одной из областей первых экспериментальных исследований Стратта. Но в этот период он главным образом осваивал и усовершенствовал математическую технику, в основном методы Лагранжа. Во многих физических проблемах, в оптике, акустике, электричестве и гидродинамике, где мы не видим непосредственно движения материальных частиц, можно все же описать такие понятия, как энергия и количество движения, с помощью обобщенных координат, используя функцию Лагранжа. Такое приближение особенно полезно при анализе колебаний, так как в обобщенных координатах члены, включающие основные частоты и гармоники, значительно проще по форме и легче поддаются преобразованиям. Конечно, Рэлей не был единственным, кто применил подобную методику, но он, пожалуй, лучше, чем кто-либо другой, разглядел родственные проблемы в динамике, акустике, оптике и теории электричества. После решения проблемы в одной области он мог немедленно разрешить аналогичную проблему в любой другой области.

Как заметил Линдсей, интенсивные занятия у Рауса заронили математические методы в каждого студента так глубоко, что эти методы стали естественной частью его мышления: «Это не было строгой (rigorous) математикой в полном смысле слова, но эта была могучая (vigorous) действенная математика». Хотя ученую степень Рэлей получил фактически за работы по математике, он обычно подходил к проблеме с физической точки зрения и рассматривал математику как вспомогательный аппарат. Сам Рэлей так описывал свой подход (во введении к «Теории звука»): «При математических исследованиях я обычно использовал такие методы, которые казались естественными для физика. Чистый математик будет жаловаться, и, как необходимо отметить, иногда вполне справедливо, на недостаточную точность. Но у этого вопроса есть две стороны, поскольку, как бы ни было важно постоянное соблюдение законов чистой математики, физик иногда может довольно хорошо уяснить суть с помощью аргументов, с его точки зрения вполне удовлетворительных и убедительных».

Характерно, что решение физической задачи Рэлей обычно начинал с простейшего возможного математического представления (например, одномерной модели), со временем вводил дополнения, а затем обобщал свой результат. Он исследовал предел каждой функции при малых или больших аргументах; он исследовал, сколько членов ему нужно сохранить в функции, разложенной в ряд, и развил мощные методы аппроксимации, в которых усложнения можно рассматривать как возмущения. Метод Рэрея — Ритца, метод Шрёдингера — Рэрея, метод Венцеля — Крамера — Бриллюэна — это все развитие математических методов, созданных Рэлеем.

В период 1866—1871 гг., работая в Тринити-колледж, он начал также широко сотрудничать с Максвеллом и Уильямом Томсоном. Он вынужден был отказаться от работы в Тринити (где он готовился на бакалавра) после женитьбы в 1871 г. на Эвелин Бальфур, сестре своего товарища по колледжу, Артура Бальфура. Когда он узнал, что она интересуется музыкой, он подарил ей свой перевод работы Гельмгольца «*Tonempfindungen*». К сожалению, ее реакция на это неизвестна. Джон Стратт со своей женой поселился в фамильном имении в Терлинге, где переоборудовал часть помещения (старые коюшники и сеновал) в личную лабораторию.

Вскоре после женитьбы он перенес тяжелый приступ ревматизма, что сильно подорвало его здоровье. В период выздоровления он вместе с женой и ее сестрой Элеонорой Бальфур предпринял длительную поездку в Египет. Они совершили большое путешествие по Нилу на крытой лодке. Во время этого путешествия Стратт написал большую часть «Теории звука», первая часть которой была написана без пользования библиотекой. Однако он долго тщательно отделял этот материал, вплоть до его публикации в 1877 г. Вскоре после возвращения Дж. Стратта на родину умер его отец (в 1873 г.), и он унаследовал титул. Он расширил лабораторию, провел газ для бунзеновской горелки, освещение, установил паяльную лампу и начал экспериментальные исследования в области оптики и акустики. Кроме большой лаборатории, мастерской и темной комнаты для занятий фотографией, у него была одна комната специально для оптических и спектроскопических экспериментов, стены которой были окрашены в черный цвет, как рассказывают, сажей, размешанной в пиве.

РАННИЕ РАБОТЫ ПО ОПТИКЕ

Самым ранним научным увлечением Джона Стрэтта была фотография. Метод жидкого коллодия был введен лишь в 1851 г., и фотографии должны были подготавливать и сенсублимизировать пластинку непосредственно перед использованием. Первая фотография (листа папоротника) была им сделана в возрасте пятнадцати лет. Он в совершенстве овладел фотографией с мокрыми пластинками (а позднее и различными сухими процессами). В библиотеке в Терлинге имеется замечательный альбом с подробными photographиями различных древних египетских памятников, сделанных им во время путешествия по Нилу в 1872—1873 гг. Первое его научное применение фотографии, начатое в 1871 г., заключалось в изготовлении копий дифракционных решеток. На эту тему он написал несколько статей. Его основное внимание было направлено на устранение с помощью фотографии недостатков грубых решеток и получение более тонких, но его первые попытки были неудачны. Однако он сразу же с успехом снял копии со стеклянных решеток контактным печатанием. (Он сделал также еще в 1873 г. реплики решеток, отлитые из коллодия.) Он даже изобрел в 1871 г., за четыре года до Сорэ, решетки из зонных пластинок.

Впоследствии Рэлей сделал два других важных вклада в фотографию: в 1887 г. он описал технику цветной фотографии, которая позднее (в 1891 г.) была успешно осуществлена Г. Липшманом (за что Липшман получил Нобелевскую премию в 1908 г.). В 1891 г. он представил полную теорию фотографии с камерой-обскуры, разрыв и улучшив раннюю работу Петцвалья 1859 г.

