**Оптика Гамильтона — Якоби**

Марио Льоцци

Когда в 1830 г. ирландец Уильям Роуан Гамильтон (1805—1865) начал заниматься оптикой, волновая теория света еще не была общепринятой. Пуассон был еще последователем корпускулярной теории. Био, самый консервативный из великих физиков XIX века, остался верен ей до самой смерти, последовавшей в 1862 г. Брюстер волновой теории не принимал, поскольку считал невозможным приписывать творцу "столь грубую идею, как заполнение всего пространства эфиром для того, чтобы создать свет". Трудно поверить, но и Араго, согласно свидетельству Верде, заявил в 1851 г., что не может более следовать идеям Френеля с тех пор, как тот стал говорить о поперечных колебаниях эфира.

В этих условиях Гамильтон задался целью создать формальную теорию известных оптических явлений, которая была бы приемлема как с точки зрения волновой интерпретации, так и с точки зрения корпускулярной, и была бы построена по образцу принципа наименьшего действия. Гамильтон заявил, что ставит перед собой цель — создать формальную теорию оптических явлений, которая обладала бы такой же "красотой, эффективностью и гармонией", как аналитическая механика Лагранжа. Согласно Гамильтону, мы можем рассматривать законы распространения световых лучей сами по себе, независимо от объясняющих их теорий и прийти таким образом к "математической оптике". Более того, идя по этому пути, Гамильтон вывел отсюда целую научно-философскую доктрину. В эволюции каждой науки Гамильтон различает две стадии: в первой ученый восходит от отдельных фактов к законам, пользуясь индукцией и анализом, во второй он от законов нисходит к следствиям, пользуясь дедукцией и синтезом. Иными словами, человек собирает и группирует отдельные явления до тех пор, пока научное воображение не даст ему возможность вскрыть внутренние законы, позволяющие возвыситься до понимания единства всего разнообразия. После этого из единства человек вновь получает разнообразие, проникая с помощью открытых законов в будущее.

В этом состоит метод Гамильтона. Он замечает, что принцип наименьшего действия, хотя и выведен из метафизических соображений о наличии экономии в природе, следует рассматривать (по крайней мере в известных случаях) как принцип экстремального действия, и поэтому он говорит о стационарном или варьируемом действии. Таким образом, Гамильтон пришел к формулировке носящего его имя принципа, согласно которому некоторая физическая величина, точно определенная математически, стационарна при распространении света. Этим путем ему удается рационализировать геометрическую оптику, превратив ее в формальную теорию, позволяющую интерпретировать опытные данные без необходимости выбора между корпускулярной и волновой гипотезами.

В 1834—1835 гг. Гамильтон обобщил свою теорию оптических явлений на динамику и систематически развил ее, сведя решение общей задачи динамики к системе двух уравнений в частных производных.

В этих работах Гамильтона достигнут чудесный синтез проблем оптики и механики, который был впоследствии вновь найден Луи де Бройлем и который непосредственно вдохновил Шредингера в его исследованиях. Интересно заметить, что наиболее мощные математические средства квантовой механики были заимствованы именно из аналитической механики, сложившейся в рамках классической физики.

Созданная теория позволила Гамильтону предсказать, что если на плоскопараллельную пластину, вырезанную в двуосном кристалле перпендикулярно оптической оси, направить пучок естественного света так, чтобы он преломился в кристалле параллельно оптической оси, то на выходе из пластины образуется светящееся кольцо, диаметр которого меняется с изменением толщины пластины. Как известно,— это явление внутренней конической рефракции, которое было подтверждено экспериментально Хемфри Ллойдом (1800—1881) в опытах с арагонитом.

Однако наиболее общее применение теории Гамильтона было дано Карлом Густавом Якоби (1801—1854) в его знаменитых работах, начатых в 1842 г. Одновременно Якоби упростил и обобщил теорию Гамильтона, придав ей современную форму, ставшую классической. Вот почему эту теорию часто называют теорией Гамильтона — Якоби.

**Скорость света**

Как мы уже упоминали не раз, корпускулярная теория приписывает свету большую скорость в более плотных средах, тогда как волновая теория приписывает ему в этом случае меньшую скорость. Араго, противник корпускулярной теории и не совсем последовательный приверженец волновой, полагал, что измерение скорости света в материальных средах было бы лучшим способом, experimentum crucis, установить, которая же из этих теорий справедлива. И вот в 1838 г. он предлагает соответствующий опыт, выполнение которого, однако, из-за слабости зрения он был вынужден предоставить другим. Таким образом, Араго особенно подчеркнул решающую роль этого опыта для окончательного подтверждения волновой теории, так что задача измерения скорости света наземных источников приобрела особую необходимость и важность в глазах молодых физиков.

