

Глава 4

ИЗЛУЧЕНИЯ И СПЕКТРЫ

До сих пор мы рассматривали распространение световых волн. Теперь познакомимся с излучением света телами.

§ 4.1. ВИДЫ ИЗЛУЧЕНИЙ. ИСТОЧНИКИ СВЕТА

С источниками света вы знакомились ранее. Сейчас мы можем не только перечислить источники, но и рассказать, на каких физических принципах основано их действие и какие виды излучений они создают.

Свет — это электромагнитные волны с длиной волны $4 \cdot 10^{-7} — 8 \cdot 10^{-7}$ м. Электромагнитные волны излучаются при ускоренном движении заряженных частиц. Эти заряженные частицы входят в состав атомов, из которых состоит вещество. Но, не зная, как устроен атом, ничего достоверного о механизме излучения сказать нельзя. Ясно лишь, что внутри атома нет света так же, как в струне рояля нет звука. Подобно струне, начинающей звучать лишь после удара молоточка, атомы рожают свет только после их возбуждения.

Для того чтобы атом начал излучать, ему необходимо передать определенную энергию. Излучая, атом теряет полученную энергию, и для непрерывного свечения вещества необходим приток энергии к его атомам извне.

Тепловое излучение

Наиболее простой и распространенный вид излучения — это тепловое излучение, при котором потери атомами энергии на излучение света компенсируется за счет энергии теплового движения атомов (или молекул) излучающего тела. Чем выше температура тела, тем быстрее движутся атомы. При столкновении быстрых атомов (или молекул) друг с другом часть их кинетической энергии превращается в энергию возбуждения атомов, которые затем излучают свет.

Излучение Солнца — это *тепловое излучение*. Тепловым источником света является также обычная лампа накаливания. Лампа — очень удобный, но малоэкономичный источник. Лишь около 12% всей энергии, выделяемой в нити лампы электрическим током, преобразуется в световую энергию. Наконец, тепловым источником света является пламя. Крупинки сажи (не успевшие сгореть частицы топлива) раскаляются за счет энергии, выделяющейся при сгорании топлива, и испускают свет.

Электролюминесценция

Энергия, необходимая атомам для излучения света, может заимствоваться и из нетепловых источников. При разряде в газах электрическое поле сообщает электронам большую кинетическую энергию. Быстрые электроны испытывают неупругие соударения с атомами. Часть кинетической энергии электронов идет на возбуждение атомов. Возбужденные атомы отдают энергию в виде световых волн. Благодаря этому разряд в газе сопровождается свечением. Это *электролюминесценция**.

Северное сияние есть проявление электролюминесценции. Потоки заряженных частиц, испускаемых Солнцем, захватываются магнитным полем Земли. Они возбуждают у магнитных полюсов Земли атомы верхних слоев атмосферы, благодаря чему эти слои светятся. Электролюминесценция используется в трубках для рекламных надписей.

Катодолюминесценция

Свечение твердых тел, вызванное бомбардировкой их электронами, называют *катодолюминесценцией*. Благодаря катодолюминесценции светятся экраны электронно-лучевых трубок телевизоров.

* Люминесценция — от латинского слова *lumen* — свет и латинского *escent* — суффикс, означающий слабое действие.

Хемилюминесценция

При некоторых химических реакциях, идущих с выделением энергии, часть этой энергии непосредственно расходуется на излучение света. Источник света остается холодным (он имеет температуру окружающей среды). Это явление называется *хемилюминесценцией*. Почти каждый из вас, вероятно, знаком с ним. Летом в лесу можно ночью увидеть насекомое — светлячка. На теле у него «горит» маленький зеленый «фонарик». Вы не обожжете пальцев, поймав светлячка. Светящееся пятнышко на спинке светлячка имеет почти ту же температуру, что и окружающий воздух. Свойством светиться обладают и другие живые организмы: бактерии, насекомые, многие рыбы, обитающие на большой глубине. Часто светятся в темноте кусочки гниющего дерева.

Фотолюминесценция

Падающий на вещество свет частично отражается, а частично поглощается. Энергия поглощаемого света в большинстве случаев вызывает лишь нагревание тел. Однако некоторые тела сами начинают светиться непосредственно под действием падающего на него излучения. Это и есть *фотолюминесценция*. Свет возбуждает атомы вещества (увеличивает их внутреннюю энергию), и после этого они высвечиваются сами. Например, светящиеся краски, которыми покрывают многие елочные игрушки, излучают свет после их облучения.

Излучаемый при фотолюминесценции свет имеет, как правило, большую длину волны, чем свет, возбуждающий свечение. Это можно наблюдать экспериментально. Если направить на сосуд с флюоресцеином (органический краситель) световой пучок, пропущенный через фиолетовый светофильтр, то эта жидкость начинает светиться зелено-желтым светом, т. е. светом большей длины волны, чем у фиолетового света.

Явление фотолюминесценции широко используется в лампах дневного света. Русский физик Сергей Иванович Вавилов (1891—1951) предложил покрывать внутреннюю поверхность разрядной трубки веществами, способными ярко светиться под действием коротковолнового излучения газового разряда. Лампы дневного света примерно в три-четыре раза экономичнее обычных ламп накаливания.

