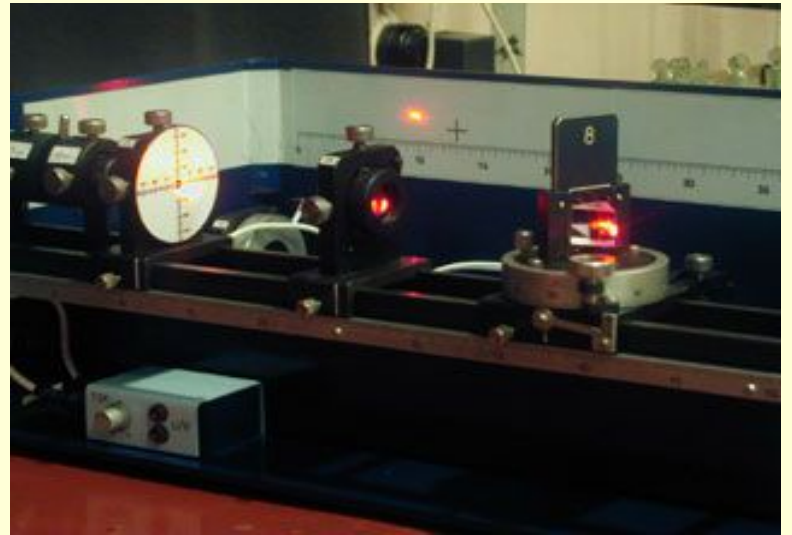


# Оптика и квантовая физика

для студентов  
2 курса ФТФ и ГГФ



Кафедра общей физики



## Дифракция света

### Часть 2

- Дифракция Фраунгофера на одномерной дифракционной решетке**
- Характеристики дифракционной решетки как спектрального аппарата**
- Элементы голографии**



# Дифракционные решётки



Дифракционной решеткой называется любая периодическая структура, состоящая из одинаковых дифракционных элементов (щелей, дырочек, непрозрачных экранов и т.д.).

## Виды дифракционных решёток



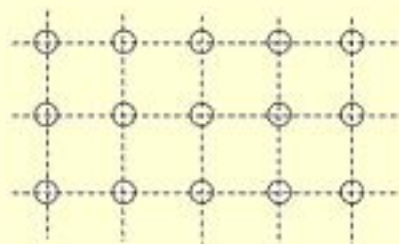
– совокупность отверстий в экране



– совокупность непрозрачных дисков



– совокупность щелей в экране



– плоские решетки –

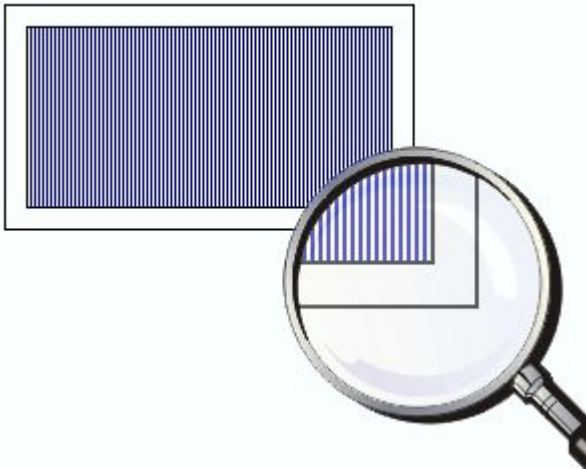


Периодическая совокупность плоских решеток даст пространственную решетку

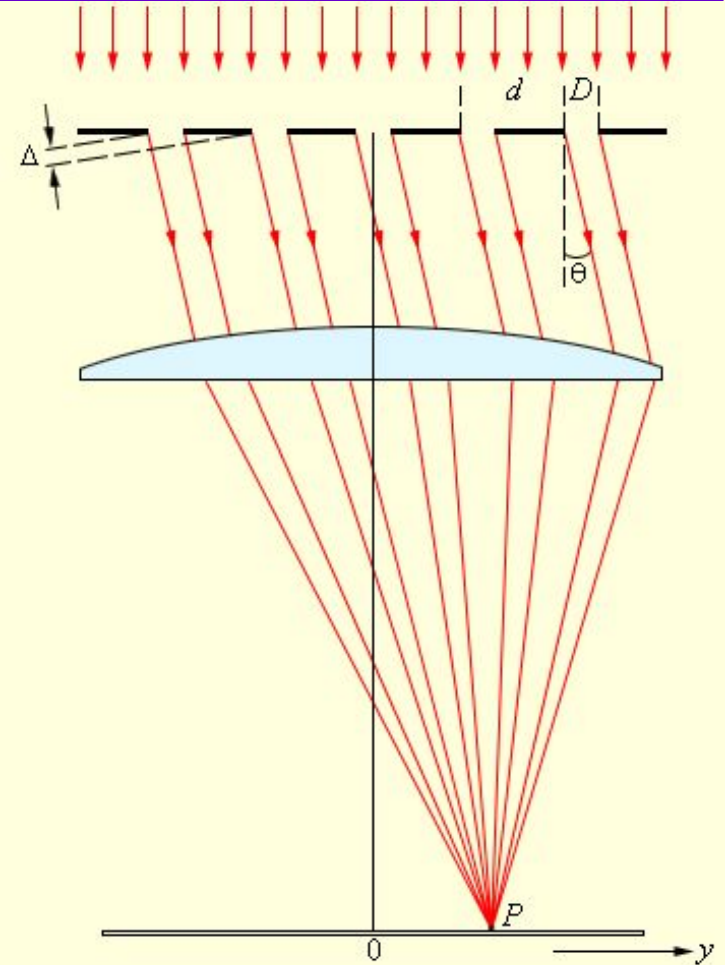


# Линейная амплитудная решетка

Амплитудной называется решетка, периодически изменяющая амплитуду проходящей через нее волны