Первым удалось справиться с ней в 1849 г. Арману Ипполиту Физо (1819—1896). В принципиальном отношении опыт Физо был подобен опыту Галилея. Физо смонтировал установку, в которой луч света проходил в щели между соседними зубцами колеса, вращающегося с большой скоростью, и попадал по нормали на плоское зеркало, находящееся на расстоянии 8633 м. Отраженный луч шел обратно по направлению падающего луча. Если зубчатка была неподвижна, то отраженный луч проходил обратно через ту же щель, через которую он прошел в прямом направлении, и наблюдателю зеркало представлялось освещенным. Если же зубчатка достаточно быстро вращалась, то за время, необходимое свету для прохождения от зубчатки до зеркала и обратно, на место щели перемещался зубец, преграждавший путь отраженному лучу, так что поле зрения казалось наблюдателю темным. Если скорость вращения зубчатки еще больше возрастала, так что отраженный луч попадал уже в следующую щель, то поле зрения вновь становилось светлым. Физо получил для скорости света значение 313 274 304 м/сек.

Эти опыты были повторены Альфредом Корню (1841—1902), который в качестве среднего из 1000 опытов дал в 1873 г. значение 298 400 км1сек с возможной ошибкой в 1/300. В усовершенствованном виде этот метод был применен в 1882 г. Джемсом Юнгом (1811—1883) и Джорджем Форбсом, а в 1928 г. А. Каролюсом и О. Миттелыптедтом, заменившими вращающуюся зубчатку ячейкой Керра, значительно более точным электрооптическим прибором, позволившим уменьшить расстояние до зеркала до нескольких метров. В таком виде опыты были снова повторены А. Хуттелем в 1940 г. и У. Андерсоном в 1941 г.

Однако прибор Физо не позволял измерять скорость света в различных средах. В 1834 г. для измерения длительности электрической искры Уитстон ввел вращающееся зеркало и сразу же стал думать о возможности его применения для измерения скорости света. Однако здесь ему не удалось добиться успеха. Его проект был подхвачен Араго, предложившим очень сложный опыт, о котором мы упоминали в начале параграфа. Физо и Леон Фуко (1810—1868) взялись упростить его и практически осуществить. Сначала они работали вместе, но потом разделились, вступив в соревнование, кто быстрее достигнет цели. Это удалось сделать в 1850 г. Фуко, применившему приспособление, описываемое во всех учебниках физики.

Суть опыта заключается в следующем. Время, необходимое для прямого и обратного прохождения светом расстояния между двумя зеркалами, одно из которых быстро вращается, определялось по углу поворота зеркала за это время, который оценивался по отклонению светового луча после его отражения от вращающегося зеркала. Для определения числа оборотов вращающегося зеркала в секунду Фуко применил (по-видимому, впервые в физических исследованиях) стробоскопический метод, т. е. метод кажущегося замедления периодического движения, позволяющий удобно проводить наблюдение. Помещая между обоими зеркалами, находящимися одно от другого на расстоянии нескольких метров, различные вещества, отличные от воздуха, можно было определить скорость света в них.

Опыты, проведенные Фуко в 1850 г., позволяли лишь сравнивать значения скоростей света. Поместив трубу с водой между двумя зеркалами, он показал, что скорость света в воде составляет 3/4 скорости света в воздухе. К тому же результату пришел несколько позже Физо, поставивший опыт совместно с Луи Бреге (1804—1883). В 1862 г. Фуко, отвлекшись от других исследований, вновь предпринял измерение скорости света и нашел ее равной 298 000 км/сек с максимальной ошибкой ±500 км/сек.

Измерения скорости света повторялись с последующими улучшениями методики Фуко Симоном Ньюкомбом (1835—1909) в 1881—1882 гг., Альбертом Майкельсоном в период 1878—1882 гг. и еще раз в 1924—1926 гг. и У. Андерсоном в 1937 г. Измерения Андерсона дают для скорости света значение 299 764 км/час с возможной ошибкой 15 км/сек. Все приведенные значения относятся к распространению света в пустоте.

Наземные измерения систематически дают для скорости света значение больше полученного с помощью астрономических методов; причина этого неизвестна.