В статье 1874 г. он впервые показал, что разрешающая сила решетки определяется произведением полного числа нанесенных штрихов на порядок спектра. В ряде статей, написанных в 1879 и 1890 гг., он рассмотрел подробнее разрешающую способность решеток и ввел хорошо известный принцип Рэрея: две длины волны можно считать разрешенными, если центр дифракционного изображения второй длины волны падает на первый минимум дифракционного пятна первой длины волны. В этой же серии статей он установил «предел Рэрея» для aberrаций оптических приборов: «Оптическая система даст изображение, мало искаженное по сравнению с изображением с абсолютно правильной системой, в том случае, если весь свет в фокусе будет иметь разность фаз, не превышающую четверти длины волны, так как только в этом случае результирующая не может на много отличаться от максимума». Позже он развил эту концепцию во многих статьях об aberrации телескопа и микроскопа. Другим ранним предметом увлечения Стрэтта, который он изучал по литературе после окончания работы над диссертацией, была работа Максвелла о цветовом восприятии. Заметки Стрэтта по этому вопросу датированы маем 1865 г. В 1870 г. он сам провел несколько исследований по цветовому восприятию и обнаружил, что если скомбинировать фильтр из щелочного раствора лакмуса, который поглощает желтый и оранжевый цвета (и выглядит синим на просвет), с фильтром из хромата калия, который срезаает синюю и сине-зеленую область (выглядит красным на просвет), получается ощущение желтого цвета («составной желтый»), хотя желтый цвет спектра срезан фильтрами. Затем он изобрел прибор, который позволял комбинировать красный свет спектра с зеленым, так что получалась субъективная видимость желтого цвета. Он обнаружил, что из двадцати трех обследованных им мужчин шестнадцати из них потребовалось одинаковая пропорция красного и зеленого цветов, чтобы увидеть желтый, но у пяти из остальных, чтобы получить такое же восприятие желтого, потребовалось зеленого в два раза больше (двум другим потребовалось больше красного). Это не было цветовой слепотой в обычном (красно-зеленом) смысле, так как эти люди могли различать красный и зеленый так же, как и другие. Этот род ненормального цветового восприятия называется аномальным трихроматизмом.

Его интерес к чувствительности человеческого глаза к желтому цвету связан со старым Чарльзом Дарвином (отцом друга по колледжу Дж. Г. Дарвина). Дарвин говорил, что большинство цветков растений имеют желтый цвет потому, что насекомые их легче замечают, и поэтому эти цветки лучше опыляются. Стрэтт считал, что исходя из того, что мы видим цвета растений ярко-желтыми, нельзя предполагать, что глаза насекомых имеют такую же цветовую чувствительность. Дарвин говорил, что над этим надо подумать, но его дальнейшие соображения по этому поводу не известны.

ГОЛУБОЙ ЦВЕТ НЕБА: РЭЛЕЕВСКОЕ РАССЕЯНИЕ

Проводя свои ранние эксперименты по цветному видению, Стрэтт заметил, что цветовое восприятие зависит от синевы неба, и это привело его к изучению голубого цвета неба и красного цвета заката. Со времен Ньютона многие физики приписывали голубой цвет неба отражению солнечного света от атмосферных частиц в форме пластинок (очень тонких по сравнению с длинами волн видимого света) и считали, что цвет должен быть голубым первого порядка по шкале Ньютона. Клаузиус написал целый ряд

статей, доказывающих, что, вообще, если голубой цвет неба обусловлен тонкими пластинками, то эти тонкие пластинки должны быть в виде пузырьков, таких, как, например, пузырьки воды. Он показал, что если бы рассеивающие частицы были в виде капель, а не пузырьков, звезда казалась бы нам не точкой, а диском. Однако в теории пузырьков это исключается и снова получается голубой цвет первого порядка по шкале Ньютона. Критики теории пузырьков Клаузиуса подчеркивали, что небо более голубое, чем ньютоновский голубой цвет первого порядка, и что смола, осажденная из спиртовой суспензии, рассеивает цвет голубого оттенка, но частицы этой суспензии наверняка не являются пузырями.

Тиндаль к тому же провел обширные исследования рассеяния света от коллоидной суспензии и нашел, что синий цвет, рассеянный под определенным углом к падающему лучу, полностью поляризован.

В своей статье, написанной в 1871 г., Стретт показал из соображений размерности, что интенсивность света неба, если она обусловлена отражением либо от тонких пластинок, либо от пузырьков, должна изменяться как λ^{-2} (отсюда следует, что интенсивность голубого света, отраженного таким образом, должна быть раза в четыре больше красного). Если же рассеянный свет обусловлен частицами, малыми по сравнению с длиной волны, то интенсивность его изменяется с длиной волны как λ^{-4} (или что интенсивность рассеянного голубого света будет в шестнадцать раз больше красного). Затем он перешел к выводу количественных соотношений, касающихся поляризационных эффектов. В этой статье он впервые использовал теорию эфира, где предполагалось, что рассеивающие частицы «заполняют эфир для того, чтобы увеличить его инерцию». (Однако он отмечал, что математический формализм не зависит от этого предположения.) Эта статья характеризует рэлеевский подход к проблеме: предположение о малости частиц, пренебрежение членами высшего порядка и поиски предельных значений математических функций. Спустя десять лет, в 1881 г., он вывел эти же соотношения с точки зрения максвелловской теории. К этому времени он пересмотрел некоторые члены высшего порядка и решил задачу для сферических частиц. В 1899 г. Рэлей снова вернулся к проблеме голубого цвета неба и показал, что предположение об атмосферных частицах вовсе не обязательно: молекулы атмосферы сами могут давать рассеяние. Сложные выражения, выведенные Рэлеем для рассеяния света на частицах, малых по сравнению с длиной волны падающего излучения, объясняют изменения интенсивности и степени поляризации рассеянного света в зависимости от угла, длины волны и коэффициента преломления частиц (или самого газа). Если падающее излучение монохроматично, то длина волны при рассеянии не изменяется и формула Рэрея в этом случае дает угловую зависимость рассеяния, поэтому в спектроскопии комбинационного рассеяния рассеянный свет, частота которого не изменилась, называется рэлеевской линией, в то время как стоксова и антистоксова линии по частоте смещены. Томпсоновское рассеяние — это применение рэлеевской теории к очень коротким длинам волн (длины волн, близкие к резонансным); оно объясняет распределение сплошного рентгеновского спектра или рассеяние свободных электронов.