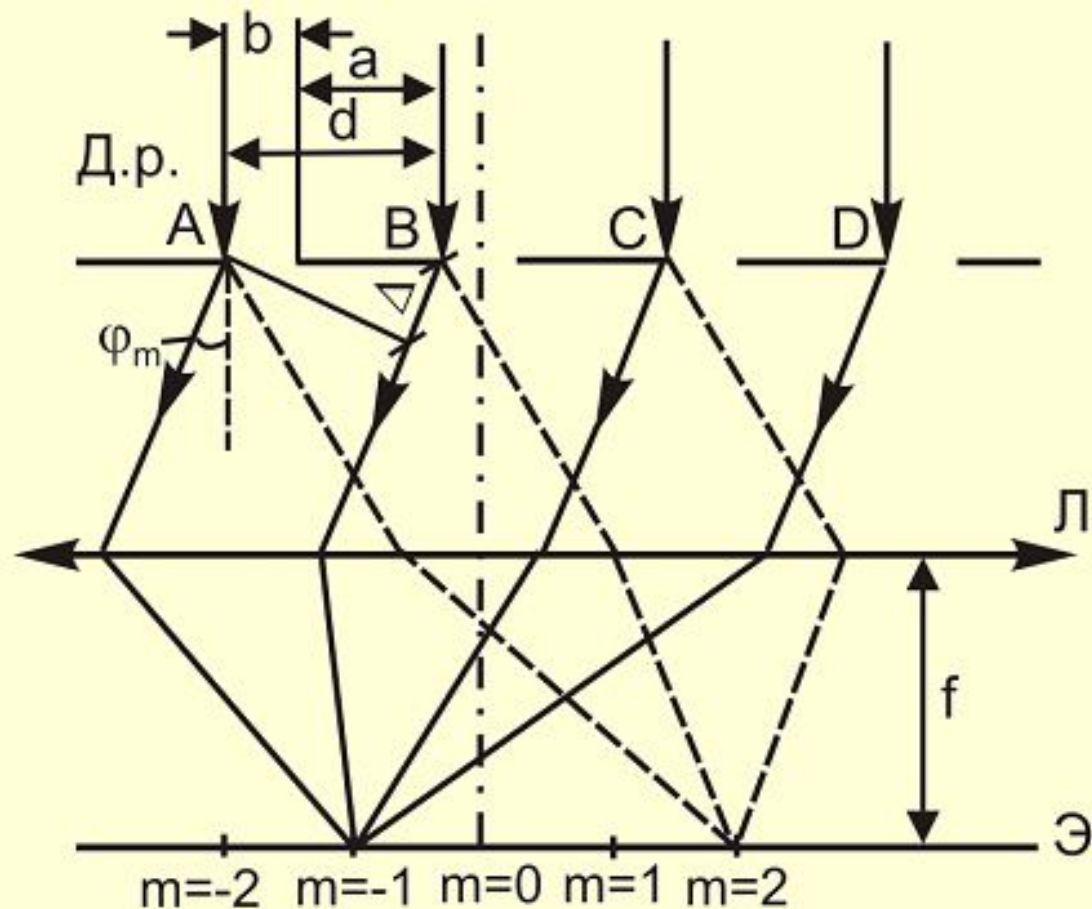


50 – 2000 штрихов на миллиметр



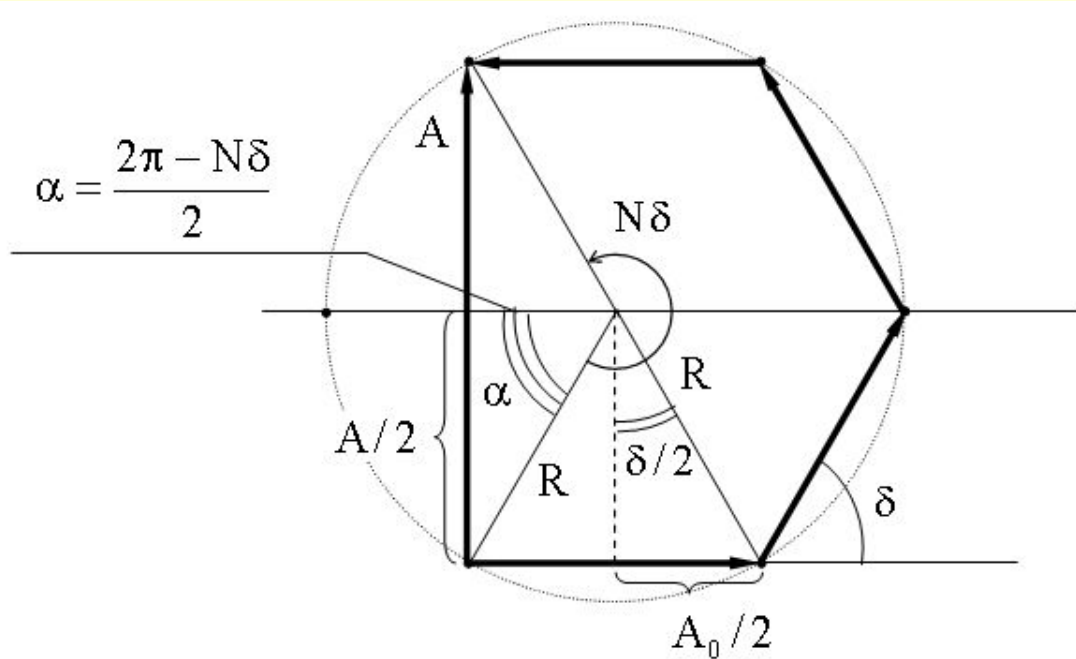
# Линейная амплитудная решетка

*Схема наблюдения спектра дифракционной решётки*



$$\Delta = d \sin \varphi$$

# Распределение интенсивности



$$\frac{A_0}{2} = R \cdot \sin \frac{\delta}{2},$$

$$\frac{A}{2} = R \cdot \sin \frac{2\pi - N\delta}{2} = R \cdot \sin \frac{N\delta}{2}.$$

$$A = A_0 \frac{\sin(N\delta/2)}{\sin(\delta/2)}$$

$$I \sim A^2$$

$$I = I_0 \frac{\sin^2(N\delta/2)}{\sin^2(\delta/2)}$$

$N$  – число источников одинаковой интенсивности ( $N > 2$ ).