§ 4.2. СПЕКТРЫ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ АППАРАТЫ

Расскажем о том, как исследуются излучения различных источников.

Распределение энергии в спектре

Ни один из источников не дает монохроматического света, т. е. света строго определенной длины волны. В этом нас убеждают опыты по разложению света в спектр с помощью призмы, а также опыты по интерференции и дифракции.

Энергия, которую несет с собой свет от источника, определенным образом распределена по волнам всех длин, входящих в состав светового пучка. Можно также сказать, что энергия распределена по частотам, так как между длиной волны и частотой существует простая связь:

$$\lambda\nu = c.$$

Плотность потока электромагнитного излучения или интенсивность $I = \frac{W}{S\Delta t}$ определяется энергией, приходящейся на все частоты. Для характеристики распределения излучения по частотам нужно ввести новую величину: интенсивность, приходящуюся на единичный интервал частот. Эту величину называют **спектральной плотностью интенсивности излучения**. Обозначим ее через $I(\nu)$. Тогда интенсивность излучения, приходящаяся на небольшой спектральный интервал $\Delta\nu$, равна $I(\nu)\Delta\nu$. Суммируя подобные выражения по всем частотам спектра, мы получим плотность потока излучения I .

Спектральную плотность потока излучения можно найти экспериментально. Для этого надо с помощью призмы получить спектр излучения, например электрической дуги, и измерить плотность потока излучения, приходящегося на небольшие спектральные интервалы шириной $\Delta\nu$.

Полагаться на глаз при оценке (даже приблизительной) распределения энергии нельзя. Глаз обладает избирательной чувствительностью к свету: максимум его чувствительности лежит в желто-зеленой области спектра (см. § 1.3). Лучше всего воспользоваться свойством очень черного тела почти полностью поглощать свет всех длин волн. При этом энергия излучения (т. е. света) вызывает нагревание тела. Поэтому достаточ-

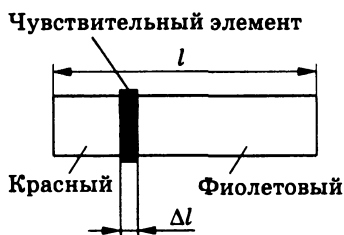


Рис. 4.1

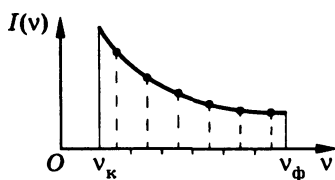


Рис. 4.2

но измерить температуру тела и по ней судить о количестве поглощенной в единицу времени энергии.

Обычный термометр имеет слишком малую чувствительность для того, чтобы его можно было с успехом использовать в таких опытах. Нужны более чувствительные приборы для измерения температуры. Можно взять электрический термометр сопротивления, в котором чувствительный элемент выполнен в виде тонкой металлической пластины. Эту пластину надо покрыть тонким слоем сажи, почти полностью поглощающей свет любой длины волны.

Чувствительную к нагреванию пластину прибора следует поместить в то или иное место спектра (рис. 4.1). Всему видимому спектру длиной l от красных лучей до фиолетовых соответствует интервал частот от ν_k до ν_ϕ . Ширине же Δl черной пластины соответствует малый интервал $\Delta\nu$. По нагреванию черной пластины прибора можно судить о плотности потока излучения, приходящегося на интервал частот $\Delta\nu$. Перемещая пластину вдоль спектра, мы обнаружим, что большая часть энергии приходится на красную часть спектра, а не на желто-зеленую, как кажется на глаз.

По результатам этих опытов можно построить кривую зависимости спектральной плотности излучения от частоты. Эта величина определяется по температуре пластины, а частоту нетрудно найти, если используемый для разложения света прибор проградуирован, т. е. если известно, какой частоте соответствует данный участок спектра.

Откладывая по оси абсцисс значения частот, соответствующих серединам интервалов $\Delta\nu$, а по оси ординат спектральную плотность интенсивности излучения, мы получим ряд точек, через которые можно провести плавную кривую (рис. 4.2). Эта кривая дает наглядное представление о распределении энергии в видимой части спектра электрической дуги.

Спектральные аппараты

Для точного исследования спектров такие простые приспособления, как узкая щель, ограничивающая световой пучок, и призма, уже недостаточны. Более совершенное устройство с применением призмы и одной линзы (см. рис. 2.4), предложенное Ньютоном, также не вполне удовлетворительно. Необходимы приборы, дающие четкий спектр, т. е. приборы, хорошо разделяющие волны различной длины и не допускающие (или почти не допускающие) перекрытия отдельных участков спектра. Такие приборы называют *спектральными аппаратами*. Чаще всего основной частью спектрального аппарата является призма или дифракционная решетка.

Рассмотрим схему устройства призмного спектрального аппарата (рис. 4.3). Исследуемое излучение поступает вначале

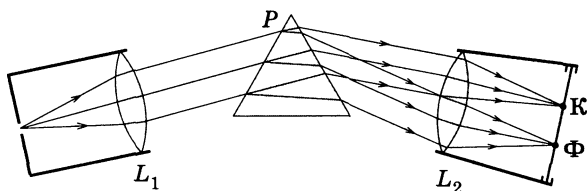


Рис. 4.3

в часть прибора, называемую *коллиматором*. Коллиматор представляет собой трубу, на одном конце которой имеется ширма с узкой щелью, а на другом — собирающая линза L_1 . Щель находится в фокальной плоскости линзы. Поэтому расходящийся световой пучок, попадающий на линзу из щели, выходит из нее параллельным пучком и падает на призму P .