В 1908 г. Густав Ми, исходя из рэлеевской теории и учитывая члены высшего порядка, полностью решил задачу рассеяния света на частицах, размеры которых сравнимы с длиной волны.

ПРОФЕССУРА В ЛАБОРАТОРИИ КАВЕНДИША

До второй половины девятнадцатого столетия не существовало учебных лабораторий или руководств по «практической физике», с помощью которых студенты могли бы получить лабораторную практику по экспериментальной технике. Великие экспериментаторы прежних времен — Ньютон, Кавендиш, Юнг, Фарадей и др. — овладевали экспериментальной техникой в частных лабораториях или помогали в работе своим старшим наставникам.

В 1850 г. Уильям Томсон очистил в колледже Глазго старый винный и прилегающий к нему угольный подвалы для проведения лабораторных занятий по электричеству. Ассистентов и мастеровских не было; если студенту нужна была катушка сопротивления, он должен был сам найти проволоку и сам ее намотать. Но это было начало академической экспериментальной физики. У Стокса в Кембридже была комната, где он экспериментировал, но он не пользовался помощью студентов или ассистентов. В 1867 г. профессор Клифтон в Оксфорде организовал небольшой класс по практической физике, а в 1868 г. была основана Кларендонская лаборатория. В 1870 г. такие классы были организованы в Лондоне в Королевском колледже и университетском колледже. Подобные учебные лаборатории в Европе были лишь в Сорбонне у Жамена и в США у Пикеринга в Массачусетском технологическом институте. В 1869 г. Совет университета в Кембридже решил, что должна быть установлена специальная профессура для обучения и демонстрации экспериментальной физики. В октябре 1870 г. президент университета, седьмой герцог Девонширский (Уильям Кавендиш, который

был первым лауреатом премии Смита и «вторым рэнглером») пожертвовал капитал (равный 8500 фунтов стерлингов) для создания специальной исследовательской лаборатории. Месяц спустя Совет университета принял его дар, назвал в его честь лабораторию именем Кавендиша и учредил профессиру Кавендиша.

Томсон, в то время уже сэр Уильям (этот титул был присвоен ему в 1866 г. за участие в прокладке кабелей в Атлантике), был приглашен на должность профессора кафедры Кавендиша, но отказался, так же как и Гельмгольц. Затем обратились к Максвеллу, и, по словам Кельвина, если бы тот отказался, этот пост был бы предложен Стрэтту. Стрэтт написал Максвеллу (который из-за слабого здоровья отказался от профессуры в Королевском колледже и уединился в своем шотландском имении в Глэнлайре), упрощая его войти в положение: «В основном требуется не лектор по математике, а тот, кто имеет действительный опыт в экспериментировании, кто сможет направить энергию молодого поколения и бакалавров в нужное русло». Максвелл согласился и провел свою первую лекцию в октябре 1871 г. Объявление об его вступительной лекции, которая проводилась не в большом зале Совета, было дано таким образом, что оно прошло незамеченным для старых членов университета, и на лекции присутствовало лишь около двадцати студентов. Когда позже было объявлено, что профессор Максвелл начнет свои лекции по теплоте в определенное время и в определенном месте, большинство профессоров решило, что это будет вступительная лекция и пришли приветствовать нового профессора. Такие люди, как Адамс, Кэйли и Стокс, сидели в первом ряду, в то время как Максвелл с лукавым видом объяснял им разницу между столбчатой шкалой температур и шкалой Фаренгейта.

Строительство лаборатории было закончено в 1874 г. Среди первых исследователей в Кавендише были Р. Т. Глэйсбрук по оптике и Артур Шустер по спектроскопии. Максвелл продолжал читать курс лекций, до некоторой степени элементарных, но большую часть своего времени тратил на издание неопубликованных работ Генри Кавендиша и передавал ведение лабораторных курсов своему демонстратору. Здоровье Максвелла в 1879 г. резко ухудшилось, и 5 ноября 1879 г. он скончался.

Снова на должность профессора кафедры Кавендиша был приглашен сэр Уильям Томсон, и снова он отказался. Помимо того, что он был профессором в Глазго, он теперь был процветающим консультирующим инженером-электриком и имел прекрасную 126-тонную яхту, стоящую на якоре в месте, где река Кельвин впадает в Клайд. В декабре 1879 г. лорд Рэлей был приглашен занять профессиру Кавендиша. Он согласился занять эту должность на пять лет. Хотя материально он не нуждался, но сельскохозяйственная депрессия 1878—1879 гг. сделала жизнь в Терлинге не столь уж прекрасной. Демонстратор Максвелла ушел в отставку, и Рэлей пригласил в качестве демонстратора Р. Т. Глэйсбрука, который позже стал первым директором Национальной физической лаборатории. В июле 1879 г. метеорологический совет издал постановление о том, что различные типы гигрометров должны быть сравнены и стандартизованы. Стокс договорился, что это будет сделано в лаборатории Кавендиша, а Максвелл для выполнения этой работы пригласил Уильяма Напира Шоу (позднее — директор метеорологического управления), который в то время работал в Берлине с Гельмгольцем. Максвелл умер раньше, чем приехал Шоу, но Рэлей договорился с Шоу, что тот будет продолжать эти метеорологические исследования, и дал ему в помощь второго демонстратора. Возглавить мастерскую Рэлей пригласил Джорджа Гордона, который работал кораблестроителем в Ливерпуле, был ловок и быстр в работе. Его работа не очень радовала глаз, но он делал именно то, что надо, а это только и требовалось лорду Рэлею.