$\delta$  – сдвиг фаз между соседними источниками

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta$$

$A_0$  – амплитуда от одного источника ( $E_0$ )

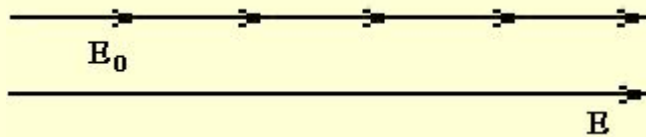
$A$  - результирующая амплитуда ( $E$ )

<http://www.bollywood.im/videos/>[многочувствительная-интерференция.html](http://www.bollywood.im/videos/многочувствительная-интерференция.html)<http://www.bollywood.im/videos/многочувствительная-интерференция.html>

# Распределение интенсивности

## Анализ картины интерференции

### 1. Главные максимумы



$$\delta = 2m\pi$$



$$E = N E_0$$



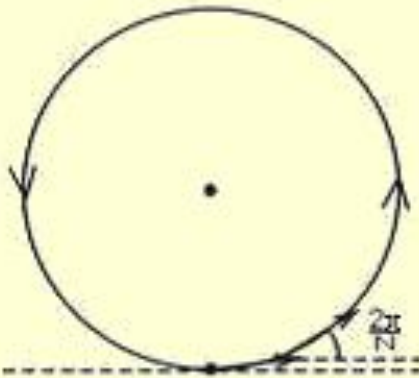
$$I = N^2 I_0$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta$$



$$\Delta_{\max} = m\lambda$$

### 2. Минимумы



$$I = 0$$

$$\delta N = k2\pi, \quad k = 1, 2, 3, \dots, N-1$$



$$\delta = k \frac{2\pi}{N} + 2m\pi$$



$$\Delta_{\min} = m\lambda + k \frac{\lambda}{N}$$

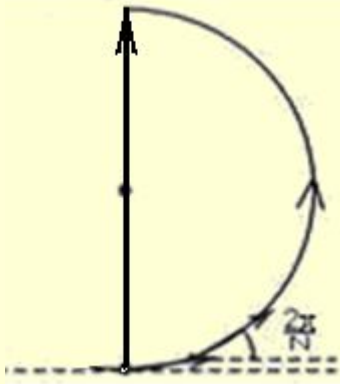
$$m = 0, 1, 2, \dots$$

1, 2, 3... окружности

# Распределение интенсивности

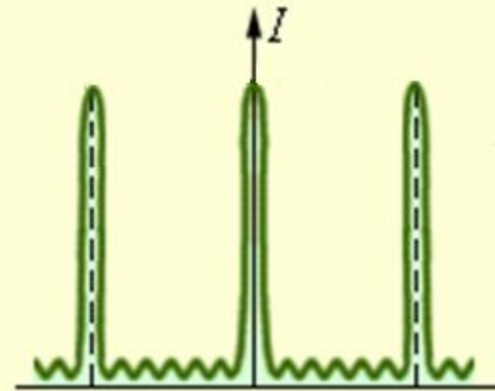
## Анализ картины интерференции

### 3. Побочные максимумы



$$\delta = (2k + 1) \frac{2\pi}{N} + 2m\pi$$

*0,5; 1,5; 2,5... окружности*

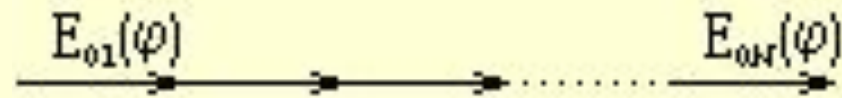
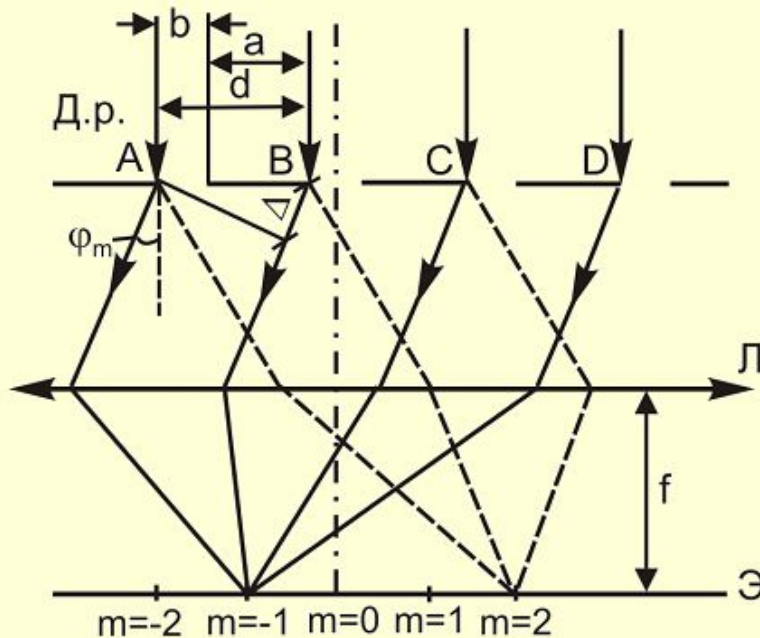


Вывод: многолучевая интерференция характеризуется большой концентрацией энергии в главных максимумах



# Картина распределения интенсивности

Пусть в направлении  $\varphi$  разность хода волн  $\Delta = m \lambda$  ( $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ), тогда разность фаз  $\Delta\Phi_{12} = m \cdot 2\pi$  - условие максимума интерференции.