Так как разным частотам соответствуют различные показатели преломления, то из призмы выходят параллельные пучки, не совпадающие по направлению. Они падают на линзу L_2 . В фокальной плоскости этой линзы располагается экран — матовое стекло или фотопластинка. Линза L_2 фокусирует параллельные пучки лучей на экране, и вместо одного изображения щели получается целый ряд изображений. Каждой частоте (точнее, узкому спектральному интервалу) соответствует свое изображение. Все эти изображения вместе и образуют спектр.

Описанный прибор называется *спектрографом*. Если вместо второй линзы и экрана используется зрительная труба для ви-

зуального наблюдения спектров, то прибор называется *спектроскопом*.

Призмы и другие детали спектральных аппаратов не обязательно изготавливаются из стекла. Вместо стекла применяются и такие прозрачные материалы, как кварц, каменная соль и др. Дело в том, что стекло, прозрачное для электромагнитных волн видимого спектра, сильно поглощает волны других длин.

§ 4.3. ВИДЫ СПЕКТРОВ

Спектральный состав излучения различных веществ весьма разнообразен. Но, несмотря на это, все спектры, как показывает опыт, можно разделить на три сильно отличающихся друг от друга типа.

Непрерывные спектры

Солнечный спектр или спектр дугового фонаря является непрерывным. Это означает, что в спектре представлены все длины волн. В спектре нет разрывов, и на экране спектрографа можно видеть сплошную разноцветную полосу (рис. III, 1 на форзаце).

Распределение энергии по частотам, т. е. спектральная плотность интенсивности излучения для различных тел, различно. Например, тело с очень черной поверхностью излучает электромагнитные волны всех частот, но кривая зависимости спектральной плотности от частоты имеет максимум при определенной частоте $\nu_{\max}$ (рис. 4.4). Энергия излучения, приходящаяся на очень малые ($\nu \rightarrow 0$) и очень большие ($\nu \rightarrow \infty$) частоты, ничтожно мала. При повышении температуры максимум спектральной плотности излучения смещается в сторону коротких волн.

Непрерывные (или сплошные) спектры, как показывает опыт, дают тела, находящиеся в твердом или жидком состоянии, а также плотные газы. Для получения непрерывного спектра нужно нагреть тело до высокой температуры.

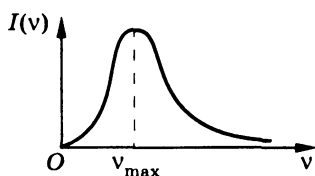


Рис. 4.4

Характер непрерывного спектра и сам факт его существования определяются не только свойствами отдельных излучающих атомов, но и в

сильной степени зависят от взаимодействия атомов друг с другом.

Непрерывный спектр дает также высокотемпературная плазма. Электромагнитные волны излучаются плазмой в основном при столкновении электронов с ионами.

Линейчатые спектры

Внесем в бледное пламя газовой горелки кусочек асбеста, смоченного раствором обыкновенной поваренной соли. При наблюдении пламени в спектроскоп на фоне едва различимого непрерывного спектра пламени вспыхнет яркая желтая линия (рис. III, 2 на форзаце). Эту желтую линию дают пары натрия, которые образуются при расщеплении молекул поваренной соли в пламени. На рисунке III, 3, 4 форзаца приведены также спектры водорода и гелия. Каждый из них — это частокол цветных линий различной яркости, разделенных широкими темными полосами. Такие спектры называются **линейчатыми**. Наличие линейчатого спектра означает, что вещество излучает свет только вполне определенных длин волн (точнее, в определенных очень узких спектральных интервалах). На рисунке 4.5 вы видите примерное распределение спектральной плотности интенсивности излучения в линейчатом спектре. Каждая линия имеет конечную ширину.

Линейчатые спектры дают все вещества в газообразном атомарном (но не молекулярном) состоянии. В этом случае свет излучают атомы, которые практически не взаимодействуют друг с другом. Это самый фундаментальный, основной тип спектров.

Изолированные атомы данного химического элемента излучают волны строго определенной длины.

Обычно для наблюдения линейчатых спектров используют свечение паров вещества в пламени или свечение газового разряда в трубке, наполненной исследуемым газом.

При увеличении плотности атомарного газа отдельные спектральные линии расширяются, и, наконец, при очень большой плотности газа, когда взаимодействие атомов становится существенным, эти линии перекрывают друг друга, образуя непрерывный спектр.

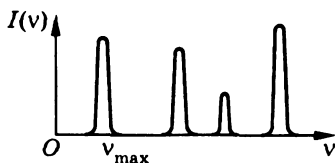


Рис. 4.5

Полосатые спектры

Полосатый спектр состоит из отдельных полос, разделенных темными промежутками. С помощью очень хорошего спектрального аппарата можно обнаружить, что каждая полоса представляет собой совокупность большого числа очень тесно расположенных линий.

В отличие от линейчатых спектров полосатые спектры создаются не атомами, а молекулами, не связанными или слабо связанными друг с другом.

