

# ЛЕКЦИЯ 10

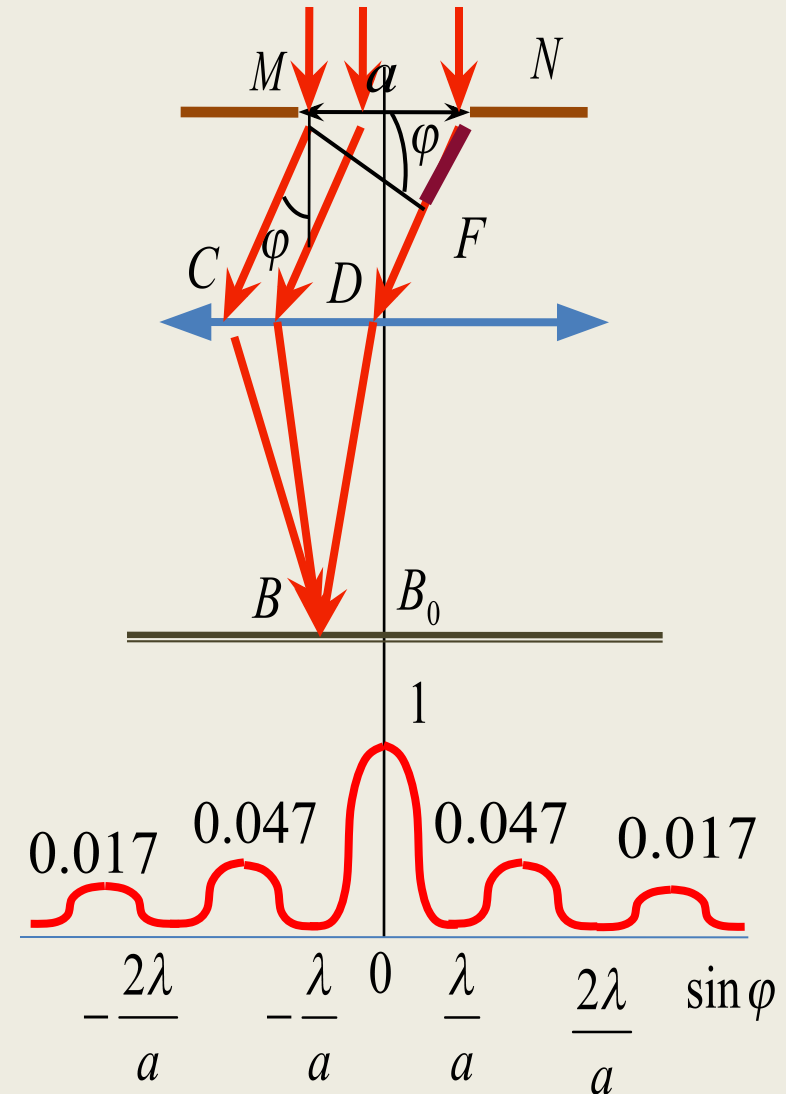
# ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

# ДИФРАКЦИЯ ФРАУНГОФЕРА

- ДИФРАКЦИЯ – огибание волнами препятствий, (любое отклонение распространения волн вблизи препятствий от законов геометрической оптики).
- ДИФРАКЦИЯ ФРЕНЕЛЯ (дифракцию в сходящихся лучах) – осуществляется в случае, когда дифракционная картина наблюдается на конечном расстоянии от препятствия, вызвавшего дифракцию.
- ДИФРАКЦИЯ ФРАУНГОФЕРА (дифракция плоских световых волн или дифракция в параллельных лучах) – наблюдается в том случае, когда источник света и точка наблюдения бесконечно удалены от препятствия, вызвавшего дифракцию. (Что бы осуществить её, надо точечный источник света поместить в фокусе собирающей линзы, а дифракционную картину исследовать в фокальной плоскости второй собирающей линзы, установленной