Все эти измерения согласуются также в том, что в более преломляющих средах скорость света оказывается меньшей. Но эти измерения вскрыли еще одну важную особенность: показатель преломления среды не равен точно отношению скоростей света в пустоте и в рассматриваемой среде, как того требует теория Френеля, причем наблюдаемое отклонение намного превышает величину ошибки эксперимента. Это расхождение в 1881 г. объяснил Рэлей, который ввел понятия "фазовой скорости", т. е. (не наблюдаемой указанными методами) скорости строго монохроматической волны, и "групповой скорости"— скорости гребня волны, получающегося в результате наложения большого числа монохроматических волн. В диспергирующей среде групповая скорость, которая как раз и измеряется в описанных опытах, не совпадает с фазовой.

В 1850 г. опыты Физо и Фуко представлялись решающим триумфом волновой теории. Карло Маттеуччи, один из крупнейших итальянских физиков того времени, в том же году писал: "Прямое экспериментальное доказательство уменьшения скорости света в более плотных средах, о котором мы только что говорили, полностью отвергает ньютоновскую гипотезу и великолепно подтверждает справедливость волновой".

Однако физические теории никогда не бывают окончательными. Теория Френеля спокойно просуществовала еще около двадцати лет, после чего начались всякие неприятности.

Неподвижен ли эфир илиже он увлекается при движении тел?

Гипотеза упругих колебаний эфира сразу ставила проблему: неподвижен эфир или же движется? В частности, движется ли эфир, сконцентрированный в теле, вместе с этим телом? Прекрасные опыты Араго доказали, что движение Земли не оказывает никакого ощутимого воздействия на преломление света, приходящего от звезд.

Этот результат был несовместим с корпускулярной теорией, поэтому Араго обратился к Френелю с вопросом, укладывается ли он в рамки волновой теории. В одном из своих писем 1817 г. Френель ответил, что этот результат легко объясняется волновой теорией, как и явление аберрации, если только принять частичное увлечение эфира, т. е. принять, что движущееся тело увлекает с собой не весь содержащийся в нем эфир, а лишь избыточную часть эфира по сравнению с равным объемом пустого пространства. С помощью этой гипотезы Френелю удалось объяснить все явления, проистекающие из-за быстрого движения преломляющего тела.

Влияние движения тел, испускающих свет или звук, было исследовано теоретически в 1842 г. австрийским физиком Христианом Допплером (1803—1853), который показал, что при приближении источника света к наблюдателю период колебаний представляется наблюдателю меньшим, чем при неподвижном источнике, т. е. цвет излучения смещается в сторону ультрафиолета. Если же источник удаляется от наблюдателя, то цвет смещается в красную сторону спектра. Аналогично если источник звука приближается к наблюдателю, то звук воспринимается более высоким, а если удаляется — более низким; в этом явлении теперь легко убедиться, наблюдая изменение высоты звука гудка паровоза, проходящего мимо наблюдателя. В 1848 г. Физо предложил воспользоваться этим явлением, получившим название эффекта Допплера, или эффекта Допплера — Физо, для измерения радиальной составляющей скорости звезд по смещению их спектральных линий.

Уже сам Допплер заметил, что этот же метод можно применить для измерения скоростей двойных звезд; однако это измерение никому не удавалось провести, в том числе и Максвеллу. Применение допплеровского метода в астрофизике стало возможным лишь после появления в 1860 г. призмы прямого зрения, которую предложил астроном Джован Баттиста Амичи (1786—1863), известный конструктор оптических инструментов большой точности. Помимо этой призмы, как известно из учебников физики, он ввел в употребление еще другую призму (полного внутреннего отражения), названную в его честь, усовершенствовал микроскоп и предложил идею иммерсионного микроскопа. Призма прямого зрения Амичи состоит из призмы из флинтгласа, расположенной между двумя призмами из кронгласа; она дает спектр в направлении падающего луча.

В 1869 г. Фридриху Цолльнеру (1834—1882) пришла в голову счастливая идея применить пару противоположно расположенных призм прямого зрения Амичи, чтобы получить два противоположных спектра. Таким образом был создан так называемый реверсионный спектроскоп, который позволял уже использовать эффект Допплера. С этого момента значение эффекта Допплера в астрофизике чрезвычайно возросло.