Для наблюдения молекулярных спектров так же, как и для наблюдения линейчатых спектров, обычно используют свечение паров в пламени или свечение газового разряда.

Спектры поглощения

Все вещества, атомы которых находятся в возбужденном состоянии, излучают световые волны, энергия которых определенным образом распределена по длинам волн. Поглощение света веществом также зависит от длины волны. Так, красное стекло пропускает волны, соответствующие красному свету ($\lambda \approx 8 \cdot 10^{-5}$ см), и поглощает все остальные.

Если пропускать белый свет сквозь холодный, неизлучающий газ, то на фоне непрерывного спектра источника появляются темные линии (рис. III на форзаце, где изображены спектры поглощения водорода — 5 и гелия — 6). Газ поглощает наиболее интенсивно свет как раз тех длин волн, которые он испускает в сильно нагретом состоянии. Темные линии на фоне непрерывного спектра — это линии поглощения, образующие в совокупности спектр поглощения.

§ 4.4. СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Линейчатые спектры играют особо важную роль, потому что их характер прямо связан со строением атома. Ведь эти спектры создаются атомами, не испытывающими внешних воздействий. Поэтому, знакомясь с линейчатыми спектрами, мы тем самым делаем первый шаг к изучению строения атомов. Наблюдая эти спектры, ученые получили возможность «заглянуть» внутрь атома. Здесь оптика вплотную соприкасается с атомной физикой.

Главное свойство линейчатых спектров состоит в том, что *длины волн (или частоты) линейчатого спектра какого-либо вещества зависят только от свойств атомов этого вещества, но совершенно не зависят от способа возбуждения свечения атомов.* Атомы любого химического элемента дают спектр, не похожий на спектры всех других элементов: они способны излучать строго определенный набор длин волн.

На этом основан *спектральный анализ* — метод определения химического состава вещества по его спектру. Подобно отпечаткам пальцев у людей, линейчатые спектры имеют неповторимую индивидуальность. Неповторимость узоров на коже пальцев помогает часто найти преступника. Точно так же благодаря индивидуальности спектров имеется возможность определить химический состав вещества. Метод спектрального анализа был разработан в 1859 г. немецкими учеными Бунзеном (1811—1899) и Кирхгофом (1824—1887). С помощью спектрального анализа можно обнаружить данный элемент в составе сложного вещества, если даже его масса не превышает 10^{-10} г. Это очень чувствительный метод.

Количественный анализ состава вещества по его спектру затруднен, так как яркость спектральных линий зависит не только от массы вещества, но и от способа возбуждения свечения. Так, при не очень высоких температурах многие спектральные линии вообще не появляются. Однако при соблюдении стандартных условий возбуждения свечения можно проводить и количественный анализ.

В настоящее время определены спектры всех атомов и составлены таблицы спектров. С помощью спектрального анализа были открыты многие новые элементы: рубидий, цезий и др. Элементам часто давали названия в соответствии с цветом наиболее интенсивных линий спектра. Рубидий дает темно-красные, рубиновые линии. Слово *цезий* означает «небесно-голубой». Это цвет основных линий спектра цезия.

Именно с помощью спектрального анализа узнали химический состав Солнца и звезд. Другие методы анализа здесь вообще невозможны. Оказалось, что звезды состоят из тех же самых химических элементов, которые имеются и на Земле. Любопытно, что гелий первоначально открыли на Солнце и лишь затем нашли в атмосфере Земли. Название этого элемента напоминает об истории его открытия: слово *гелий* означает в переводе «солнечный».

Благодаря сравнительной простоте и универсальности спектральный анализ является основным методом контроля состава вещества в металлургии, машиностроении, атомной промышленности. С помощью спектрального анализа определяют химический состав руд и минералов.

Состав сложных, главным образом органических, смесей анализируется по их молекулярным спектрам.

Спектральный анализ можно производить не только по спектрам испускания, но и по спектрам поглощения. Именно линии поглощения в спектре Солнца и звезд позволяют исследовать химический состав этих небесных тел. Ярко светящаяся поверхность Солнца — фотосфера — дает непрерывный спектр. Солнечная атмосфера поглощает избирательно свет от фотосферы, что приводит к появлению линий поглощения на фоне непрерывного спектра фотосферы (рис. III, 7 на форзаце).

Но и сама атмосфера Солнца излучает свет. Во время солнечных затмений, когда солнечный диск закрыт Луной, происходит «обращение» линий спектра. На месте линий поглощения в солнечном спектре вспыхивают линии излучения.

В астрофизике под спектральным анализом понимают не только определение химического состава звезд, газовых облаков и т. д., но и нахождение по спектрам многих других физических характеристик этих объектов: температуры, давления, скорости движения, магнитной индукции.

§ 4.5. ИНФРАКРАСНОЕ И УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

Видимое излучение (свет) далеко не исчерпывает возможные виды излучений. С видимым излучением соседствует инфракрасное и ультрафиолетовое.