# ДИФРАКЦИЯ ФРАУНГОФЕРА НА ОДНОЙ ЩЕЛИ

Рассмотрим дифракцию Фраун-гофера от одной, бесконечно длинной щели, шириной  $a$ .  
 Плоская монохроматическая световая волна, длиной волны  $\lambda$ , падает нормально узкой щели. Оптическая разность хода между крайними лучами  $MC$  и  $ND$ , идущими от щели в произвольном направлении  $\varphi$ , равна:



где:

Разобьём открытую часть волновой поверхности в плоскости щели  $MN$  на зоны Френеля в виде полос параллельных ребру  $M$  щели. Ширина каждой полосы выбирается так, что бы разность хода от краев этих зон, была равна  $\lambda/2$ , то есть на ширине щели будет всего  $\frac{MN}{\lambda/2}$  зон.

Так как свет на щель падает нормально, то плоскость щели совпадает с фронтом волны, значит, все точки фронта волны в плоскости щели будут колебаться в одинаковой фазе. Амплитуды вторичных волн в плоскости щели будут равны. Число зон Френеля, укладывающихся на ширине щели, зависит от угла  $\theta$ . От числа зон Френеля зависит результат наложения всех вторичных волн. При интерференции света от каждой пары соседних зон Френеля амплитуда результирующей

ний равна нулю, так как колебания от каждой пары соседних зон взаимно гасят друг друга.

- Если число зон Френеля ЧЕТНОЕ:

$$a \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2}$$

В точке В образуется ДИФРАКЦИОННЫЙ МИНИМУМ (полная темнота).

- Если число зон Френеля НЕЧЕТНОЕ

$$a \sin \varphi = \pm (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$$

В точке В образуется ДИФРАКЦИОННЫЙ МАКСИМУМ, соответствующий действию одной нескомпенсированной зоны Френеля.

$$m=1,2,3,\dots$$

В направлении  $\varphi = 0$  щель действует как одна зона Фре-неля, и в этом направлении свет распространяется с наибольшей интенсивностью, значит, в точке  $B_0$  наблюдается **ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ДИФРАКЦИОННЫЙ МАКСИМУМ**.

Распределение интенсивности света на экране – дифракционный спектр. Интенсивности центрального и последующих максимумов соотносятся как:

$$1: 0,047: 0,017: 0,0083, \dots$$

Основная часть световой энергии сосредоточена в центральном максимуме.

Сужение щели приводит к тому, что центральный максимум расплывается, а интенсивность уменьшается (у других максимумов то же самое).



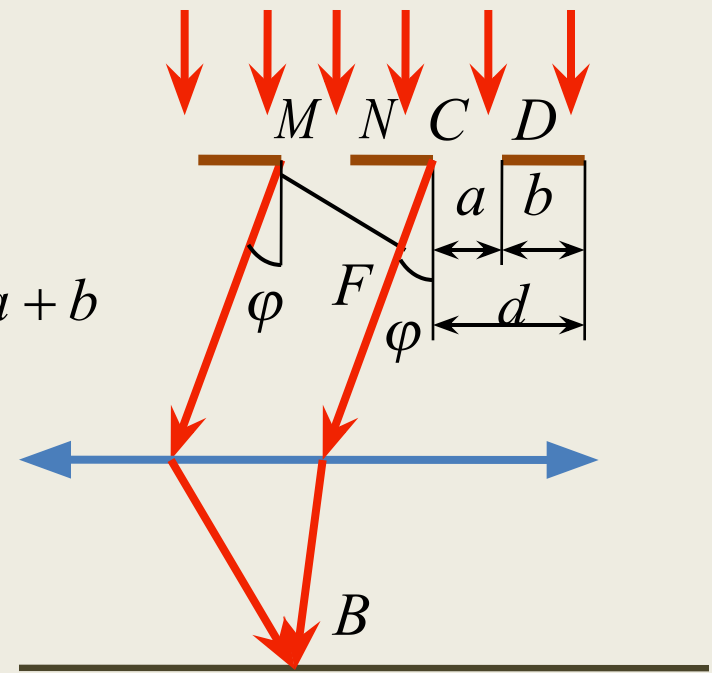
щель,  $(a \gg \lambda)$ , тем картина ярче, но дифракционные полосы уже, а число самих полос больше. При  $a \approx \lambda$  в центре резкое изображение источника света, то есть происходит прямолинейное распространение света.

