**Спектральный анализ**

Марио Льоцци

Большой вклад в исследование дисперсии и создание ахроматических линз, начатое еще Доллондом, внес Йозеф Фраунгофер (1787—1826), в ком редкое искусство экспериментатора дополнялось незаурядными способностями теоретика. В своем предисловии к собранию сочинений Фраунгофера Э. Ломмель так подытоживал его вклад в практическую оптику: "Благодаря введению своих новых и усовершенствованных методов, механизмов и измерительных инструментов для вращения и полировки линз... ему удалось получить достаточно большие образцы флинтгласа и кронгласа без всяких прожилок. Особенно большое значение имел найденный им метод точного определения формы линз, который совершенно изменил направление развития практической оптики и довел ахроматический телескоп до такого совершенства, о котором раньше нельзя было и мечтать".

Чтобы произвести точные измерения дисперсии света в призмах, Фраунгофер в качестве источника света использовал свечу или лампу. При этом он обнаружил в спектре яркую желтую линию, известную теперь как желтая линия натрия. Вскоре установили, что эта линия находится всегда в одном и том же месте спектра, так что ее очень удобно использовать для точного измерения показателей преломления. После этого, говорит Фраунгофер в своей первой работе 1815 г.,"...я решил выяснить, можно ли видеть подобную светящуюся линию в солнечном спектре. И я с помощью телескопа обнаружил не одну линию, а чрезвычайно большое количество вертикальных линий, резких и слабых, которые, однако, оказались темнее остальной части спектра, а некоторые из них казались почти совершенно черными".

Линии в солнечном спектре были обнаружены еще в 1802 г. Уолластоном, наблюдавшим непосредственно через призму щель в камере-обскуре, сильно освещенную солнечными лучами. Уолластон заметил семь таких линий, из которых пять особенно отчетливых, и, приняв их за линии, разделяющие цвета спектра, больше о них не думал.

Фраунгофер открыл сотни таких линий и внимательно их исследовал. Наиболее резко выраженные линии он обозначил большими и малыми буквами латинского алфавита (А, В,..,Z, а, b,...) и зафиксировал их постоянное положение в спектре, ясно понимая их значение для измерения показателей преломления. Он установил, что линия D солнечного спектра находится в том же положении, что и яркая линия натрия в спектре лампы. Его спектроскоп состоял из коллиматора, призмы и зрительной трубы, т. е. по существу из тех же элементов, что и современные спектроскопы. Фраунгофер направил спектроскоп на Венеру и обнаружил, что свет этой планеты содержит те же темные линии, что и солнечный спектр. Исследование спектра электрических искр позволило обнаружить большое число ярких линий.

Заслугой Фраунгофера является введение решеток для исследования спектров. Решетки применялись еще более 100 лет назад Клодом Дешалем (1621 —1678), повторившим опыты Гримальди с полированными металлическими пластинами, на которые Дешаль нанес серию близко расположенных параллельных полос. Если тонкий пучок света направить в темной камера на такую пластинку, то он образует спектр на белом экране. Такой же результат был получен и со штрихованной стеклянной пластинкой. Фраунгофер изготовлял решетки из тончайших близко расположенных параллельных нитей или же наносил на стеклянной пластинке параллельные штрихи алмазом. Изготовление решетки требует большого искусства, потому что для получения спектра необходимо по крайней мере 40 линий на миллиметре поверхности. Фраунгоферу удалось изготовить решетки, содержащие свыше 300 линий на миллиметре. Этот результат был далеко превзойден в 1883 г. американским физиком Генри Роулендом (1848—1901), изготовившим решетки с 800 штрихами на миллиметре; в настоящее время изготовляют решетки, содержащие даже 1700 штрихов на миллиметре.

Решетки были предметом теоретического исследования Оттавиано Фабрицио Моссотти (1791—1863), крупнейшего представителя математической физики в Италии в первой половине XIX века. Моссотти указал на удобство применения решеток для легкого и точного определения длин волн. Именно для этого, как известно, они применяются сейчас наряду с получением чистого спектра, называемого также нормальным, в котором фиолетовый цвет менее отклонен, чем красный, в противоположность спектру, создаваемому призмой.

Опыты Фраунгофера по исследованию спектров испускания были продолжены в Англии Брюстером, Джоном Гершелем и Фоксом Тальботом (1800—1877). В 1834 г. после многочисленных опытов с пламенем спирта, в котором были растворены различные соли, Тальбот пришел к такому выводу:"Когда в спектре пламени появляются какие-нибудь определенные линии,, они характеризуют металл, содержащийся в пламени".

А в следующем году Чарльз Уитстон (1802—1875), исследуя спектр электрической искры, пришел к заключению, что линии спектра зависят лишь от материала электродов и не зависят от газа, в котором проскакивает искра. В 1855 г. Андерс Ангстрем (1814—1874) показал, однако, что, понижая давление газа, можно исключить влияние электродов и получить чистый спектр газа. Удачное содружество конструктора физических приборов Генриха Гейслера (1814—1879) и немецкого физика и математика Юлиуса Плюк-кера (1801—1868) привело к почти одновременному появлению (1855 г.) трубок Гейслера и трубок Плюккера, весьма удобных для изучения спектра газов.