Инфракрасное излучение

Вернемся к опыту по исследованию распределения энергии в спектре электрической дуги, описанному в § 4.2. При перемещении черной пластинки — чувствительного элемента прибора — к красному концу спектра обнаруживается увеличение температуры. Если сдвинуть пластинку за красный конец спектра, где глаз уже не обнаруживает света, то нагревание пластинки оказывается еще большим. Электромагнитные волны, вызы-

вающие этот нагрев, называются **инфракрасными**. Их испускает любое нагретое тело даже в том случае, когда оно не светится. Например, нагретая печь или батареи отопления в квартире испускают инфракрасные волны, вызывающие заметное нагревание окружающих тел. Поэтому инфракрасные волны часто называют *тепловыми*.

Не воспринимаемые глазом инфракрасные волны имеют длины, превышающие длину волны красного света. Максимум энергии излучения электрической дуги и лампочки накаливания приходится на инфракрасные лучи.

Инфракрасное излучение применяют для сушки лакокрасочных покрытий, овощей, фруктов и т. д. Созданы приборы, в которых не видимое глазом инфракрасное изображение объекта преобразуется в видимое. Изготавливаются бинокли и оптические прицелы, позволяющие видеть в темноте.

Ультрафиолетовое излучение

За фиолетовым концом спектра прибор также обнаружит повышение температуры, но, правда, очень незначительное. Следовательно, существуют электромагнитные волны с длиной волны меньшей, чем у фиолетового света. Они называются **ультрафиолетовыми**.

Обнаружить ультрафиолетовое излучение можно с помощью экрана, покрытого люминесцирующим веществом. Экран начинает светиться в той части, на которую приходятся лучи, лежащие за фиолетовой областью спектра.

Ультрафиолетовое излучение отличается высокой химической активностью. Повышенную чувствительность к ультрафиолетовому излучению имеет фотоэмульсия. В этом можно убедиться, спроецировав спектр в затемненном помещении на фотобумагу. После проявления бумага почернеет за фиолетовым концом спектра сильнее, чем в области видимого спектра.

Ультрафиолетовые лучи не вызывают зрительных образов, они невидимы. Но действие их на сетчатку глаза и кожу велико и разрушительно. Ультрафиолетовое излучение Солнца недостаточно поглощается верхними слоями атмосферы. Поэтому высоко в горах нельзя оставаться длительное время без одежды и без темных стеклянных очков. Стеклянные очки, прозрачные для видимого спектра, защищают глаза от ультрафиолетового излучения, так как стекло сильно поглощает ультрафиолетовые лучи.

Впрочем, в малых дозах ультрафиолетовые лучи производят целебное действие. Умеренное пребывание на солнце полезно, особенно в юном возрасте; ультрафиолетовые лучи способствуют росту и укреплению организма. Кроме прямого действия на ткани кожи (образование защитного пигмента — загара, витамина D₂), ультрафиолетовые лучи оказывают влияние на центральную нервную систему, стимулируя ряд важных жизненных функций в организме.

Ультрафиолетовые лучи оказывают также бактерицидное действие. Они убивают болезнетворные бактерии и используются с этой целью в медицине.

§ 4.6. РЕНТГЕНОВСКИЕ ЛУЧИ

Может быть, и не все слышали об инфракрасных и ультрафиолетовых лучах, но о существовании рентгеновских лучей, конечно, знают все. Эти замечательные лучи проникают сквозь непрозрачные для обычного света тела.

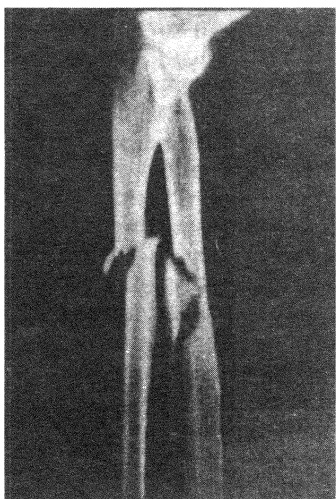


Рис. 4.6

Степень поглощения рентгеновских лучей пропорциональна плотности вещества. Поэтому с помощью рентгеновских лучей можно получать фотографии внутренних органов человека. На этих фотографиях хорошо различимы кости скелета (рис. 4.6) и места различных переломов мягких тканей.

В нашей стране раз в год все граждане должны пройти флюорографию. С помощью рентгеновских лучей делается снимок грудной клетки, чтобы выявить начало возможного заболевания до того, как человек начнет испытывать болезненные ощущения.

Открытие рентгеновских лучей

Рентгеновские лучи были открыты в 1895 г. немецким физиком Вильгельмом Рентгеном (1845—1923). Рентген умел наблюдать, умел замечать новое там, где многие ученые до него

не обнаруживали ничего примечательного. Этот особый дар помог ему сделать замечательное открытие.

В конце XIX в. всеобщее внимание физиков привлек газовый разряд при малом давлении. При этих условиях в газоразрядной трубке создавались потоки очень быстрых электронов. В то время их называли катодными лучами. Природа этих лучей еще не была с достоверностью установлена. Известно было лишь, что эти лучи берут начало на катоде трубки.

Занявшись исследованием катодных лучей, Рентген скоро заметил, что фотопластинка вблизи разрядной трубки оказывалась засвеченной даже в том случае, когда она была завернута в черную бумагу. После этого ему удалось наблюдать еще одно очень поразившее его явление. Бумажный экран, смоченный раствором платиносинеродистого бария, начинал светиться, если им обертывалась разрядная трубка. Причем, когда Рентген держал руку между трубкой и экраном, то на экране были видны темные тени костей на фоне более светлых очертаний всей кисти руки.