Данная ситуация имеет место только при монохроматическом свете. При освещении щели белым светом, центральный максимум — белая полоса, он общий для всех длин волн. (при разности хода  $\Delta r = m\lambda$ , для всех длин волн  $\lambda$ ). Боковые максимумы ( $m=1, 2, 3, \dots$ ) радужно окрашены, так как условие максимума для любых  $m$  различно для разных  $\lambda$ . Фиолетовый край спектра ближе к центру дифракционной картины. Однако спектры настолько расплывчатые, что

# ДИФРАКЦИЯ ФРАУНГОФЕРА НА ОДНОМЕРНОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКЕ

Большое практическое значение имеет дифракция, наблюдаемая при прохождении света через **одномерную дифракционную решетку** – систему параллельных щелей лежащих в одной плоскости и разделённых равными по ширине непрозрачными промежутками. Дифракционные картины создаваемые каждой щелью в отдельности, будут одинаковыми с остальными. Дифракционная картина на решетке определяется как результат взаимной интерференции волн, идущих от всех щелей, то есть в дифракционной решетке осуществляется многолучевая интерференция когерентных дифра-

На дифракционной решетке ширина каждой щели  $a$ , ширина каждого непрозрачного участка между щелями  $b$ ,  $d = a + b$  – ПЕРИОД (постоянная) ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ.



Пусть плоская монохроматическая волна падает нормально на решетку. Так как щели находятся на равном расстоянии друг от друга, то разности хода лучей, идущих от двух соседних щелей, будут, для одного направления, одинаковы в пределах всей дифракционной решетки.

$$\Delta = CF = (a + b) \sin \varphi = d \sin \varphi$$

В тех направлениях, в которых ни одна из щелей не распространяет свет, он не будет распространяться ни при двух, ни при больших количествах щелей. Считается, что **ГЛАВНЫЕ МИНИМУМЫ** интенсивности будут наблюдаться в направлениях определяемых условием:

$$m = 1, 2, 3, \dots$$

Кроме этого, вследствие взаимной интерференции световых лучей, посылаемых двумя щелями. В некоторых направлениях они будут гасить друг друга, то есть возникнут **ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МИНИМУМЫ**. Они будут наблюдаться в тех направлениях, которым соответствует разность хода лучей (равная нечетному числу длин полувольт), и определяться условием:

$$d \sin \varphi = \pm (2m + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Наоборот, действие одной щели будет усиливать действие другой, если будет выполняться условие

$$d \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2} = \pm m \lambda$$

$$m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Данное выражение задает условие **ГЛАВНЫХ МАКСИМУМОВ**.

Если дифракционная решетка состоит из  $N$  щелей, то между двумя главными максимумами будет  $N-1$  дополнительных минимумов, разделенных вторичными максимумами (создающих весьма слабый фон), а условием дополнительных минимумов будет:

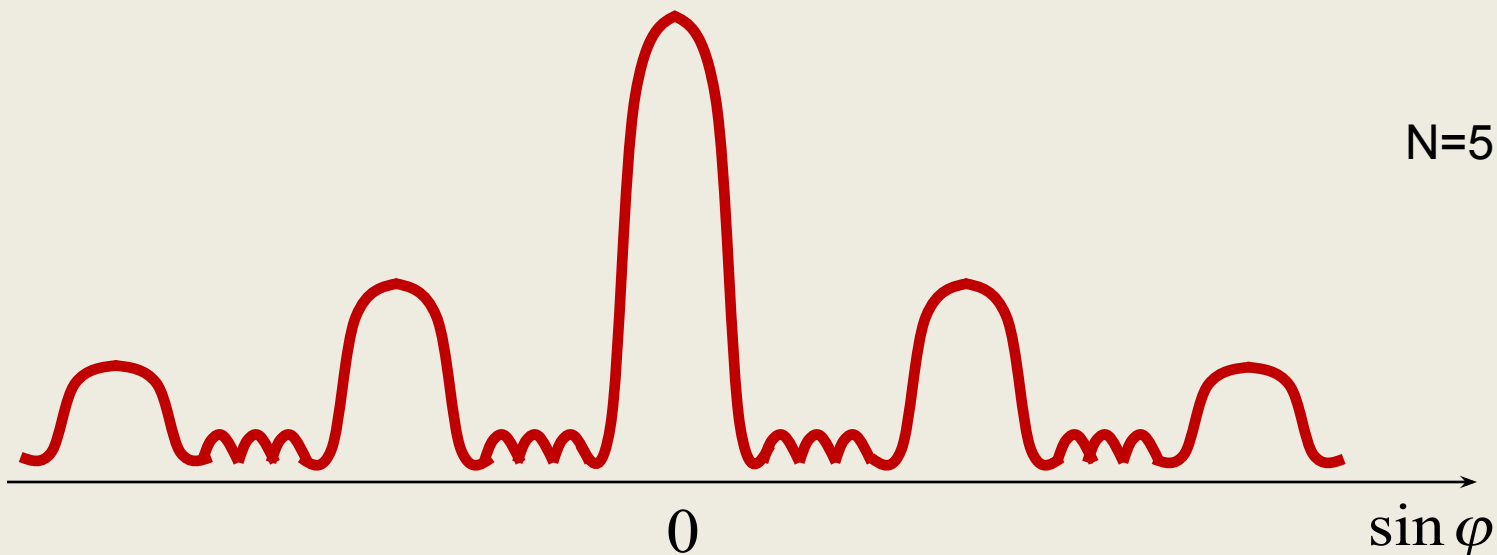
$$d \sin \varphi = \pm m' \frac{\lambda}{N}$$

$$m' = 1, 2, 3, \dots, N-1, N+1, \infty, 2N-1, 2N+1, \infty$$

$m'$  может принимать все значения кроме:  $0, N, 2N, \dots$ , то есть тех значений, при которых условие дополнительных минимумов переходит в условие главных максимумов.

Число главных максимумов не может быть больше  $\frac{d}{\lambda}$ , так как  $\sin \varphi \leq 1$ .

Для дифракционной решетки из 5 щелей дифракционная картина может выглядеть:



Положение главных максимумов зависит от длины волны. При пропускании через решетку белого света все максимумы, кроме центрального, разложатся в спектр (фиолетовая область которого обращена к центру дифракционной картины, красная наружу). Это свойство дифракционной решетки может быть использовано для исследования спектрального состава света (определения длин волн и интенсивностей всех моно-хроматических компонентов). То есть дифракционная решетка может быть использована как спектральный прибор.

**РАССЕЯНИЕ СВЕТА.**  
**ДИФРАКЦИЯ НА**  
**ПРОСТРАНСТВЕННОЙ**  
**РЕШЕТКЕ**



# РАССЕЯНИЕ СВЕТА В МУТНОЙ СРЕДЕ

Дифракция света может происходить в **мутных средах**

– средах с ярко выраженными оптическими неоднородностями (аэрозолями (дымами, туманами, облаками), эмульсиями и т. д.), то есть средами, в которых взвешено множество очень мелких частиц инородных веществ. Свет, проходя через мутную среду, дифрагирует от беспорядочно расположенных микрон неоднородностей, давая равномерное распределение интенсивностей по всем направлениям, не создавая какой-либо определенной дифракционной картины.

Происходит рассеяние света в мутной среде.

Пример: пучок солнечных лучей, проходя через запылённый воздух, рассеивается на пылинках и

становится виден.

# МОЛЕКУЛЯРНОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА

Слабое рассеяние света наблюдается так же и в чистых средах, не содержащих посторонних частиц. Это объясняется тем, что в средах происходит нарушение их оптической однородности, при котором показатель преломления среды не постоянен, а меняется от точки к точке, а так же от флуктуаций плотности возникающих в процессе хаотического теплового движения молекул среды. Рассеяние света в чистых средах обусловленное флуктуациями плотности, анизотропии или концентрации называется **молекулярным рассеянием**.

Флуктуации плотности и интенсивность рассеяния света возрастают с увеличением температуры.

ны ( $I \sim \lambda^{-4}$ ) и голубые лучи рассеиваются лучше чем желтые и красные. Этим же можно объяснить крас-ный цвет зари (свет прошедший через значительную толщину атмосферы оказывается обогащенным более длинноволновой частью спектра, а коротковолновая сине-фиолетовая полностью рассеивается).

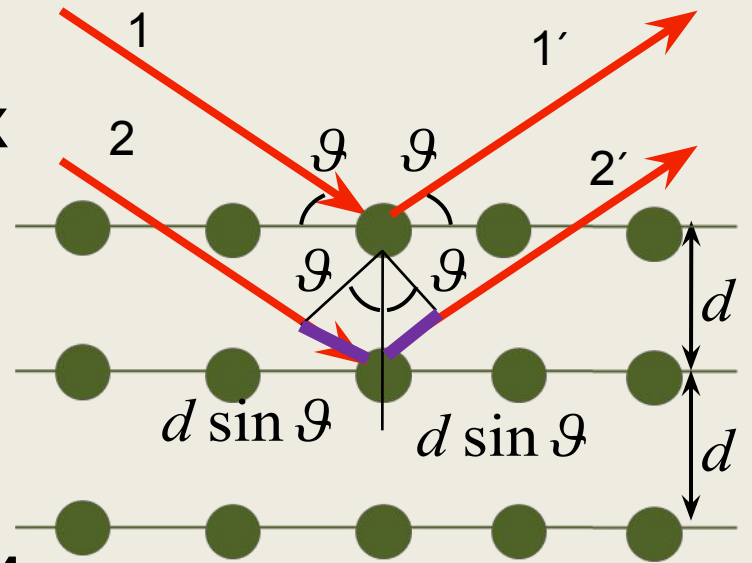
# ДИФРАКЦИЯ НА МНОГОМЕРНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТКАХ

Дифракция наблюдается не только на плоской одномерной дифракционной решетке, но и на двумерной (штрихи нанесены во взаимно перпендикулярных направлениях одной и той же плоскости), а так же на трёхмерных (пространственных) решетках – пространственных образованиях, в которых элементы структуры подобны по форме, имеют геометрически правильное и периодически повторяющееся положение, а так же периоды решеток, соизмеримые с длиной волны электромагнитного излучения. В качестве пространственных дифракционных решеток могут быть использованы кристаллические тела, так как их структуры

Для наблюдения дифракционной картины трёхмерной решетки необходимо чтобы постоянная решетки была того же порядка что и длина волны падающего излучения. Кристаллы имеют постоянную решетки порядка  $10^{-10}$  м и непригодны для наблюдения дифракции в видимом свете ( $\lambda=4-8 \cdot 10^{-7}$  м), но годны для использования в качестве естественных дифракционных решеток для рентгеновского излучения ( $\lambda \approx 10^{-12}-10^{-8}$  м).

Ученые Г.В. Вульф и Брегги предположили что дифракция рентгеновских лучей является результатом их отражения от системы параллельных кристаллографических плоскостей (плоскостей в которых лежат узлы (атомы) кристаллической решетки)

Представим кристаллы в виде со-вокупности параллельных кристаллографических плоскостей, отстоящих друг от друга на расстоянии  $d$ .