Обязанности профессора кафедры Кавендиша были не тяжелы: за время академического года он должен был быть в резиденции восемнадцать недель. Классы были небольшие: Рэлей читал такие курсы, как «Использование физической аппаратуры» и «Гальваноэлектричество и электромагнетизм», группам из шестнадцати или восемнадцати студентов. До тех пор, пока Глэйсбрук и Шоу не привели в порядок записи демонстрационных лекций и не издали их в виде хорошо известной «Практической физики», единственным пособием для практических занятий были «Физические измерения» Кольрауша и «Элементы физических манипуляций» Пикеринга, оба изданные в 1873 г.

Общее количество студентов в Кавендишской лаборатории быстро возросло от двадцати человек в 1877 г. до шестидесяти двух в 1882 г. и девяноста в 1885 г. Однако наибольший вклад Рэлей заключался в его стремлении заставить исследователей работать над единой объединенной проблемой — программой Кавендиша, а не над отдельными проблемами для каждого человека. В качестве основы такой программы он выбрал упорядочение значений практических электрических единиц. Эти исследования описаны им более подробно в другой статье *). Он предложил родственную тематику одному из своих учеников, Дж. Дж. Томсону: определение отношения электростатических единиц к электромагнитным. Вебер, Максвелл и Уильям Томсон пробо-

*) См. Appl. Optics 3, 1123 (1964). (Прим. перев.)

вали раньше это сделать, но получили слишком расходящиеся результаты. Рэлей сам собирал наиболее важные части аппаратуры. Это описано в одной из статей Дж. Дж. Томсона (Phil. Trans. 174, 707 (1883)) и послужило началом целой серии исследований Томсона, которые привели его в конце концов к открытию электрона. Позднее Томсон говорил, описывая электрические исследования Рэлей в Кавендише, что Рэлей превратил хаос в порядок. Кроме электрических исследований, Шоу начал свои метеорологические измерения, Глэйсбрук же — оптические исследования, изучая отражательную способность кристаллов; Шустера склонили к спектроскопическим исследованиям, Пойнтинг усовершенствовал сахариметр, а Джордж и Корейс Дарвин начали свои исследования морских приливов и отливов. В этот период производительность самого Рэрея достигла своей вершины: за пять лет он написал около шестидесяти статей, т. е. в среднем по одной в месяц, и ни одна из них не была тривиальной. В Кавендише он продолжал акустические исследования, начал свои важнейшие работы по капиллярам и усовершенствовал тестер цветового восприятия. Необходимо упомянуть еще о двух нововведениях Рэрея в Кавендише. В 1882 г. Рэлей открыл доступ во все классы и на демонстрации студентам колледжей Гиртона и Ньюхэма на одинаковых правах со студентами-мужчинами. Рэлей ввел также в практику простой вечерний чай для создания обстановки, располагающей к неофициальным обсуждениям научных вопросов среди исследователей.

В конце декабря 1884 г. Рэлей заявил о своем намерении вернуться к частным занятиям в Терлинге и оставил профессию в лаборатории Кавендиша. В третий раз попросили сэра Уильяма Томсона занять этот пост, но он снова отказался. К удивлению многих, остальные старшие кандидаты не прошли и пост был предложен двадцатисемилетнему Дж. Дж. Томсону. Он продолжил и расширил программу Рэрея по электрическим исследованиям, которые сопровождалось изучением явления разряда в газах, рентгеновских лучей и радиоактивности. Это сделало Кавендиш основным центром физических исследований в конце XIX и начале XX века. Пятнадцать исследователей из Кавендишской лаборатории получили Нобелевскую премию, больше, чем из какой-либо другой лаборатории, и первым среди них был сам Рэлей.

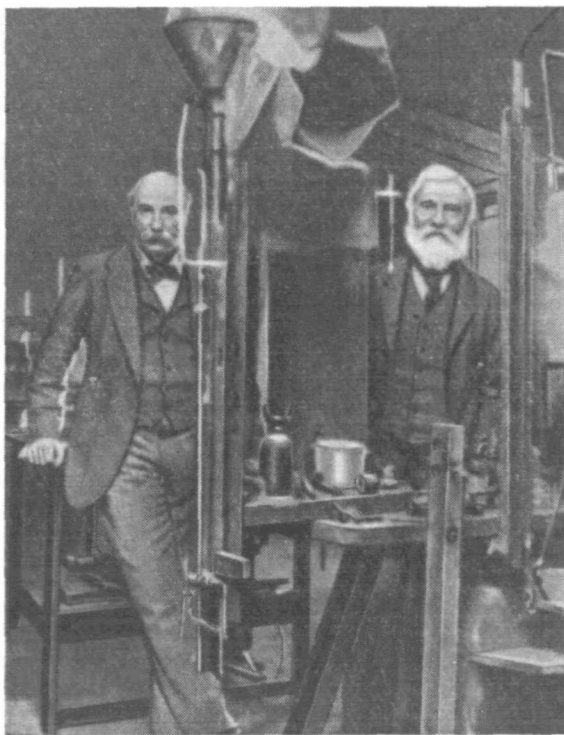


Рис. 2. Лорд Кельвин (справа) и лорд Рэлей в лаборатории в Терлинге (июль 1900).
(Из фотографий профессора А. Г. Вебстера.)