Эффект Допплера тоже как будто подтверждал идею Френеля о частичном увлечении эфира; тем не менее, эту гипотезу оспаривал Джордж Габриэль Стоке (1819 —1903), один из наиболее блестящих продолжателей дела Френеля, известный прежде всего открытием в 1852 г. явления флюоресценции и закона, определяющего флюоресценцию, который и сейчас называется "законом Стокса". В известной работе, относящейся к 1845 г., Стоке отстаивает идею о полном увлечении эфира, находящегося в непосредственной близости от Земли, которое переходит постепенно в частичное увлечение, все более уменьшающееся по мере удаления от Земли.

В 1851 г. Физо пытался решить этот вопрос, заставив интерферировать два луча света, один из которых проходил столб воды в направлении ее течения, а второй — против течения. Если эфир увлекается при движении воды, то интерференционные полосы должны сместиться по отношению к тому положению, которое они занимают в опыте с неподвижной водой. Экспериментальные результаты, полученные Физо, подтвердили гипотезу Френеля. К тому же выводу привели исследования Эдуарда Кеттелера (1836 —1900), проведенные в 1871 г., и исследования Майкельсона и Морли в 1886 г.

Но еще пятью годами раньше Майкельсон в своем ставшем впоследствии знаменитом опыте пытался экспериментально обнаружить движение Земли относительно эфира, принимаемого за неподвижный, т. е. обнаружить так называемый "эфирный ветер".

Примененный Майкельсоном метод можно назвать "методом двух путей": один луч света, падая на слегка посеребренную пластину, расщеплялся на два взаимно перпендикулярных луча; эти лучи отражались по нормали от двух зеркал, расположенных на одинаковом расстоянии от пластины, возвращались обратно по тому же пути, сливались вместе и направлялись в оптическую систему. Если Земля движется относительно эфира, то из-за различия времен, требуемых для прохождения обоими лучами своих взаимно перпендикулярных путей, должна наблюдаться интерференционная картина. Хотя линейная скорость обращения Земли вокруг Солнца (30 км/сек) довольно мала по сравнению со скоростью света, экспериментальная установка была способна обнаружить даже в 100 раз меньший эффект. Этот опыт, многократно повторенный для различной ориентации прибора и в разное время года, давал у Майкельсона все время чисто отрицательный результат. Критика этого опыта со стороны Лоренца привела к тому, что Майкельсон вновь повторил его в 1887 г. вместе с Эдуардом Уильямом Морли (1838—1923) — и с тем же результатом. Таким образом, Майкельсон мог утверждать, что, согласно его опытам, эфир движется вместе с Землей. Однако явление аберрации света указывает на то, что эфир неподвижен. Эти два вывода резко противоположны один другому. Далее мы увидим, как это противоречие привело к появлению теории относительности.

Опыты Майкельсона были повторены с некоторыми усовершенствованиями Морли и Миллером в 1904 г. с тем же результатом. Позже, с 1921 по 1925 г., Миллер производил непрерывные наблюдения, которые привели его к выводу, что Земля движется по отношению к эфиру со скоростью 9 км/час. Однако этот вывод был опровергнут последующими опытами Джозефа Кеннеди и многими другими, вплоть до нового опыта Майкельсона, проведенного совместно с Пизом и Пирсоном в 1929 г.

**Невидимые излучения**

В первое тридцатилетие XIX века исследования поляризации и природы света оттеснили на второй план другие важные открытия в области световых явлений.

Тот факт, что световые лучи связаны с тепловыми лучами, ясный из непосредственного наблюдения, был известен, конечно, еще со времен античности. Само применение слова "фокус" к вогнутым зеркалам и к линзам показывает, что здесь внимание обращалось больше на концентрацию тепловых лучей, а не световых. Но различение световых и тепловых лучей мы встречаем впервые, по-видимому, в "Magia naturalise ("Натуральная магия") Порты (1589 г.), где выражается удивление, почему вогнутое зеркало концентрирует не только тепло, но и холод. Это наблюдение было предметом тщательного экспериментального исследования Академии опытов, причем было замечено ощутимое охлаждение в фокусе вогнутого зеркала, перед которым помещен большой кусок льда. А Паоло дель Буоно (1625 — 1659), корреспондент этой же Академии, заметил, что лучи, проходящие через линзу изо льда, фактически не теряют своей тепловой способности. Еще более ясно различие между световыми и тепловыми лучами выявил Мариотт, который с помощью вогнутого зеркала изо льда показал, что тепловые лучи отражаются от него без ослабления, так что в фокусе удается создать интенсивность, достаточную для того, чтобы воспламенить порох. В 1777 г. Ламберт показал, что тепловые лучи, как и световые, распространяются прямолинейно.