Пучок параллельных монохроматических лучей  $1$  и  $2$  падает под углом скольжения  $\vartheta$  на кристаллической решетки, которые становятся источниками вторичных когерентных волн  $1'$  и  $2'$  интерферирующих между собой, подобно вторичным волнам от щелей дифракционной решетки. Максимумы интенсивности (дифракционные максимумы) наблюдаются в тех направлениях. В которых все отраженные атомными плоскостями волны будут находится в одинаковой фазе. Эти направления

летворяют формуле Вульфа-Бреггов:

$$2d \sin \vartheta = m\lambda$$

При разности хода между двумя лучам и, отраженными от соседних кристаллографических плоскостей, крат-ной целому числу длин волн , наблюдается дифрак-ционный максимум.

Формула Вульфа-Бреггов используется при решении двух важных задач:

1. Наблюдая дифракцию рентгеновских лучей известной длины волны на кристаллической структуре неизве-стного строения, и измеряя  $\vartheta$  и  $m$  можно найти межп-лоскостное расстояние  $d$  , то есть определить структу-ру вещества. Этот метод лежит в основе **рентгенострук-турного анализа**.

2. Наблюдая дифракцию рентгеновских лучей неизвестной длины волны на кристаллической структуре при известном  $m$  и измеряя  $\theta$  можно найти длину волны падающего рентгеновского излучения. Этот метод лежит в основе рентгеновской спектроскопии.

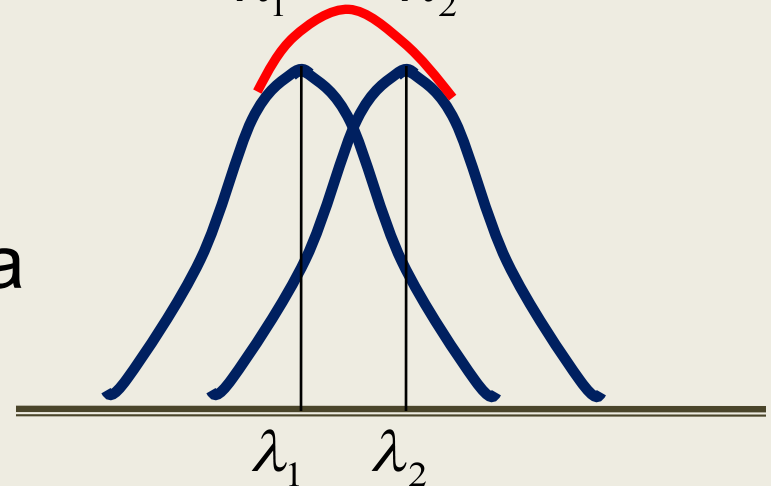
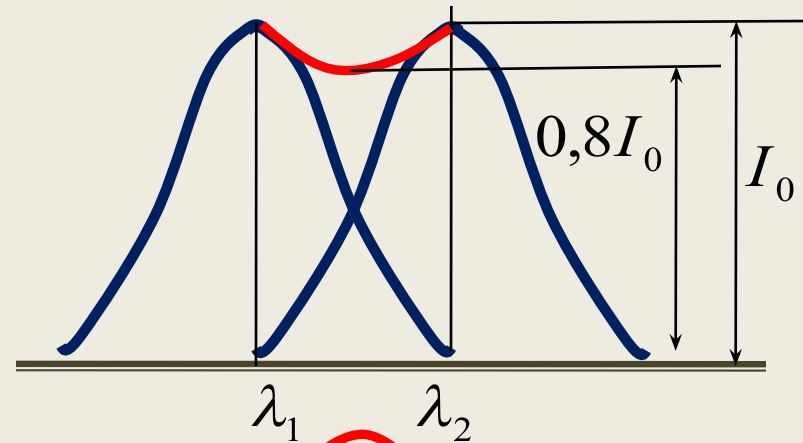


**РАЗРЕШАЮЩАЯ**  
**СПОСОБНОСТЬ**  
**ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ**

Используя даже идеальную оптическую систему, невозможно получить стигматическое изображение точечного источника, что объясняется волновой природой света. Изображение любой светящейся точки в монохроматическом свете представляет собой дифракционную картину (центральное светлое пятно окруженное темными и светлыми кольцами).