Ученый понял, что при работе разрядной трубки возникает какое-то неизвестное ранее сильно проникающее излучение. Он назвал его *X*-лучами. Впоследствии за этим излучением прочно укрепился термин «рентгеновские лучи».

Рентген обнаружил, что новое излучение появлялось в том месте, где катодные лучи (потоки быстрых электронов) сталкивались со стеклянной стенкой трубки. В этом месте стекло светилось зеленоватым светом. Последующие опыты показали, что *X*-лучи возникают при столкновениях быстрых электронов с любым препятствием, в частности с металлическими электродами.

Свойства рентгеновских лучей

Лучи, открытые Рентгеном, действовали на фотопластинку, вызывали ионизацию воздуха, но заметным образом не отражались от каких-либо веществ и не испытывали преломления. Электромагнитное поле не оказывало никакого влияния на направление их распространения.

Сразу же возникло предположение, что рентгеновские лучи — это электромагнитные волны, которые излучаются при резком торможении электронов. В отличие от световых лучей видимого участка спектра и ультрафиолетовых лучей рентгеновские лучи имеют гораздо меньшую длину волны. Их

длина волны тем меньше, чем больше энергия электронов, сталкивающихся с препятствием. Большая проникающая способность рентгеновских лучей и прочие их особенности связывались именно с малой длиной волны. Но эта гипотеза нуждалась в доказательствах, и доказательства были получены спустя 15 лет после открытия Рентгена.

Дифракция рентгеновских лучей

Если рентгеновское излучение представляет собой электромагнитные волны, то оно должно обнаруживать дифракцию — явление, присущее всем видам волн. Сначала пропускали рентгеновские лучи через очень узкие щели в свинцовых пластинках, но ничего похожего на дифракцию обнаружить не удавалось. Немецкий физик М. Лауэ предположил, что длина волны рентгеновских лучей слишком мала для того, чтобы можно было обнаружить дифракцию этих волн на искусственно созданных препятствиях. Ведь нельзя сделать щели размером 10^{-8} см, поскольку таков размер самих атомов. А что, если рентгеновские лучи имеют примерно такую же длину волны? Тогда остается единственная возможность — использовать кристаллы. Они представляют собой упорядоченные структуры, в которых расстояния между отдельными атомами по порядку величины равны размеру самих атомов, т. е. 10^{-8} см. Кристалл с его периодической структурой и есть то естественное устройство, которое неизбежно должно вызывать заметную дифракцию волн, если длина их близка к размерам атомов.

И вот узкий пучок рентгеновских лучей был направлен на монокристалл, за которым была расположена фотопластинка. Результат полностью согласовался с самыми оптимистическими ожиданиями. Наряду с большим центральным пятном, которое давали лучи, распространяющиеся по прямой, возникли регулярно расположенные небольшие пятнышки вокруг центрального пятна (рис. 4.7). Появление этих пятнышек можно было объяснить только дифракцией рентгеновских лучей на упорядоченной структуре кристалла.

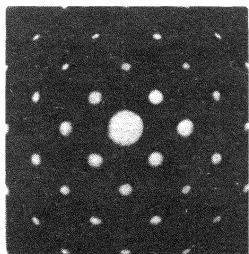


Рис. 4.7

Исследование дифракционной картины позволило определить длину волны рентгеновских лучей.

Измерение длины волны рентгеновских лучей

В опытах, поставленных по идее Лауэ, наблюдалась дифракция рентгеновских лучей на монокристаллах. Более простой и наглядный метод наблюдения дифракции рентгеновских лучей был предложен в 1916 г. П. Дебаем и П. Шерером. В методе Дебая—Шерера дифракция рентгеновских лучей осуществлялась при прохождении через *поликристаллическую структуру* — тонкую пластину.

Рассмотрим, что происходит при падении рентгеновских лучей на отдельный кристаллик. Атомы или ионы кристаллической решетки располагаются в определенных плоскостях. Кристаллические плоскости играют роль полупрозрачных зеркал (или тонких плоскопараллельных пленок). Рентгеновские лучи частично отражаются от этих плоскостей, а частично проникают в глубь кристалла. Волны, отраженные от соседних плоскостей, когерентны и имеют разность хода* $2d \sin \theta$, где d — расстояние между плоскостями, а θ — угол между кристаллической плоскостью и направлением распространения волны (рис. 4.8). Об этом говорилось в § 2.5 при рассмотрении интерференции света в тонких пленках. Отраженные от различных плоскостей волны усиливают друг друга, если разность хода равна целому числу длин волн:

$$2d \sin \theta = k\lambda, k = 0, 1, 2, \dots \quad (4.6.1)$$

Условие (4.6.1) называют условием Брэгга—Вульфа для отражения рентгеновских лучей. Лишь при падении лучей на кристалл под углами, удовлетворяющими условию (4.6.1), наблюдается интенсивное отражение. При падении под другими углами рентгеновские лучи проходят сквозь кристалл без отражения.