КОРОЛЕВСКОЕ ОБЩЕСТВО И КОРОЛЕВСКИЙ ИНСТИТУТ

В конце декабря 1884 г. Рэлей возвратился в Терлинг. Он взял с собой в качестве ассистента Джорджа Гордона, который возглавлял механическую мастерскую в Кавендишской лаборатории. Все ученые, которые навещали Рэрея в Терлинге, отмечали простоту и даже грубость лабораторной аппаратуры и оборудования. Это частично объяснялось нелюбовью Рэрея к излишнему лоску, частично его бережливым характером и нежеланием делать какие-либо лишние расходы. В любом эксперименте особо важные части аппаратуры конструировались и калибровались с особой тщательностью, но зато остальные делались с помощью того, что было под руками. В Терлинге «воск, веревка, необтесанные деревянные и стеклянные трубки, соединенные между собой неуклюжими и непривлекательными соединениями, попадались на глаза повсюду».

Однако Рэлей не устранился от активного участия в современной науке. В 1882 г., в период проведения своих электрических исследований, он был президентом математи-

ческой и физической секций БА (Британской Ассоциации прогресса науки), а в 1884 г. — президентом БА. В тот год члены БА собирались в Монреале, и после собрания Рэлей посетил много лабораторий в Соединенных Штатах: лаборатории Ньюкома и Майкельсона, Пикеринга, Роуленда и даже Эдисона. Когда посетители явились в Мэнло-Парк, им сказали, что Эдисон, проработав всю ночь, спит. Рэлей считал, что не стоит его беспокоить, но профессор Дж. Баркер чувствовал, что Рэлей приехал издалека, чтобы повидать Эдисона, и разбудил его. Эдисон был рад их видеть, и они прекрасно провели время.

Существует популярный анекдот, касающийся участия Рэрея в Британской энциклопедии. Согласно анекдоту, Рэрея в 1884 г. попросили написать статью на тему «Light» («Свет»), но она не была готова ко времени издания тома, содержащего буквы «L». «Хорошо, мы можем назвать ее „Optics”», — сказал редактор, но опять она не была готова к сроку. В конце концов она появилась под заголовком «Wave theory of light» («Волновая теория света») *. Разумеется, анекдот этот не достоверен. Редактором девятого издания энциклопедии был бывший студент профессора Тэта из Глазго, и он еще раньше попросил Тэта написать статью о свете («Light»), что тот и сделал. Рэлей написал короткую статью об оптике («Optics»), которая в основном была посвящена геометрической оптике, и строго техническую статью по волновой теории («Wave theory»). Часть последней статьи была изъята с тем, чтобы статья уместилась в отведенном ей месте в последнем томе, и появилась позднее в журнале «Nature» под заголовком «Аберрация». Взятые все вместе, эти статьи и в настоящее время представляют собой наиболее доступное, глубокое обсуждение проблем оптики. Большинство более поздних книг на эту тему порождены в значительной степени этими статьями Рэрея.

В 1885 г. Стокс ушел с поста секретаря Королевского общества и его место занял Рэлей, который занимал этот пост до 1896 г. На этой должности ему приходилось выполнять много редакторской работы, так как в его обязанности входило рассмотрение сообщений членов Королевского общества с целью определения их годности для опубликования в докладах собраний и в «Трудах» Общества. Во время его правления «Труды» разделялись на две серии: А — для физических статей и В — для биологических статей. (Соответствующие изменения в «Proc. Roy. Soc.» произошли в 1905 г.) В 1887 г. Рэлей унаследовал после Джона Тиндаля пост профессора естественной философии в Королевском институте и занимал его до 1905 г. В его обязанности в основном входило: в сезон перед самой пасхой прочесть курс из шести вечерних лекций и проводить по пятницам вечерние семинары. В его распоряжении была также трехкомнатная физическая лаборатория. Однако у Джеймса Дьюара, профессора химии, в подвале, где он изучал сжатые газы и явления при низких температурах, стояли тяжелые машины, потому здание слишком сильно вибрировало, что мешало производить точные измерения. Рэлей и его помощник Гордон обнаружили также полное отсутствие таких простых вещей, как винты, проволока и т. п. Они приобрели эти вещи, но так как сами не были постоянно на месте, а их помещение сразу подверглось разграблению «шотландскими мародерами» с нижних этажей, Гордон постоянно был вынужден прятать эти предметы первой необходимости, так как любая попытка запереть их рассматривалась как «нарушение правил Института». Рэлей не пытался делать серьезные исследования в Королевском институте, за исключением его исследований аргона, когда он использовал переменный ток, что было только там и возможно. В Терлинге для этого необходимо было запускать на несколько суток паровой двигатель, но даже и тогда мощности не хватало.