В 1800 г. Вильгельм Гершель произвел фундаментальное открытие. Желая проверить, действительно ли тепло, как принято было считать, распределено равномерно по солнечному спектру, Гершель перемещал чувствительный термометр вдоль солнечного спектра и обнаружил, что показываемая им температура не только непрерывно повышалась при перемещении от ультрафиолетового конца спектра к красному, но ее максимум вообще достигался в области, лежащей за красной частью спектра, т. е. там, где глаз ничего не различает. Вот пример того, насколько "в естествознании полезно сомневаться в общепринятых вещах",— замечает по этому поводу Гершель. Он тут же объясняет это явление невидимым тепловым излучением, исходящим из Солнца и отклоняемым призмой слабее красного цвета, почему оно и получило название "инфракрасного излучения". Затем Гершель исследовал это невидимое излучение, испускаемое земным источником, представлявшим собой железный цилиндр, нагретый, но не светящийся, и показал преломление этого излучения в линзах.

Юнг понимал важность открытия Гершеля и в своих лекциях в 1807 г. назвал его самым крупным открытием со времен Ньютона. Правда, Джон Лесли (1766—1832), весьма аккуратный экспериментатор, пытался объяснить опыты Гершеля воздушными течениями, однако его теоретические возражения не нашли сторонников. Более удачными были его экспериментальные исследования (1804 г.), и сейчас еще приводимые в курсах физики. С помощью дифференциального термометра, носящего его имя, но описанного еще в 1685 г. Иоганном Христофором Штурмом (1635—1703), и с помощью своего "куба", одни грани которого были зачерненными, а другие зеркальными, Лесли показал, что испускание и поглощение телом теплового излучения зависят от характера его поверхности.

За несколько лет до работ Лесли немецкий физик Иоганн Риттер (1776 — 1810) сделал другое открытие, "симметричное" открытию Гершеля и столь же важное. Повторив в 1802 г. опыты Гершеля, он задался целью исследовать химическое действие различных участков светового спектра. Для этого он применял хлористое серебро, почернение которого под действием световых лучей было обнаружено Иоганном Генрихом Шульце (1687—1744) еще в 1727 г., и установил, что химическое действие излучения возрастает постепенно по спектру от красного конца к фиолетовому и достигает максимума за фиолетовой областью, там, где глаз уже не воспринимает никакого света. Таким образом было найдено в спектре новое излучение, присутствующее в солнечном свете и преломляемое призмой сильнее, чем фиолетовое, в связи с чем оно и получило название "ультрафиолетового излучения". Томас Юнг с большей точностью повторил опыты Риттера и произвел также измерения интенсивности, а Уильям Волластон (1766—1828) подтвердил полученные Юнгом результаты в опытах с раствором гуммигута, который под действием света меняет свой цвет с желтого на зеленый.

За этим последовали работы многих других физиков, в том числе де Соссюра и Пикте, Гей-Люссака и Тенара, Зеебека и Берара, каждый из которых внес свой вклад в исследование этого явления. Эти исследования привели также к одному важному применению — фотографии, играющей столь большую роль и для самой физики. Мы не можем здесь, однако, останавливаться на истории фотографии. Достаточно лишь упомянуть, что в 1839 г. Луи Дагерр (1789—1851) сообщил об изобретенном им процессе, названном "дагерротипией", являющемся усовершенствованием метода получения фотографических изображений на металле, предложенного в 1827 г. Жозефом Ньепсом (1765—1833), сотрудником которого был Дагерр. В 1840 г. Дрейпер сфотографировал Луну, а в 1842 г. — линии Фраунгофера; в том же году Алессандро Майокки (1795—1854) сфотографировал Солнце.

Фундаментальный вклад в эти исследования внес Мачедонио Меллони (1798—1854). Меллони, один из крупнейших итальянских экспериментаторов, занялся исследованием "лучистого тепла" с помощью инструмента, значительно более чувствительного, чем бывшие тогда в употреблении обычные термометры. Он применял "термо-мультипликаторы", состоящие из термоэлектрического столбика, связанного с гальванометром Нобили, чувствительным элементом экспериментального приспособления, известного сейчас как оптическая скамья Меллони. При поддержке Араго Меллони провел свои главные опыты в Париже, где вынужден был искать политического убежища с 1831 по 1839 г., ибо оказывал помощь парижским студентам, принявшим участив в революции 1830 г.