Векторная диаграмма сложения колебаний от  $N$  щелей дифракционной решётки

$E_{01}(\varphi), I_{01}$  – амплитуда и интенсивность волны, идущей от каждой щели в направлении  $\varphi$ .

$$E_{\text{рез}} = N \cdot E_{01}(\varphi)$$

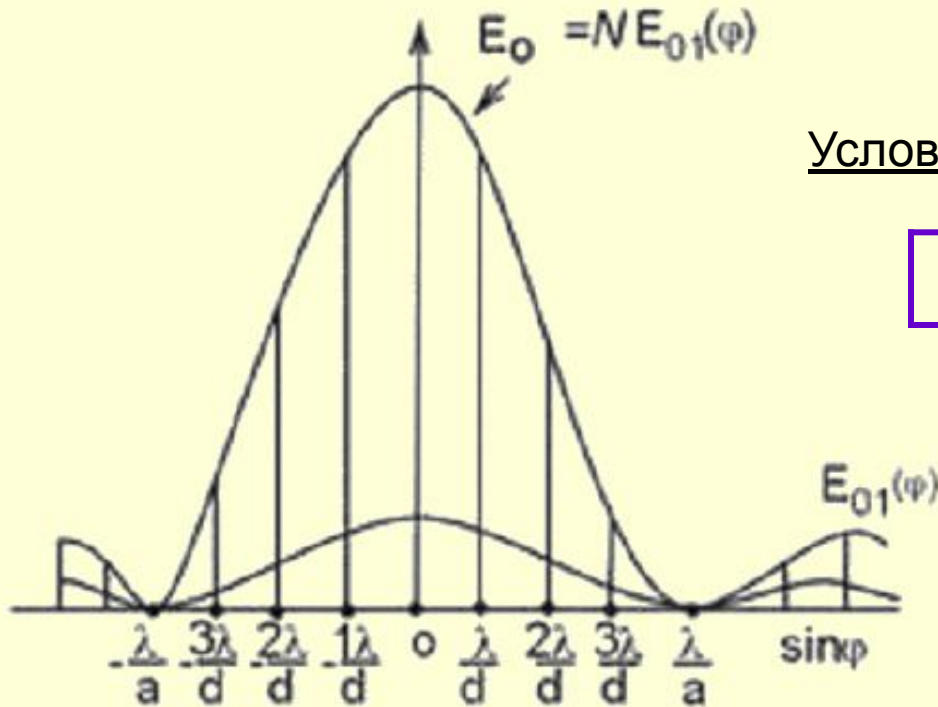
- амплитуда результирующей волны от  $N$  щелей

$$I_{\text{рез}} = N^2 \cdot I_{01}$$

- интенсивность результирующей волны



# Картина распределения интенсивности



Условие главных максимумов для решетки:

$$d \sin \varphi_{\max} = m \lambda, m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