АРГОН

К этому периоду деятельности Рэрея относятся исследования, которые принесли ему наибольшую славу при жизни, хотя большинство небританских физиков и сегодня даже не догадывается, что именно Рэлей первым открыл аргон. Будучи профессором Кавендишской лаборатории Рэлей интересовался гипотезой Прюта о том, что атомные веса должны быть целыми числами. Было обнаружено, что если считать атомный вес водорода за 1, для кислорода получается не ровно 16. Было ли это в действительности расхождением, или это экспериментальная ошибка? Рэлей начал работы по более точному определению удельных весов этих газов. При четырех последовательных определениях отношения атомных весов кислорода к водороду он получил: 15,89; 15,882; 15,880 и 15,863. Затем он обратил внимание на азот. В письме в журнал «Nature» (29 сентября 1892 г.) он писал: «Я озадачен некоторыми результатами по определению плотности азота и буду благодарен, если кто-либо из ваших читателей-химиков даст мне совет по этому вопросу. В зависимости от способа приготовления я получил два совершенно различных значения. Относительная ошибка, равная 1/1000, сама по себе мала, но она полностью лежит за пределами ошибок эксперимента и может быть приписана лишь изменениям характера самого газа». В обоих случаях источником азота

* См. перевод: Волновая теория света, М.— Л., Гостехиздат, 1940. (Прим. ред.)

был обычный воздух, из которого кислород удалялся с помощью металлической меди, а более легкий азот получался разложением аммиака. Его письмо в «Nature» не оправдало надежд на получение каких-нибудь объяснений, но его сосед, сэр Джеймс Дьюар, высказал предположение, что, возможно, часть атмосферного N_2 находится в ином аллотропном состоянии, по всей вероятности в виде N_3 , точно так, как кислород существует в виде озона. Рэлей задумался над этим и потратил два года на получение азота различными методами. Выделенный им азот всегда оказывался меньшей плотности, чем атмосферный азот, даже если он до исследования хранился в колбе в течение восьми месяцев. Одна из демонстрационных лекций Рэлей в Королевском институте была повторением ранних опытов Генри Кавендиша с азотом: в колбе с обычным воздухом электрическая искра окисляла азот, а затем окись азота поглощалась поташом. Таким путем удалялся весь азот, за исключением (как заметил Кавендиш) очень небольшого остатка. Рэлей подтвердил результаты Кавендиша, которые оставались незамеченными в литературе на протяжении около ста лет *). В это время к исследованиям азота присоединился Уильям Рамзай в Лондонском университете; его техника заключалась в удалении азота путем сжигания магния в колбе. Рэлей же пользовался искровой техникой. Большую часть азота он удалял в Королевском институте, а окончательно очищал его в Терлинге. В течение нескольких месяцев они писали друг другу частые письма о своих успехах. Недавно Хиберт опубликовал подробное описание открытия и последующего недоверия к нему со стороны ученого мира. 4 августа 1894 г. Рамзай написал Рэлею: «Я отделил газ. Его плотность 19,075, и он не поглощается магнием». Рэлей ответил 6 августа: «Мне кажется, что я тоже отделил газ, хотя в очень маленьком количестве». 13 августа они сделали совместное сообщение Британскому научному обществу. Дьюар опять назвал это иной аллотропной формой азота; другой профессор отметил, что газ должен находиться в таблице Менделеева в семействе платины. 31 января 1895 г. Рэлей и Рамзай представили свою совместную статью на пятидесяти четырех страницах, приводя плотность, коэффициент преломления, растворимость в воде, отношение удельных теплоемкостей и атомный спектр нового газа, называя его «argon» (за инертность, т. е. «без работы») и вводя новую нулевую колонку для благородных газов в Менделеевской таблице. Некоторые ученые возражали, говоря, что такой тяжелый элемент не может быть газом. Рэлей ответил: «Без сомнения, результат очень странен. В самом деле, я вижу некоторые признаки того, что аномальные свойства аргона преподносятся как своего рода обвинения против нас. Но мы работали очень добросовестно. Факты были слишком за нас, и все, что мы можем сделать сейчас, это извиниться за самих себя и за газ».

В процессе отделения аргона Рэлей сконструировал рефрактометр, который носит его имя, и модифицировал манометр Гюйгенса. Кельвин приветствовал открытие аргона, как, несомненно, величайшее научное событие года: «Если можно еще что-нибудь доба-

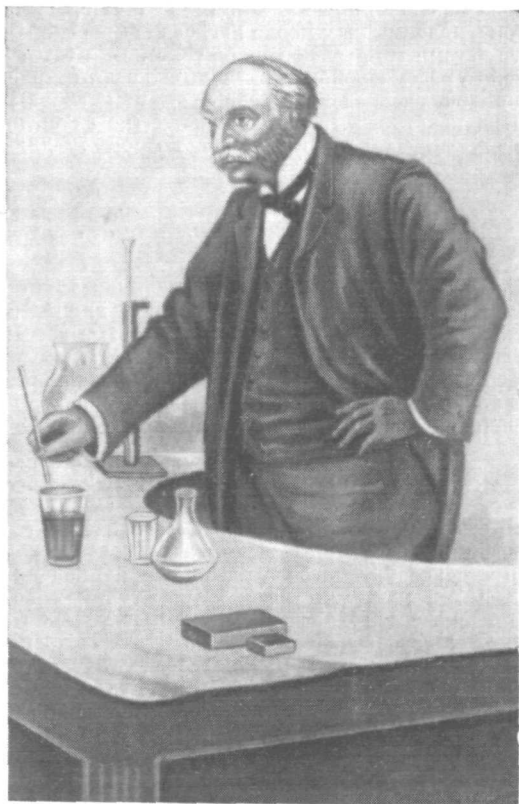


Рис. 3. «Аргон» (лорд Рэлей) с ярмарки 21 декабря 1899 г.

(Воспроизведена с любезного разрешения Королевского института.)

*) К чести сэра Джеймса Дьюара, который обычно изображается как последний, кто признал, что Рэлей действительно открыл аргон, необходимо отметить, что именно он посоветовал Рэлею перечитать заново ранние работы Генри Кавендиша по азоту.