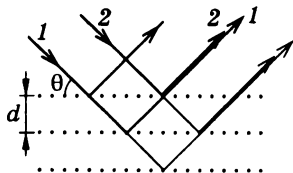


Рис. 4.8

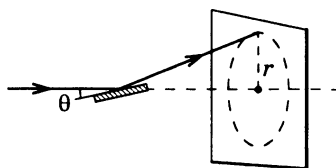


Рис. 4.9

* Рентгеновские лучи практически не преломляются; для них показатель преломления $n \approx 1$.

Рассмотрим один кристаллик пластины (рис. 4.9). Если он ориентирован относительно пучка так, что угол θ удовлетворяет условию (4.6.1), то интенсивность отраженных лучей максимальна. На экране возникнет дифракционное пятно. Кристалликов в пластине очень много. Поэтому всегда найдутся кристаллики, ориентированные по отношению к падающему лучу под тем же углом θ , но повернутые относительно оси пучка на различные углы. Рентгеновские лучи, отраженные от этих кристалликов, дадут на экране дифракционное кольцо определенного радиуса. Различным значениям k в условии (4.6.1) соответствуют различные значения θ . Поэтому возникает не одно дифракционное кольцо, а система колец. Измеряя радиус этих колец, нетрудно найти длину волны рентгеновских лучей. Она оказалась меньше длины волны ультрафиолетового излучения и по порядку величины равна размеру атома (10^{-8} см).

Рентгеновские спектры

Детальный анализ длин волн рентгеновского излучения обнаруживает два различных типа спектров: *непрерывный* и *линейчатый*. Непрерывный спектр возникает при торможении электронов металлическим электродом, и поэтому его называют также *спектром торможения*. Этот спектр содержит всевозможные длины волн, начиная с длинных, граничащих с ультрафиолетом, и до некоторой минимальной длины волны, которая определяется энергией ускоренных электронов (см. задачу 1 в § 5.9).

Когда энергия падающих на электрод электронов превосходит некоторое критическое значение, зависящее от материала электрода, то на фоне непрерывного спектра возникает линейчатый спектр. Этот спектр называют также *характеристическим*, так как он характеризует вещество электрода, на который падает электронный пучок. Спектральные линии характеристического рентгеновского излучения подобны оптическим спектральным линиям, но только имеют гораздо меньшие длины волн. Энергия электронов, необходимых для получения характеристических спектров, достигает десятков килоэлектронвольт.

Линейчатый спектр рентгеновских лучей данного химического элемента остается неизменным для всех химических соединений этого элемента. Замечательной особенностью рентгеновских спектров является то, что отдельные спектральные линии образуют группы (серии), и структура этих серий одинакова для всех элементов. Объяснение происхождения рентгеновских спектров мы отложим до главы 6.

Применение рентгеновских лучей

Рентгеновские лучи нашли себе много очень важных практических применений.

В медицине они применяются для постановки правильного диагноза заболевания, а также для лечения раковых заболеваний.

Весьма обширны применения рентгеновских лучей в научных исследованиях. По дифракционной картине, даваемой рентгеновскими лучами при их прохождении сквозь кристаллы, удается установить порядок расположения атомов в пространстве — структуру кристаллов. Сделать это для неорганических кристаллических веществ оказалось не очень сложно. Но с помощью рентгеноструктурного анализа удается расшифровать строение сложнейших органических соединений, включая белки. В частности, была определена структура молекулы гемоглобина, содержащей десятки тысяч атомов.

Подлинным триумфом рентгеноструктурного анализа явилось установление структуры молекул ДНК (дезоксирибонуклеиновой кислоты), входящей в состав хромосом клеточных ядер всех живых организмов. Эти молекулы являются носителями наследственного кода, т. е. информации о строении живого организма, передаваемой по наследству. На рисунке 4.10 показана рентгенограмма натриевой соли ДНК.

Эти достижения стали возможными благодаря тому, что длина волны рентгеновских лучей очень мала, — именно поэтому удалось «увидеть» молекулярные структуры. Увидеть, конечно, не в буквальном смысле; речь идет о получении дифракционной картины, с помощью которой после немалой затраты труда на ее расшифровку можно восстановить характер пространственного расположения атомов.

Из других применений рентгеновских лучей отметим рентгеновскую дефектоскопию — метод обнаружения раковин в отливках, трещин в рельсах, проверки качества сварных швов и т. д. Рентгеновская дефектоскопия основана на изменении поглощения рентгеновских лучей в изделии при наличии в нем полости или неоднородных включений.

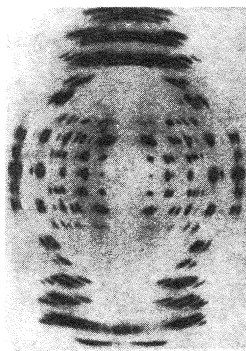


Рис. 4.10

Устройство рентгеновской трубки

Для получения рентгеновских лучей разработаны весьма совершенные устройства, называемые рентгеновскими трубками. Они значительно превосходят те первые аппараты, которые сконструировал Рентген.

