

Напомним энергетические соображения, уже высказывавшиеся нами в общей форме в § 22.

В каждом из главных максимумов амплитуды отдельных колебаний просто складываются, ибо разность фаз равна целому числу 2π . Поскольку амплитуды колебаний, идущих от отдельных щелей решетки, равны между собой, результирующая амплитуда будет пропорциональна числу щелей. *Интенсивность же главного максимума, пропорциональная квадрату амплитуды, будет пропорциональна квадрату числа щелей.*

С другой стороны, *общее количество энергии*, прошедшей сквозь решетку, *пропорционально просто числу щелей.* Мы видим, что с возрастанием числа щелей энергия, попадающая в главные максимумы, растет быстрее, чем общий поток энергии, т. е. *с возрастанием числа щелей все большая часть прошедшей энергии приходится на главные максимумы.* Эти общие энергетические соображения, таким образом, приводят нас опять к выводу, что картина должна становиться более резкой с увеличением числа щелей. Самый простой метод для увеличения числа щелей было бы увеличение размеров решетки. Но практически такой путь мало пригоден, и поэтому увеличивают число щелей на 1 мм, уменьшая их ширину. Узкие щели, кроме того, выгоднее, так как чем меньше a [см. (1) § 27], тем больший угол φ соответствует первой темной полосе, т. е. тем более полого идет спад интенсивности в дифракционной картине, даваемой одной щелью (рис. 93).

§ 29. Дифракционный спектр. Решетки Роуланда и эшелон Майкельсона

Дифракционные решетки нашли широкое применение для исследования спектрального состава излучения. До сих пор мы предполагали, что падающий на решетку свет монохроматический, т. е. содержит только одну длину волны. В случае, если решетка освещается светом, имеющим сложный спектр, например белым светом, главные полосы для каждой длины волны получаются в различных местах; в результате получается спектр. Спектры, соответствующие первой, второй и т. д. главным полосам, называют спектрами первого, второго и т. д. порядка. Значит, в спектре первого порядка разность хода между складываемыми колебаниями равна λ , в спектре второго порядка 2λ и т. д. Спектр «нулевого порядка», собственно говоря, не является спектром, так как положение нулевой полосы, определяемое разностью хода нуль, очевидно, не зависит от длины волны.

Мы видели выше, что положение главных светлых полос определяется формулой

$$(a+b) \sin \varphi = m\lambda,$$

где a — ширина каждой щели, b — ширина промежутка между соседними щелями, а m — целое число, определяющее номер полосы (порядок спектра). Обычно на практике углы φ невелики, вследствие чего написанное условие превращается в $\varphi = \frac{m\lambda}{a+b}$.

Для двух разных длин волн мы будем иметь соответственно:

$$\varphi' = \frac{m\lambda'}{a+b} \quad \text{и} \quad \varphi'' = \frac{m\lambda''}{a+b},$$

откуда

$$\varphi'' - \varphi' = \frac{m}{a+b} (\lambda'' - \lambda'). \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что угол между двумя направлениями, соответствующими двум светлым полосам, образованным двумя разными длинами волн, т. е. практически расстояние между этими полосами на экране, прямо пропорционален порядку спектра и обратно пропорционален так называемой постоянной решетке $(a+b)$.

В то время как в призматическом спектре красная часть «сжата» по сравнению с фиолетовой (см. § 42), у дифракционной решетки спектр растянут равномерно $\left(\frac{\varphi'' - \varphi'}{\lambda'' - \lambda'} = \text{const}\right)$ и тем больше, чем больше его порядок m .

Зная постоянную $(a+b)$ дифракционной решетки (ее можно измерить под микроскопом) и измеряя угол φ , можно с большой точностью определить длину волны света, дающую светлую полосу определенного порядка m под углом φ . Мы видели выше, что «дисперсия», т. е. способность решетки растягивать спектр, пропорциональна порядку последнего m . Поэтому, когда решетку применяют для спектрального разложения, желательно производить наблюдение в спектре возможно большего порядка. Однако ряд обстоятельств препятствует этому: яркость спектра убывает с увеличением порядка (рис. 95). Кроме того, спектры высоких порядков частично перекрывают друг друга. Эти два обстоятельства сильно ограничивают возможность применения спектров высокого порядка.

Известное облегчение в этом смысле дает возможность уничтожения некоторых спектров путем подбора соотношения между a и b . Например, мы видели выше, что при $a = b$ должны исчезать спектры четных порядков.

Мы показали, что с увеличением числа щелей решетки главные дифракционные полосы становятся уже. В связи с этим решетки делают с очень большим количеством щелей, потому что чем уже полосы, тем более детально можно исследовать спектры, состоящие обычно из многочисленных тесных линий. Две близкие линии могут быть разрешены решеткой только в том случае, если ширина изображения каждой из них, определяемая общим числом щелей

решетки, не более, чем расстояние между линиями, определяемое постоянной решетки

Согласно Релею две спектральные линии считаются разрешенными если главный максимум одной линии попадает на первый нуль около главного максимума другой линии.