$$\Delta \Phi_{\max} = 2\pi m$$

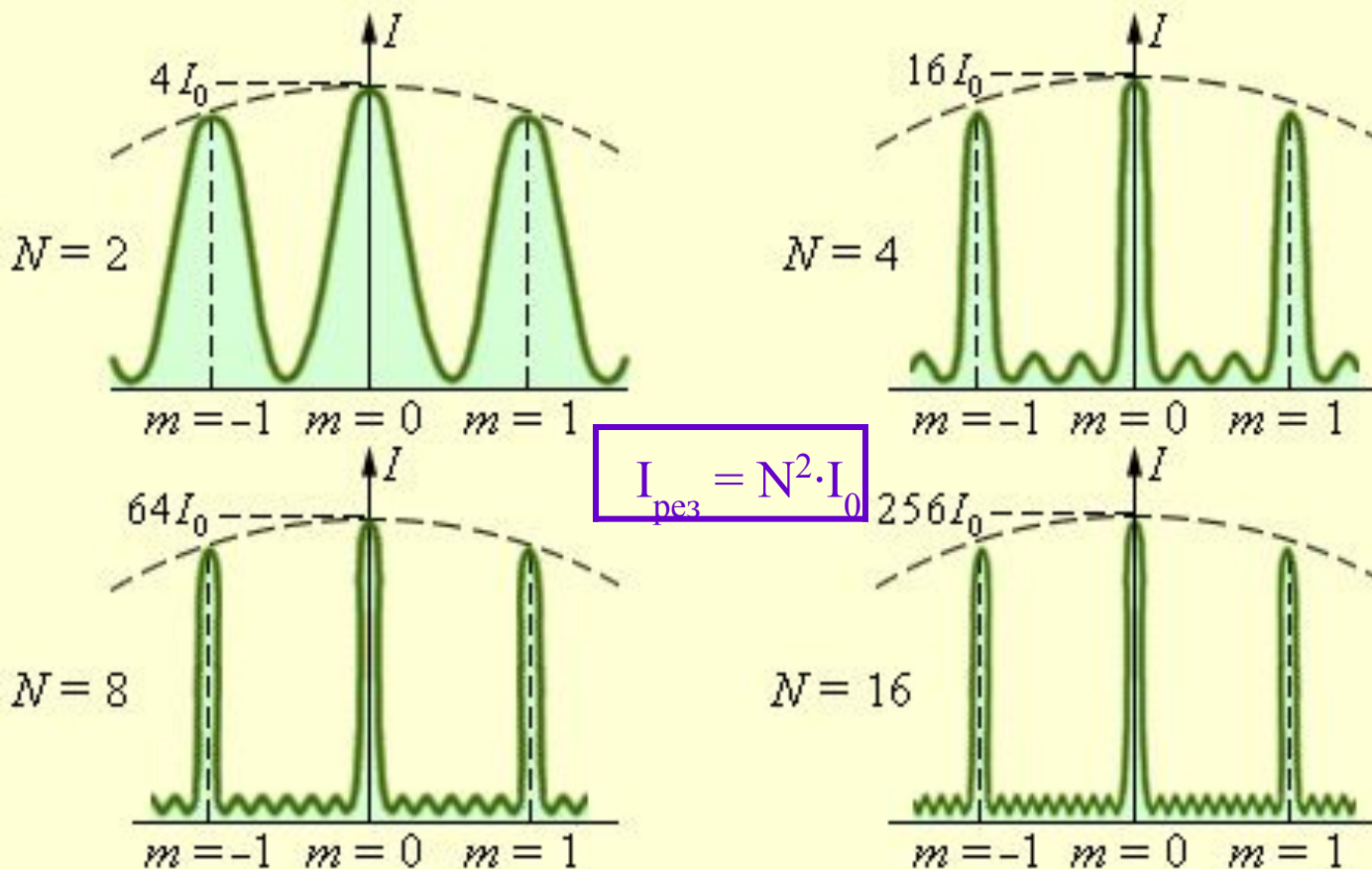
$m$  – порядок дифракционного максимума

Условие минимумов при дифракции света на решетке:

$$\Delta_{\min} = d \sin \varphi_{\min} = m\lambda + k\lambda/N, \text{ где } k = 1, 2, 3 \dots N-1$$

$$\Delta \Phi_{\min} = 2\pi m + k2\pi/N$$

## Распределение интенсивности при дифракции монохроматического света

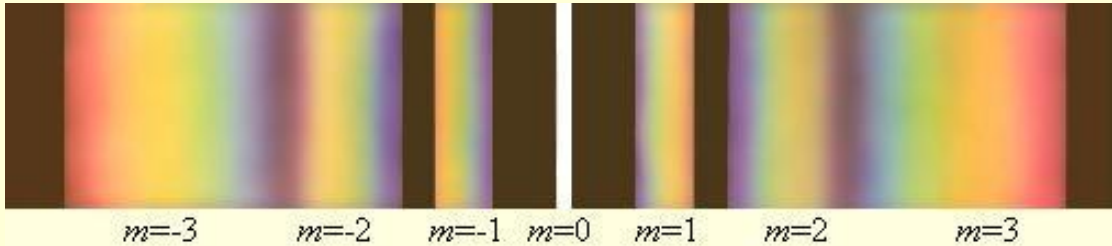


$N$  – число щелей.

$I_0$  – интенсивность колебаний при дифракции света на одной щели.

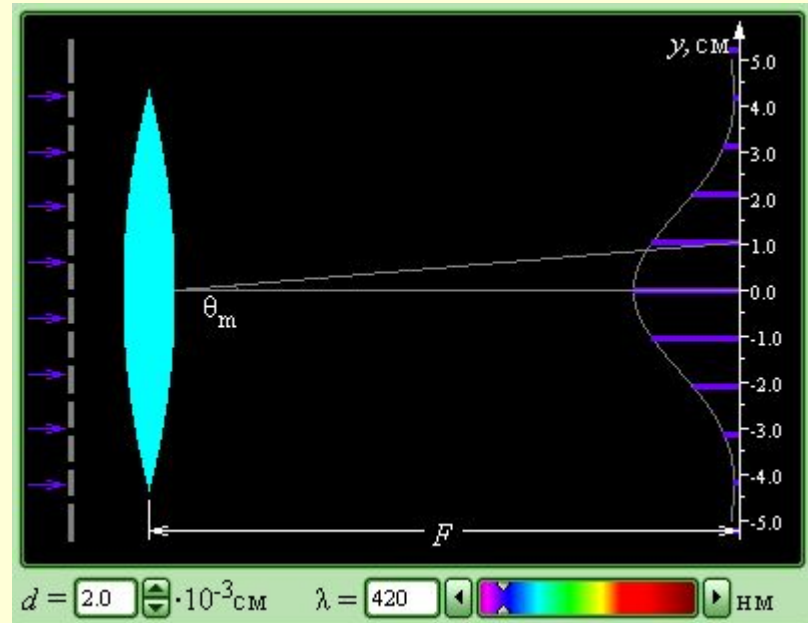
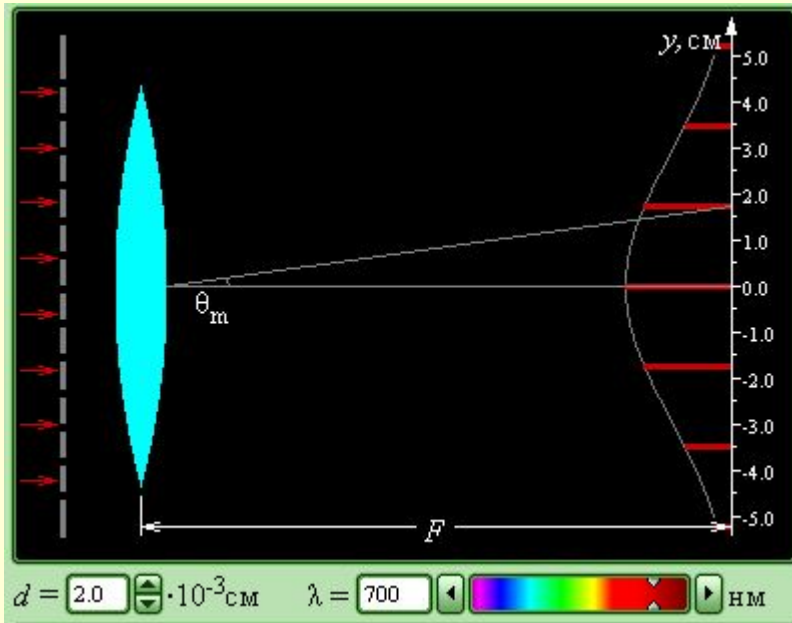
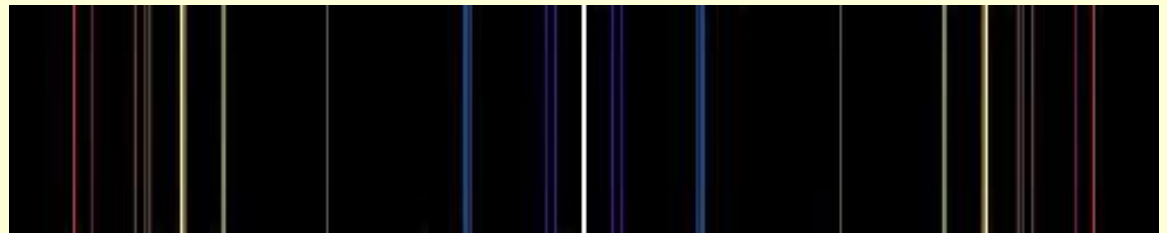
Между двумя главными максимумами располагается  $(N - 1)$  минимумов и  $(N - 2)$  побочных максимумов.