После анализа результатов, полученных в области исследования лучистого тепла предшествующими физиками, и исправления некоторых из них Меллони начинает самостоятельные исследования с изучения поглощения лучистого тепла различными телами и обнаруживает, что каменная соль весьма прозрачна для тепла, так что особенно подходит для изготовления призм и линз, предназначенных для исследования инфракрасного излучения. Меллони показал различную преломляемость тепловых лучей, которая до того отрицалась, и "химических", т. е. ультрафиолетовых лучей; он доказал, что лучистое тепло поляризовано, и с помощью остроумного опыта, приписываемого теперь Тиндалю, показал, что интенсивность лучистого тепла убывает обратно пропорционально квадрату расстояния.

Еще в 1833 г. Карло Маттеуччи показал, что тепловые лучи интерферируют между собой, а вслед за ним Форбс (1809—1868) подтвердил интерференцию тепловых лучей на приборе с двумя зеркалами Френеля. Большое значение имеет работа Меллони, вышедшая в Неаполе в 1842 г., куда он был приглашен в Школу искусств и ремесел (должность эту он был вынужден оставить в 1848 г. тоже по политическим соображениям).

В этой небольшой работе (всего 47 страниц) он разъясняет понятия лучистого тепла, света и химических лучей (ультрафиолета) как сходных явлений излучения, различающихся лишь длиной волны. Это было одним из крупнейших достижений науки того времени и существенным стимулом к выработке единых теорий, характерных для прогресса физики в XIX веке. В своей новой работе, вышедшей годом позже, Меллони показал, что поглощение инфракрасного излучения происходит так же, как и поглощение видимого излучения, и подобно тому, как при определенной толщине тела бывают прозрачны или непрозрачны для света, так и для тепла они бывают "теплопрозрачны" и "теплонепроницаемы". Как и свет, тепло может испытывать избирательное поглощение в телах, так что оптически прозрачное тело не всегда "теплопрозрачно", как, например, стекло, которое слабо поглощает свет и сильно поглощает тепло. Все эти явления, а также различная преломляемость тепловых лучей позволили Меллони говорить в фигуральном смысле о "тепловых цветах". В 1845 г. Меллони показал, что тепловое излучение — это не чисто поверхностное явление, в нем участвуют и внутренние слои излучающего тела.

В своей работе "La thermocrose ou la coloration calorique" ("О тепловых цветах"), опубликованной в Неаполе в 1850 г. (и переизданной в 1954 г. в Болонье в его собрании сочинений), Меллони дает захватывающее по форме цельное изложение своей теории лучистого тепла и своих классических экспериментов. После введения, носящего автобиографический характер, Меллони описывает сначала приборы для измерения лучистого тепла и источники теплового излучения, потом переходит к экспериментальным исследованиям теплового излучения в пустоте и в воздухе, а затем — к распространению лучистого тепла в различных веществах.

В этой классической работе было положено начало исследованию излучательной и поглощающей способности различных тел (и в частности, сажи, что привело к понятию черного тела) и показано, что законы, которым подчиняются классические явления оптики, совпадают с законами, определяющими аналогичные явления в области теплового излучения. Исследования Меллони были продолжены Джоном Тиндалем (1820—1893), в частности в области поглощения в газах. Тиндаль показал, что сухой воздух плохо поглощает тепловые лучи, и после долгой полемики с Генрихом Густавом Магнусом (1802—1870) продемонстрировал в 1881 г. сильное поглощение тепловых лучей водяным паром, что имеет, конечно, большое значение для метеорологии.

Так же как применение термоэлектрической батареи обусловило возможность фундаментальных открытий Меллони, применение нового чувствительного термометра — болометра — сделало возможным дальнейшее продвижение в исследовании лучистой энергии. Этот новый прибор был описан в 1881 г. американским физиком Самюэлем Ленгли (1834—1906). Тончайшая полоска платины, покрытой сажей, служащая термочувствительным элементом, является частью электрического контура. Если на полоску падает излучение, то ее температура меняется, и вследствие этого меняется электрическое сопротивление; по изменению сопротивления можно судить об изменении температуры. Болометр — исключительно чувствительный прибор, позволяющий установить изменения температуры с чрезвычайно высокой точностью. Этот новый прибор позволил Ленгли сделать ряд открытий. Он показал, что максимум излучения солнечного спектра находится в области оранжевого цвета, а не инфракрасного, как думали раньше; что инфракрасное излучение сравнительно легко проходит сквозь атмосферу; что количество энергии, необходимое для того, чтобы вызвать видимый эффект, очень сильно зависит от цвета. Наконец, Ленгли измерил для наземных источников очень большие длины волн излучения вплоть до 0,05 мм.