Условие главного максимума будет:

$$\varphi' = \frac{m\lambda'}{a+b};$$

условие первого нуля (формула (10) гл. III) есть

$$\varphi'' = \frac{m + \frac{1}{N}}{a+b} \lambda''.$$

Так как по условию Релея $\varphi' = \varphi''$, то

$$m\lambda' = \left(m + \frac{1}{N}\right) \lambda'',$$

откуда

$$\frac{\lambda''}{\lambda' - \lambda''} = mN. \quad (6a)$$

Величина $\lambda' - \lambda''$ определяет наименьшую разность длин волн, разрешаемую решеткой. Отношение $\frac{\lambda''}{\lambda' - \lambda''}$ называется *разрешающей способностью спектрального прибора*.

Таким образом, *разрешающая способность решетки*, т. е. способность ее разделять близкие спектральные линии, пропорциональна общему числу щелей решетки, *измеряется произведением количества щелей на порядок спектра*.

Дифракционные решетки изготовляют на стекле или металле (в последнем случае дифракционную картину наблюдают в отраженном свете). Тончайшим алмазным острием с помощью точной длительной машины наносятся штрихи, промежутки между которыми служат щелями. Некоторые решетки имеют около 2000 штрихов на 1 мм, что при величине решетки в несколько сантиметров составляет огромное количество щелей, обеспечивающее большую разрешающую способность. Так, большой дифракционный спектрограф позволяет получать по частям солнечный спектр в таком масштабе, что полная длина его от красного до фиолетового конца составляет около 10 м.

Оптическая схема спектрографа с дифракционной решеткой очень проста. Узкая щель, параллельная щелям решетки, освещается источником света. Эта щель расположена в главном фокусе первой линзы, создающей плоские волны, падающие на решетку. После решетки стоит вторая линза, в главной фокальной плоскости которой наблюдаются спектры.

Если решетка нанесена на зеркало, то дифракционные спектры наблюдают в отраженном свете. Когда свет падает под углом α к нормали к решетке (рис. 96), нулевую полосу получают в направлении зеркального отражения. Вся решетка действует при этом как прозрачная решетка $M'N'$, являющаяся проекцией MN на фронт волны. Очевидно, постоянная решетки $M'N'$ будет равна $c \cos \alpha$, если c — постоянная решетки MN . Следовательно, при косом падении света решетка работает так, как если бы ее штрихи были ближе друг к другу. Это обстоятельство позволило получить дифракционные спектры рентгеновых лучей при скользющем отражении от обычной дифракционной решетки. Ввиду малости длин волн рентгеновых лучей для них требуется решетка с значительно

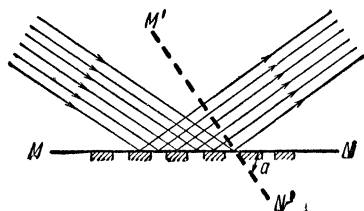


Рис. 96. Плоская отражательная решетка.

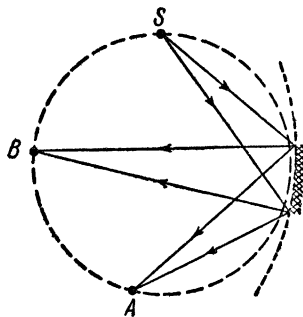


Рис. 97. Вогнутая решетка Роуланда.

меньшей постоянной, чем для видимого света. Сделать такие решетки невозможно. Малое значение косинуса скользящего угла падения ($\alpha \approx 90^\circ$) заставляет решетку с большой постоянной работать так, как если бы ее постоянная была мала. Пользуясь тем же обстоятельством можно получить спектр, например, от граммофонной пластинки, имеющей всего три — пять штрихов на 1 мм, если смотреть на отражение в ней маленькой лампы при скользящем падении света.

Металлическая отражающая решетка имеет ряд преимуществ по сравнению со стеклянными. В частности, металл как материал более мягкий можно нарезать алмазом гораздо точнее, чем стекло. Кроме того, стекло не пропускает, например, ультрафиолетового излучения; отражающая же решетка позволяет при подходящем материале исследовать широкие участки спектра.

Роуланд предложил наносить штрихи решетки на вогнутую сферическую поверхность зеркала. При этом нет необходимости применять добавочные зеркала, фокусирующие дифракционные спектры. Простое вычисление показывает, что если освещенную щель S (рис. 97) поместить где-нибудь на окружности, диаметр которой равен радиусу кривизны решетки, то спектры разного порядка получаются в различных точках A, B, \dots той же окружности. При

этом разрешающая сила тем более велика, чем больше радиус кривизны вогнутой решетки. С решетками, имеющими радиус кривизны около 10 м, удается получать спектры, в которых расстояние между двумя желтыми линиями натрия составляет около 1 см.