# Примеры спектров, полученных с помощью дифракционной решетки



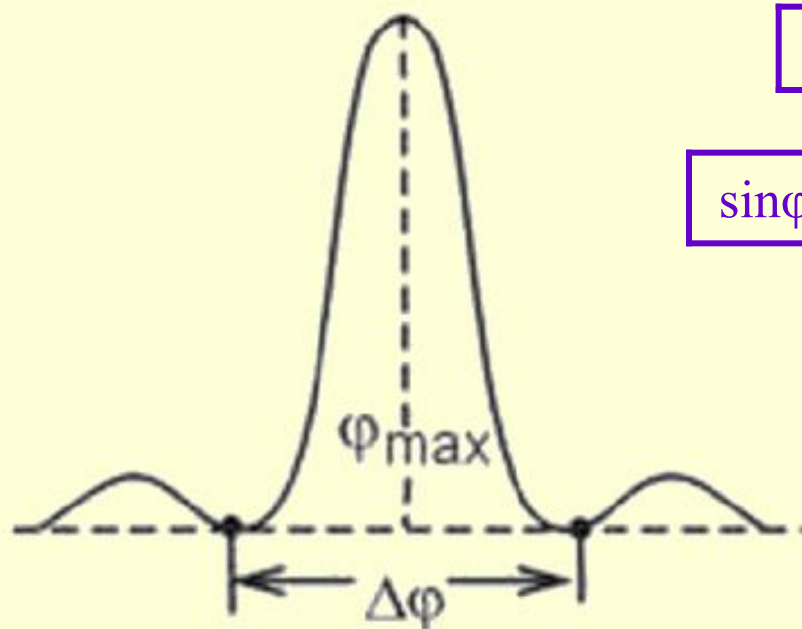
Разложение белого света в спектр

Спектр ртути ( $m = 1$ )



## Ширина спектральной линии

Угловая ширина главного максимума - расстояние между ближайшими к нему дифракционными минимумами



$$\sin \varphi_{\max} = m\lambda/d$$

→

$$\varphi_{\max} = m\lambda/d$$

$$\sin \varphi_{\min 1} = m\lambda/d + \lambda/Nd$$

→

$$\varphi_{\min 1} = \lambda/Nd$$

$$\varphi_{\max} - \varphi_{\min 1} = \lambda/Nd$$

↓

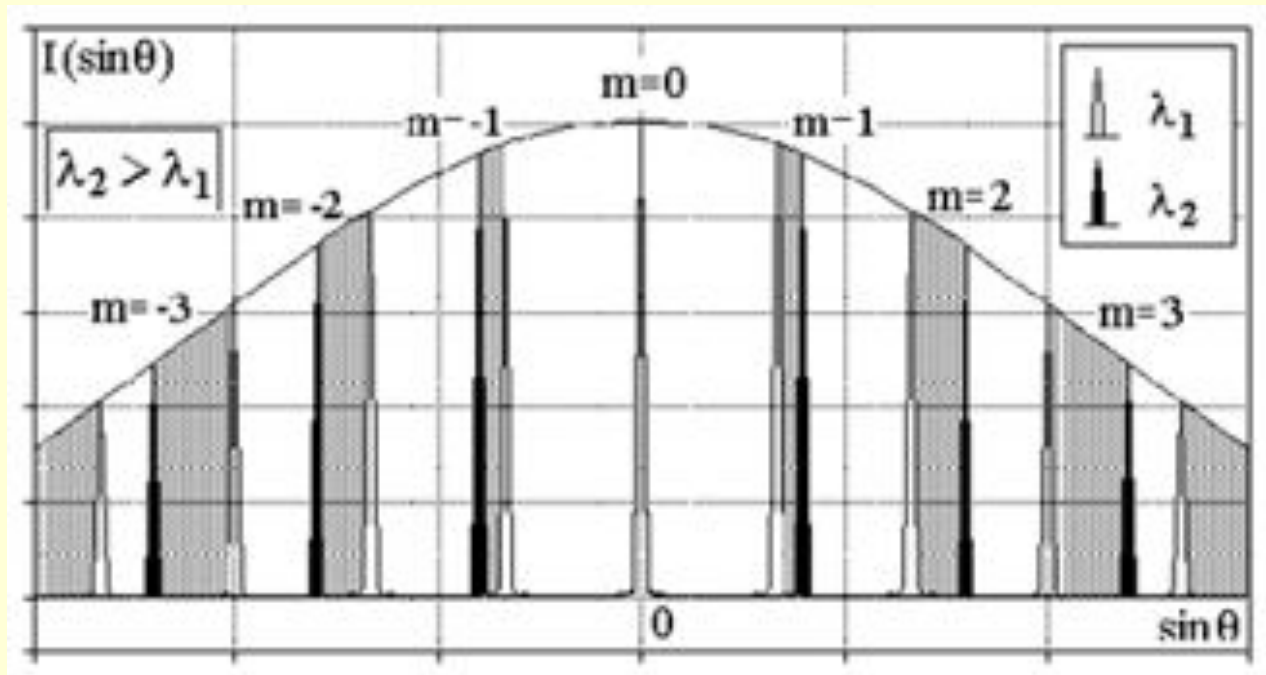
$$\Delta\varphi = 2(\varphi_{\max} - \varphi_{\min 1}) = 2\lambda/Nd = 2\lambda/L$$