вить к интересу, который мы все должны проявлять к этому потрясающему открытию, так это рассмотрение пути, на котором было совершено открытие. Энергичная работа... начатая в 1882 г., проводилась Рэлеем на протяжении двенадцати лет с неослабной настойчивостью.

Эти результаты были скоро подтверждены другими, и в течение последующих нескольких лет Рамзай вместе с Трепверсом и Содди получили гелий, неон, криптон и ксенон.

ИЗЛУЧЕНИЕ ЧЕРНОГО ТЕЛА: ЗАКОН РЭЛЕЯ — ДЖИНСА

С ранних времен было известно, что тела, достаточно нагретые, начинают светиться. Ньютон в своей «Оптике» спрашивал: «Не все ли твердые тела, нагретые выше определенной температуры, испускают свет; не создается ли это излучение колебательными движениями их частей?» В 1847 г. Дрэпер заметил, что все тела начинают излучать красный свет после нагрева выше 525°C (нагрев он производил в полости печи, грубо имитирующей черное тело). Вин в 1879 г., исходя частично из термодинамического рассмотрения, показал, что если λ_m равна длине волны, отвечающей максимуму кривой распределения энергии при абсолютной температуре T , то $\lambda_m T = \text{const}$. При некоторых предположениях (не очень правдоподобных), касающихся характера излучения тела, Вин получил формулу для интенсивности излучения u_λ между λ и $\lambda + \Delta\lambda$ в виде

$$u_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^{-5}} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}},$$

которая хорошо объясняет экспериментальные данные для коротких длин волн и приводит к указанному соотношению для λ_m . Однако она не согласуется с экспериментальными данными Луммера и Принсгейма для больших длин волн.

В 1900 г. Рэлей рассмотрел проблему излучения черного тела. Предполагая, что все «стоячие волны», которые могут образоваться внутри полости, переносят одно и то же количество энергии, разделив спектр на интервалы и подсчитав, сколько целых волн помещается в каждом интервале, Рэлей вывел формулу

$$u_\lambda = \frac{c_1 T}{c_2 \lambda^4}.$$

Это соотношение оказалось правильным (если не считать численного множителя, возникающего при подсчете собственных колебаний, на что Рэлею указал Джеймс Джинс; сообщение об этом было опубликовано в 1905 г.). Оно согласовывалось с наблюдаемыми данными при больших длинах волн, но, очевидно, было неправильным для значений λ , стремящихся к нулю, ибо в этом случае интенсивность стремится к бесконечности. Это несоответствие было названо «ультрафиолетовой катастрофой». В 1900 г., пытаясь получить формулу, которая сводилась бы к формуле Вина при малых длинах волн и к формуле Рэрея при больших, Планк получил, сначала эмпирически, свою формулу, которая настолько хорошо согласовалась с экспериментальными данными, что вскоре (в 1901 г.) он подвел под нее теоретическую основу, вводя свое понятие кванта энергии. Как и многим другим классическим физикам, Рэлею было трудно представить «квантование» энергии. В письме к Нернсту в 1911 г. он писал относительно квантовой гипотезы: «Я должен признать, что мне не нравится такое разрешение проблемы. Конечно, мне нечего сказать против выводов, вытекающих из квантовой гипотезы, которая в руках способных людей привела к некоторым интересным результатам. Но мне трудно представить, что такая картина в действительности имеет место».

ПОСЛЕДНИЕ ГОДЫ

Последующие годы для лорда Рэрея, начиная с 1895 г. и до самой смерти в 1919 г., были годами почестей и славы, богатства и влияния. Своей женитьбой на Эвелин Бальфур Рэлей получил доступ к высшим правящим кругам: ее дядя, маркиз Солсбери, был министром по делам Индии в правительстве Дарби и должен был стать министром иностранных дел при Дизраэли и в конце концов преемником Дизраэли, как лидера консерваторов, и премьер-министром. Брат жены Рэрея, Артур Бальфур, позднее сделался секретарем своего дяди, а затем последовательно членом Кабинета, министром по Ирландии, Первым лордом казначейства, премьер-министром, Первым лордом адмиралтейства и министром иностранных дел. Оба, Солсбери и Бальфур, прислушивались к советам Рэрея относительно политики в науке и назначений. Говорят, Рэлей уговорил Солсбери добиться титула барона для Джорджа Габриэля Стокса в 1889 г. и произвести в 1892 г. сэр Уильяма Томсона в пары как барона Кельвина

Ларга. Однако Рэлей был консервативным человеком и своим научным влиянием на правительство пользовался очень осмотрительно.

Рэлей участвовал также во многих правительственных комитетах и, как глава комитета, настоял на создании Национальной физической лаборатории. В 1909 г. он был назначен председателем Консультативного комитета по авиации. Его интерес к полетам возник уже во времена работы в Кавендишской лаборатории. Еще в 1883 г. он опубликовал в журнале «Nature» статью о динамике парящего полета птиц. В 1895 г. Рэлей получил сообщение от Отто Лилиентала о том, что тот успешно проверил предсказания Рэрея на планере. Опыты Лилиентала оказали непосредственное влияние на исследования Лэнгли и на последующие эксперименты братьев Райт.

В 1902 г. при коронации Эдуарда VII трое ученых — Рэлей, Кельвин и Хэггинс — были награждены орденами «За заслуги». В 1904 г. Рэлею была присуждена Нобелевская премия по физике за его работы по аргону (сэру Уильяму Рамзаю была присуждена Нобелевская премия по химии в том же году за смежную работу). Рэлей пожертвовал часть своей премии, 7000 фунтов стерлингов, Кавендишской лаборатории на строительство нового крыла. В 1908 г. он унаследовал титул восьмого герцога Девонширского как президент Кембриджского университета (и несколько нарушил традиции: после того как официальный представитель университета произнес хвалебную речь на латинском языке, Рэлей ответил на английском).