Если мы сравним действие дифракционных решеток с действующим пластинки Льюмера — Герке, то увидим, что в решетках складывается большее число колебаний (десятки и сотни тысяч), зато разность хода между соседними колебаниями (порядок спектра) значительно меньше (не превышает нескольких длин волн). Мы уже указывали, что для разрешающей способности важно только произведение этих величин. Преимущество решеток состоит в том, что

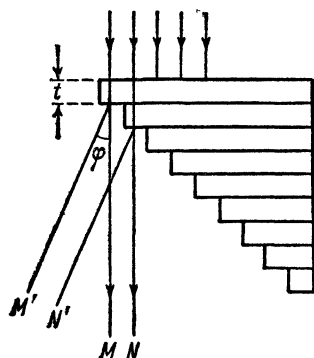


Рис. 98. Эшелон Майкельсона.

они делают доступной для исследования более широкую спектральную область (благодаря малому m ; § 28), но практически решетки обычно не дают такой большой разрешающей способности, как интерференционные эталоны. Можно построить дифракционную решетку специального типа, в которой разность хода между соседними колебаниями будет очень велика (но число колебаний, как и в эталоне, сравнительно не велико). Майкельсон предложил пользоваться в качестве дифракционной решетки стопой стеклянных пластинок равной толщины d , сложенных «ступеньками» (рис. 98). Действие такой решетки, так называемого эшелона¹⁾, основано на том, что оптический путь света в стекле (показатель преломления 1,5) в 1,5 раза больше, чем равный ему геометрический путь в воздухе. Поэтому, например, лучи M и N выходят из решетки с разностью хода

$$\delta = nd - d = d(n - 1) = 0,5d,$$

где d — толщина пластинки. Если мы наложим на разность хода обычное условие для получения светлой полосы по нормали $\delta = 0,5 d = m\lambda$, то, принимая длину волны $\lambda = 0,5 \text{ мк}$, а толщину $d = 1 \text{ мм}$, найдем $m = 1000$. Следовательно, по нормали можно наблюдать спектр тысячного порядка. Выше было показано, что разрешающая сила решетки пропорциональна порядку спектра. Преимущества эшелона делаются очевидными, если вспомнить, что с обычной решеткой удается наблюдать спектр порядка, не превышающего 10. Эшелоны позволяют разложить чрезвычайно тесные группы спектральных линий. В то же время при высоком порядке

¹⁾ От франц. *échelle* — лестница.

получаемых спектров имеет место сильное наложение соседних спектров, вследствие чего ступенчатые решетки применяют исключительно для анализа «сверхтонкой структуры» отдельных спектральных линий.

§ 30. Плоскостные решетки. Пространственная решетка

Когда свет проходит сквозь какой-нибудь экран, обладающий правильно расположенными прозрачными или непрозрачными деталями, всегда наблюдаются своеобразные дифракционные явления, в известной мере сходные с дифракцией на простой решетке, и вместе с тем зависящие от структуры экрана. Вообще, всякая правильная структура экрана вызывает появление дифракционной картины. В дифракционных спектрах иногда наблюдаются так называемые «дúхи», т. е. линии, не имеющиеся в спектре источника; появление «дúхов» объясняется неправильностями чередования штрихов решеток. Если есть какой-нибудь намек на периодичность этих неправильностей, сейчас же появляются и «дúхи».

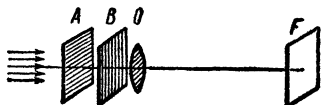


Рис. 99. Скрещенные решетки.

Если взять две дифракционные решетки *A* и *B* (рис. 99) и поставить их так, чтобы их штрихи расположились под прямым углом, то наблюдаемая дифракционная картина получается от суммарного действия обеих решеток. При этом в фокальной плоскости *F* объектива *O* вместо полос получают отдельные правильно расположенные светлые точки (рис. 100). В то время как решетка *A* вызывает появление ряда дифракционных спектров, расположенных сверху вниз, решетка *B* дает аналогичную картину в горизонтальном направлении.

Совместное действие обеих решеток создает ряд светлых пятен, расположенных на плоскости.

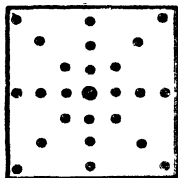


Рис. 100. Дифракция на скрещенных решетках.

Для направлений, соответствующих светлым пятнам, должны одновременно удовлетворяться условия главных максимумов для дифракционных картин, даваемых каждой из решеток. Ведь светлые пятна получают в местах пересечения светлых полос дифракционных картин от отдельных решеток (правда, не на всех пересечениях). Это условие является необходимым, но, как видно из рис. 100, недостаточным.

Если мы обозначим угол в горизонтальной плоскости между направлением светлого пятна и центральным лучом через φ_1 и такой же угол в вертикальной плоскости — через φ_2 , то одновременно должно быть:

$$(a_1 + b_1) \sin \varphi_1 = m_1 \lambda \quad (7)$$

и

$$(a_2 + b_2) \sin \varphi_2 = m_2 \lambda, \quad (8)$$