( $L$  – ширина решётки)

### Выводы:

1. Чем больше число щелей  $N$ , тем уже главные максимумы.
2. Чем меньше период решётки  $d$ , тем шире главные максимумы.

## Разрешающая способность дифракционной решётки

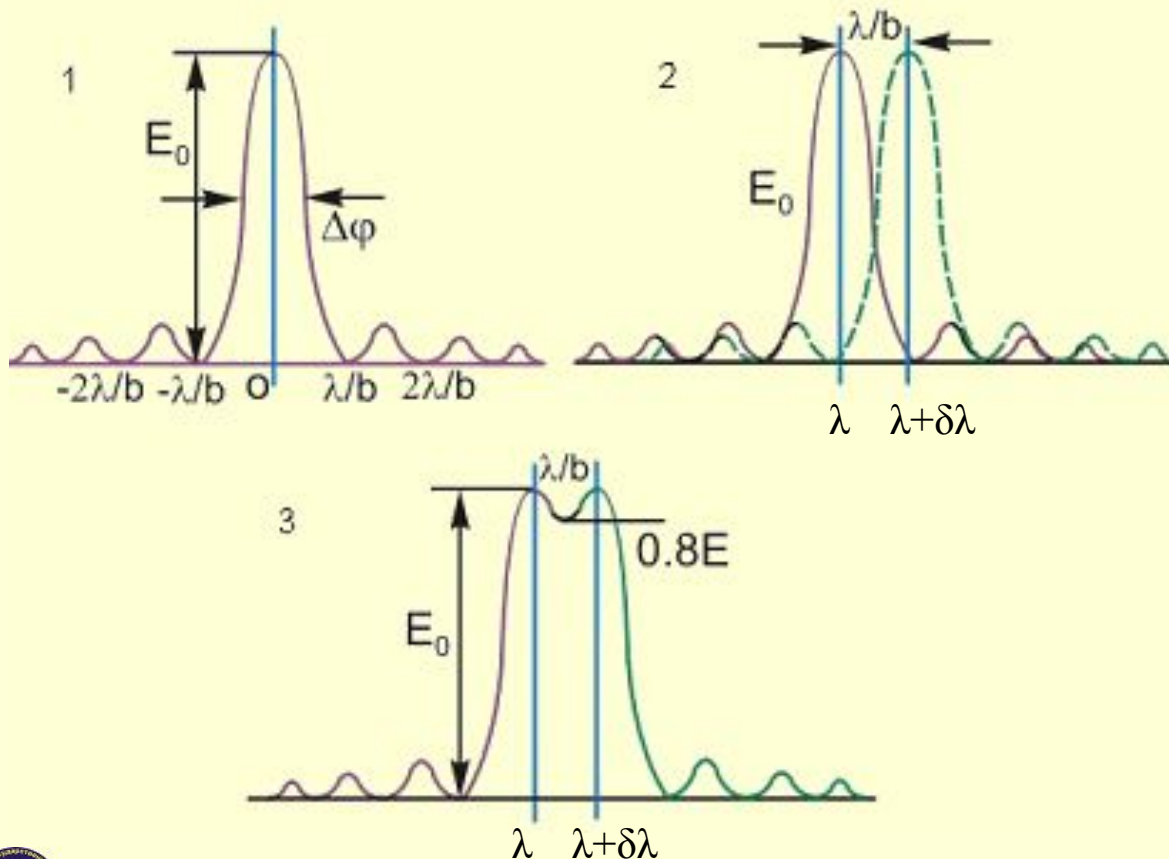


*Угловая зависимость главного максимума*

# Разрешающая способность

## Критерий Релея:

Две спектральные линии еще четко видны как отдельные, если угловое расстояние между ними не меньше половины их угловой ширины.