# КРИТЕРИЙ РЭЛЕЯ

По критерию Рэлея: изображения двух близлежащих одинаковых точечных источников или двух близлежащих спектральных линий с равными интенсивностями и одинаковыми симметричными центральными максимумами дифракционной картины от одного источника совпадает с первым минимумом дифракционной картины от другого.

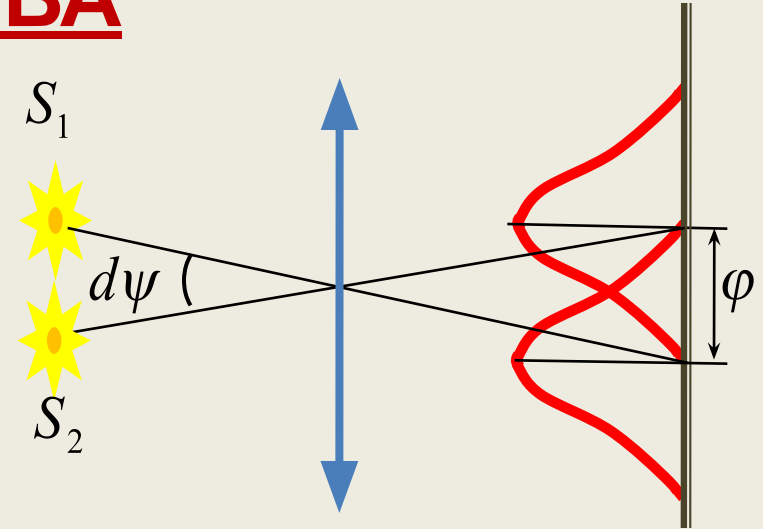


При выполнении критерия Рэлея интенсивность провала между максимумами составляет 80% интенсивности, что

# РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ

## ОБЪЕКТИВА

Если на объектив падает свет от двух удаленных точечных источников  $S_1$  и  $S_2$ , с некоторым угловым расстоянием  $d\psi$ , то вследствие дифракции



вместо двух точек наблюдаются максимумы окруженные темными и светлыми кольцами.

$\varphi$

Два источника разрешимы если **угловое расстояние** между ними:

$$d\psi = \varphi \geq 1,22 \frac{\lambda}{D}$$

$D$  – диаметр объектива

$\lambda$  – длина волны света

$d\psi$  – наименьшее угловое расстояние между двумя точками, при котором они ещё разрешаются оптическим прибором

$R$  – разрешающая способность (разрешающая сила) Рэля

$$R = \frac{1}{d\psi}$$

При выполнении критерия Рэля угловое расстояние между точками  $d\psi = 1,22 \lambda / D$ , значит разрешающая способность объектива зависит от его диаметра и длины волны света

$$R = \frac{1}{d\psi} = \frac{D}{1,22\lambda}$$

# РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

Пусть максимум  $m$ -го порядка для длины волны  $\lambda_2$  наблюдается под углом  $\varphi$ , то есть  $d \sin \varphi = m \lambda_2$ . При переходе от максимума к соседнему минимуму разность хода  $d \sin \varphi$  меняется на  $d/N$  ( $N$  – число щелей решетки). Значит максимум наблюдаемый под

углом  $\varphi_{\text{min}}$  удовлетворяет условию  $d \sin \varphi_{\text{min}} = m \lambda_1 + d/N$

$$\varphi = \varphi_{\text{min}}$$

По критерию Рэлея  $m \lambda_2 = m \lambda_1 + d/N$

$$\lambda_2 / \lambda_1 = 1 + d / (m \lambda_1 N)$$

ИЛИ

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \delta \lambda$$

Так как  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  близки между собой и  $d/N \ll \lambda_1$

то:

Разрешающая способность дифракционной решетки пропорциональна порядку спектров и числу щелей, то есть при заданном числе щелей

переходе к большим значениям порядка интерференции.

Разрешающей способностью спектрального прибора – называют безразмерную величину:

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda}$$

Где  $\delta\lambda$  – абсолютное значение минимальной разности длин волн двух соседних спектральных линий, при которых эти линии регистрируются отдельно.