Несколькими годами раньше Уильям Аллен Миллер (1817—1870), продолжая опыты, начатые Гершелем, исследовал спектр солнечных лучей после их прохождения через различные газы (пары йода, брома и др.) и наблюдал в спектре темные линии, откуда заключил (1845 г.), что наблюдаемые линии — это линии поглощения и соответствуют они только окрашенным, а не бесцветным парам. Этот вывод противоречил утверждению французского астронома Пьера Жансена (1824—1907), известного своими астрофизическими исследованиями, который нашел линии поглощения и в опытах с водяным паром. По поводу интерпретации этих линий развернулась долгая дискуссия, закончившаяся, в конце концов, признанием того, что это действительно линии поглощения.

Впервые связь между линиями поглощения и линиями испускания была явно показана в 1849 г. Фуко, который наблюдал в спектре электрической дуги между угольными электродами многочисленные яркие линии, среди которых особенно выделялась линия D натрия. Но, пропустив сквозь дугу интенсивный пучок солнечного излучения и наблюдая его спектр, он заметил, что линия D стала темной. Отсюда он заключил, что дуга, испускающая линию D, поглощает ее, когда излучение исходит из другого источника. Это интересное наблюдение не было, однако, развито.

Истинными основателями спектрального анализа были немецкие ученые Густав Кирхгоф (1824—1887) и Роберт Бунзен (1811—1899). Многочисленные претензии других авторов на приоритет, выдвинутые вскоре после того, как выяснилась важность этого открытия, следует считать необоснованными.

Экспериментальным работам Кирхгофа и Бунзена, проведенным с 1859 по 1862 г., весьма способствовало появление скромного приспособления — "горелки Бунзена", описанной Бунзеном и англичанином Генри Роско (1833—1915) в 1857 г. в связи с началом их фотохимических исследований. Новая горелка давала высокотемпературное несветящееся пламя, что позволяло переводить в парообразное состояние различные химические вещества и наблюдать их спектры, не осложненные собственными линиями пламени (во многих случаях эти линии приводили к ошибочным выводам в предшествующих экспериментах). В 1859 г. Кирхгоф и Бунзен опубликовали свою первую экспериментальную работу, а в следующем году Кирхгоф пришел к выводу, подтвержденному также и термодинамическими соображениями, что все газы поглощают в точности те же длины волн, которые они способны излучать. Этот закон называют сейчас законом "инверсии спектра" или законом Кирхгофа. Чуть дальше мы встретимся с применением этого закона в проблеме излучения абсолютно черного тела.

Кирхгоф и Бунзен, кроме того, на основании своих и чужих экспериментов достаточно уверенно установили справедливость идеи Тальбота, что каждая светлая линия в спектре излучения характерна для излучающего ее элемента. Вооруженные этими двумя закономерностями, они приступили к спектральному анализу земных источников излучения, что привело их в 1861 г. к открытию рубидия и цезия — двух металлов, названных ими так по характерным для них красной и голубой линиям спектра, позволившим их открыть. В том же году Крукс открыл таллий, в 1865 г. Райх и Рихлер открыли индий, и т. д.

После того как Кирхгоф применил спектральный анализ к свету земных источников, он объяснил остававшиеся до того непонятными линии Фраун-гофера как линии поглощения солнечной атмосферы (а также земной, влияние которой легко, однако, отличить), что явилось важной вехой в истории физики, особенно астрофизики. В 1888 г. Гельмгольц писал, что это открытие вызвало восхищение всех людей и возбудило их фантазию в большей мере, чем какое-либо другое открытие, потому что оно позволило заглянуть в миры, представлявшиеся нам совершенно недоступными.

Как известно, ученые действительно "заглянули" в эти миры, сопоставив линии поглощения в спектрах света, приходящего от звезд, с яркими линиями излучения элементов, известных на Земле, с тем, чтобы установить, из каких элементов состоит атмосфера звезд. Такое сопоставление позволило уже Кирхгофу утверждать, что в солнечной атмосфере присутствуют натрий, железо, магний, медь, цинк, бор, никель. Общий вывод, к которому привели многочисленные последующие наблюдения, заключается в том, что элементы, существующие на Земле, распространены повсюду. Иными словами, вся Вселенная построена из одних и тех же материалов.

После Кирхгофа и Бунзена физики в результате огромной экспериментальной работы установили спектры всех известных элементов, измерив длины волн линий и их относительные интенсивности. Картина, которую представляет собой спектр какого-либо элемента, скажем железа или неона, по своему богатству, сложности, разнообразию, интенсивности, цветовой игре не менее величественна, нежели звездное небо. Как и звезды, линии кажутся распределенными беспорядочно. И так же как астрономы каталогизируют тысячи звезд, давая каждой из них описание, необходимое, чтобы ее отличить и характеризовать, так и спектроскописты каталогизируют линии, характеризуя каждую длиной волны, интенсивностью и экспериментальными условиями, при которых она наблюдается. Применение спектрального анализа практически ограничивается сложностью и разнообразием спектров, которые еще более возросли после того, как в конце прошлого столетия было впервые обнаружено, что многие спектральные линии в сильных спектроскопах расщепляются на большое число расположенных рядом отдельных линий, образующих в своей совокупности "тонкую структуру" спектра.