Свои комитетские и профессорские обязанности он выполнял добросовестно, хотя и предпочитал им свои физические занятия в лаборатории в Терлинге. Он продолжал печатать большое количество статей. Между его первой статьей 1869 г. и последней в 1919 г. он публиковал по восемь или десять статей в год (всего сорок шесть статей плюс «Теорию звука»), которые все были интересны и полезны. Большую часть времени он проводил в Терлинге, за исключением некоторого периода перед самой пасхой, когда он жил в Лондоне, в доме Бальфура, посещал заседания палаты лордов, читал лекции в Королевском институте и участвовал в работе государственных комитетов. В те годы, когда брат его жены был премьер-министром, он останавливался в Лондоне на Даунинг-стрит, 10. При всем этом он оставался скромным, в его работах нет и следа небрежности или высокомерия. Он уважал как равного каждого честного трудолюбивого ученого, и даже тогда, когда он критиковал, он старался найти смягчающие обстоятельства. Когда молодой Джеймс Джинс написал лорду Рэлею о том, что он обнаружил, что нормировочная функция в расчетах Рэрея по излучению черного тела должна быть изменена в восемь раз, Рэлей немедленно исправил «закон Рэрея» на «закон Рэрея — Джинса».

Рэлей несколько сторонился революционных, новых идей в физике. В быстрой последовательности Рентгеном были открыты рентгеновские лучи, Беккерелем — радиоактивность и Дж. Дж. Томсоном — электрон. Это все было разумно; действительно, Дж. Дж. Томсон немедленно распространил теорию рэлеевского рассеяния на рассеяние рентгеновских лучей. Планк с целью согласовать рэлеевскую теорию излучения черного тела с расчетами Вина ввел свою теорию квантов. Бор затем смог объяснить экспериментальные данные Ридберга и Бальмера, касающиеся спектров, с помощью понятия о стационарных состояниях. Эйнштейн создал теорию относительности. Рэлей следил за всем этим с большим интересом, но говорил, что другие молодые люди должны объяснить подобные явления, что сам он слишком стар. В своем последнем выступлении он говорил: «Мы живем во времена, которые являются революционными как в науке, так и в политике. Возможно, некоторые из тех, кто признает относительность, рассматривая время просто как одно из измерений четырехмерного пространства, могут считать, что будущее отличается от прошедшего не больше, чем север отличается от юга. Но это выше моего понимания, и лучше я на этом остановлюсь».

Жизнь Рэрея, как общественная, так и личная, была в высшей степени спокойной. Ему не приходилось испытывать никаких особенных затруднений; его талант и заслуги были рано признаны и никогда не увядали. Единственной его личной трагедией была преждевременная смерть двух из его четырех сыновей, одного в возрасте шести лет, другого — в возрасте двадцати шести. Его старший сын Артур Чарльз (рожд. 1878 г. и сейчас в добром здравии) сделал выдающуюся военную карьеру — он был командующим флотом при адмирале Битти в Ютландской битве, а затем начальником навигации в адмиралтействе. Леди Рэлей (1847—1934 г.), талантливый художник и музыкант, с интересом и обожанием следила за карьерой своего мужа, своих сыновей и братьев. В течение двадцати пяти лет до первой мировой войны она с удовольствием развлекала у себя на приемах в конце недели в Терлинге как государственных деятелей, так и ученых.

Рэлей не любил споры, хотя не стеснялся выражать свою точку зрения, если она и противоречила мнению большинства. Он был очень осторожен в своих суждениях и не любил делать поспешных выводов. Если он встречался с неожиданными трудностями при эксперименте, он бросал его на время и занимался другим делом, обдумывая между тем встретившуюся трудность. Он признался однажды, что никогда не понимал чужой эксперимент с первого объяснения. В своих статьях он всегда отдавал должное своим помощникам и идейным вдохновителям. Он всегда смущался почестей

и наград, которые выпадали на его долю. Когда на вершине его карьеры его попросили стать председателем Королевского общества, он отказался, говоря, что он будет хорошим председателем и через десять лет, когда он, возможно, не будет уж хорош как исследователь. (Он был позднее председателем, в 1905—1908 гг.) Когда в 1914 г. он был награжден Королевским обществом медалью Румфорда за работы по оптике, он писал: «Я рад, что мои работы по оптике признаны. Возможно они были сделаны с наибольшей любовью. Но я надеюсь, я не затирал хороших и молодых людей». Несмотря на ухудшение здоровья в начале 1919 г., Рэлей продолжал работать в Терлинге над статьями почти до последних дней своей жизни. 30 июня 1919 г. он скончался.

Из четырехсот сорока шести известных статей Рэрея около двухсот касаются оптики, и в данной статье упомянута лишь небольшая часть из них. Многие считают Рэрея ученым-акустиком, а его «Теорию звука» *) основным трудом в этой области. Детальный разбор вклада Рэрея в акустику сделал Линдсей. Рэлей внес также большой вклад в гидродинамику, учение о капиллярах, поверхностных силах и практически в каждую область классической физики. Его интересы в физике были универсальны, «в каждой области» он «беспорядок приводил в порядок». Он был последним из плеяды «ученых-индивидуалистов», работающих с «воском и веревочками», интересы которых охватывали всю физику.

*) См. перевод: Теория звука, тт. 1—2, М.— Л., Гостехиздат, 1940—1944.
(Прим. ред.)