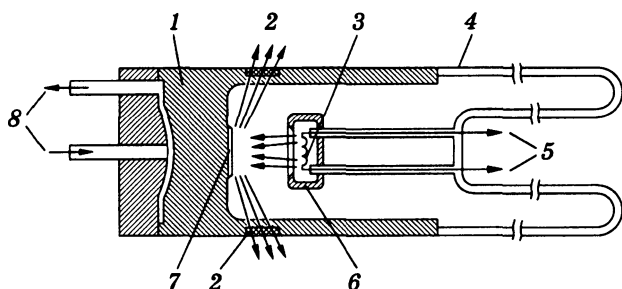


Рис. 4.11

На рисунке 4.11 схематически показано устройство рентгеновской трубки для структурного анализа вещества. Рабочий участок анода 1 имеет зеркальную поверхность, расположенную перпендикулярно или под некоторым углом к электронному пучку. Зеркало 7 анода изготавливается из тяжелых металлов (хром, железо, никель и др.). Катод 3 представляет собой вольфрамовую спираль, испускающую электроны за счет термоэлектронной эмиссии. Напряжение к катоду подводится при помощи проводников 5. Цилиндр 6 фокусирует поток электронов, которые затем соударяются с зеркалом анода. При этом рождаются рентгеновские лучи. В стеклянной колбе 4 имеются бериллиевые «окна» 2 для выхода излучения. (Бериллий слабо поглощает рентгеновские лучи.) Анод охлаждается водой через трубку 8.

Напряжение между анодом и катодом достигает нескольких десятков киловольт. В трубке создается глубокий вакуум; давление газа в ней составляет 10^{-5} — 10^{-7} мм рт. ст.

§ 4.7. ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Электромагнитная теория объединяет в единый спектр всю совокупность излучений, которые сильно различаются по своим свойствам, действиям и по способам возбуждения. Сюда относятся самые медленные электромагнитные колебания с час-

тотой колебаний, близкой к нулю (см. табл. 3). Далее идет область колебаний, создаваемых электромагнитными машинами и аппаратурой низкой частоты, охватывающая интервал $10-10^5$ Гц. За ней расположены все диапазоны радиоволн, испускаемых антеннами радиостанций, в которых возбуждаются электромагнитные колебания с помощью генераторов высокой и сверхвысокой частоты. Инфракрасное, видимое и ультрафиолетовое излучения возникают при электронных переходах в атомах и молекулах (об этом подробно будет рассказано в главе 6). Далее идут рентгеновское и гамма-излучение. Со всеми этими излучениями, кроме гамма-излучения, вы уже знакомы. Самое коротковолновое гамма-излучение испускают атомные ядра.

Таблица 3

Название участка спектра	Длина волн		Частота колебаний	
	от	до	от	до
Низкочастотные электромагнитные волны	∞	10 км	0	$3 \cdot 10^4$
Длинные радиоволны	10 км	1 км	$3 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^5$
Средние радиоволны	1 км	100 м	$3 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^6$
Короткие радиоволны	100 м	10 м	$3 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^7$
Метровые радиоволны	10 м	1 м	$3 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^8$
Дециметровые радиоволны	100 см	10 см	$3 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^9$
Сантиметровые радиоволны	10 см	1 см	$3 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^{10}$
Миллиметровые радиоволны	1 см	0,1 см	$3 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^{11}$
Микрорадиоволны	1000 мкм	100 мкм	$3 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{12}$
Инфракрасное излучение	1 мм	760 нм	$3 \cdot 10^{12}$	$4 \cdot 10^{14}$
Видимое излучение	760 нм	380 нм	$4 \cdot 10^{14}$	$8 \cdot 10^{14}$
Ультрафиолетовое излучение	380 нм	10 нм	$8 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{16}$
Рентгеновское излучение	80 нм	0,001 нм	$3,7 \cdot 10^{15}$	$3 \cdot 10^{20}$
Гамма-излучение	0,01 и менее		$3 \cdot 10^{19}$ и более	



Рис. 4.12

Полная шкала электромагнитных волн с указанием длин волн и частот различных излучений изображена на рисунке 4.12.

Принципиального различия между отдельными излучениями нет. Все они представляют собой электромагнитные волны, порождаемые ускоренно движущимися заряженными частицами. Обнаруживаются электромагнитные волны в конечном счете по их действию на заряженные частицы. В вакууме излучение любой длины волны распространяется со скоростью 300 000 км/с. Границы между отдельными областями шкалы излучений весьма условны.

Излучения различной длины волны отличаются друг от друга по способу их получения (излучение антенны, тепловое излучение, излучение при торможении быстрых электронов и др.) и методам регистрации.

По мере уменьшения длины волны количественные различия в длинах волн приводят к существенным качественным различиям.

Излучения различной длины волны очень сильно отличаются друг от друга по поглощению их веществом. Коротковолновые излучения (рентгеновское и особенно гамма-излучение) поглощаются слабо. Непрозрачные для волн оптического диапазона вещества прозрачны для этих излучений. Коэффициент отражения электромагнитных волн также зависит от длины волны. Но главное различие между длинноволновым и коротковолновым излучениями в том, что *коротковолновое излучение обнаруживает свойства частиц*. Об этом пойдет речь в дальнейшем.

- ? 1. Как должен быть устроен спектральный аппарат, в котором вместо призмы применяется дифракционная решетка?
2. Какие операции нужно проделать с крупницей вещества, чтобы узнать ее химический состав при помощи спектрального анализа?
3. Почему солнечный свет, прошедший сквозь оконное стекло, не вызывает загара?