$b$  – ширина дифракционной решетки

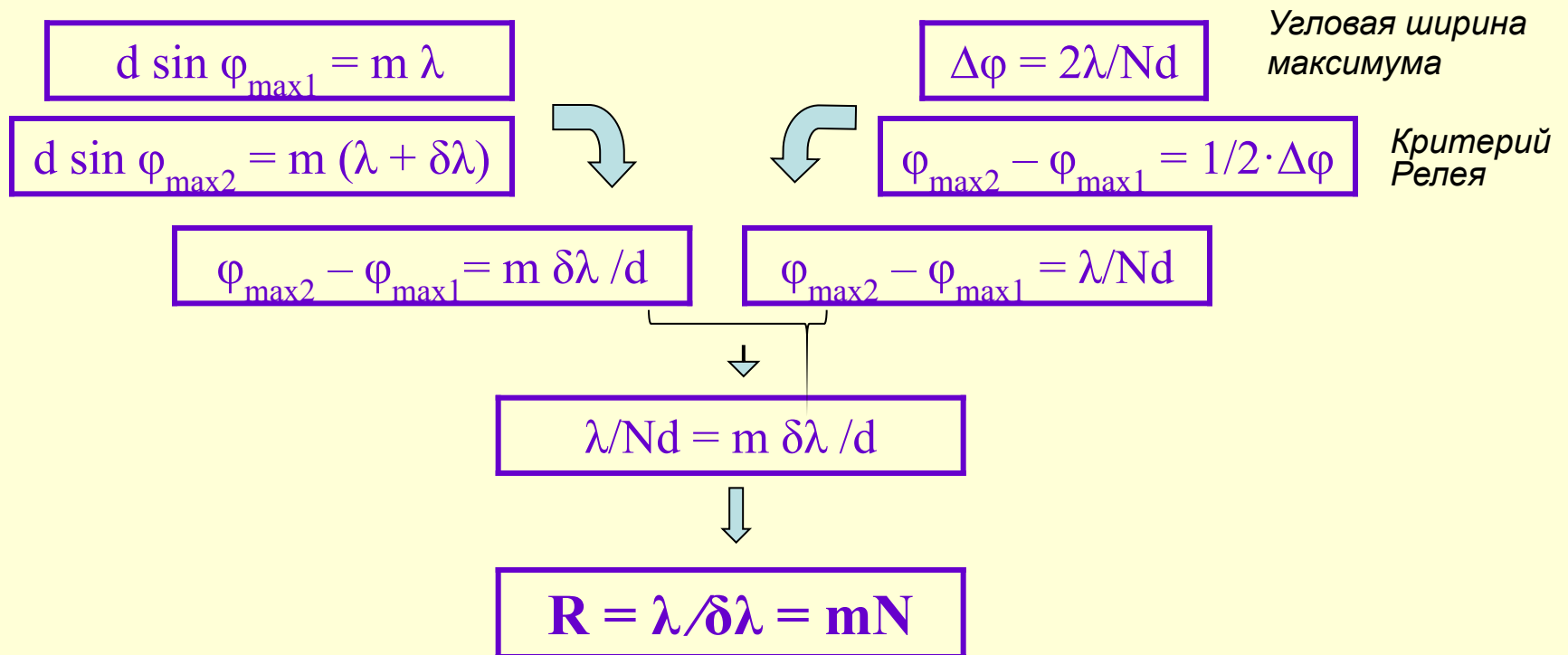
Максимум для спектральной линии, соответствующей длине волны  $\lambda$ , расположен там же, где и минимум для линии, соответствующей длине волны  $(\lambda + \delta\lambda)$

# Разрешающая способность

$$R = \lambda / \delta\lambda$$

- разрешающая способность решётки,
- где  $\delta\lambda$  – минимальная разница длин волн, разрешаемая спектральным аппаратом в данном порядке спектра

**Разрешающая способность  $R$**  обусловлена угловой шириной главного максимума и определяет возможность раздельного наблюдения двух близких спектральных линий.





# Элементы голографии

- **Физические основы голографической записи изображений**
- **Голографирование в плоских волнах**
- **Голограмма точки**
- **Толстослойные голограммы**
- **Свойства голограмм**
- **Применение голограмм**

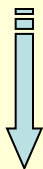


# Физические основы голографической записи



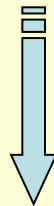
**Голография** (от греч. hólos – весь, полный и grapho – пишу, черчу, рисую) — полная запись, метод получения объёмного изображения объекта, основанный на интерференции и дифракции волн.

$$I \sim E_m^2$$



Черно-белая  
фотография

$$I, \omega$$



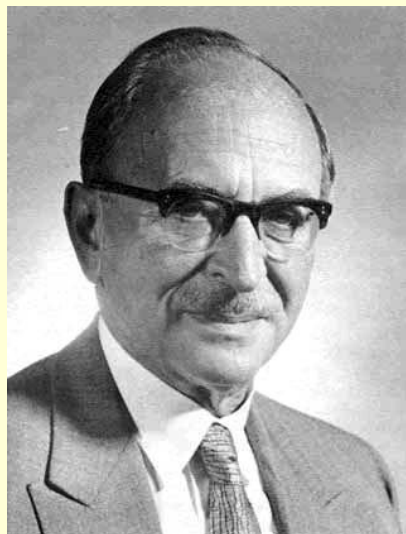
Цветная  
фотография

$$I, \omega, \varphi, \\ \text{поляризация}$$



Голография

# Физические основы голографической записи



**Габор Деннис.** В 1948—51 построил общую теорию голографии и получил первые голограммы. Лауреат Нобелевской премии по физике 1971 г. «за изобретение и развитие голографического метода»



Э. Лейт



Ю. Упатниекс



В 1962 г. **И. Лейт** и **Ю. Упатниекс** получили первые пропускающие голограммы объемных объектов, выполненные с помощью лазера.



# Физические основы голографической записи

<http://www.holography.ru/physrus.htm>

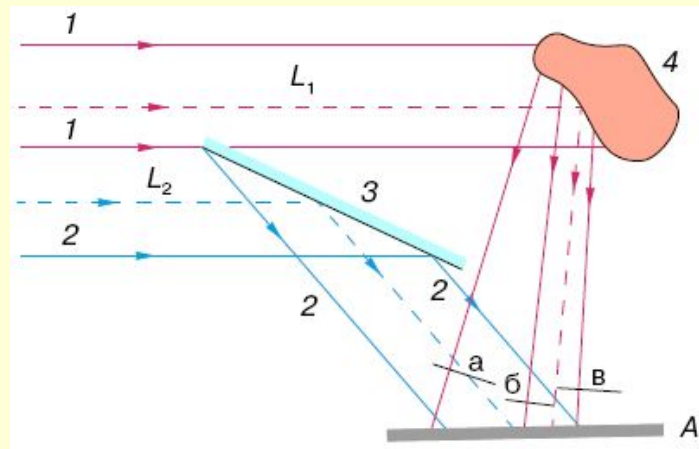


Схема записи пропускающей голограммы

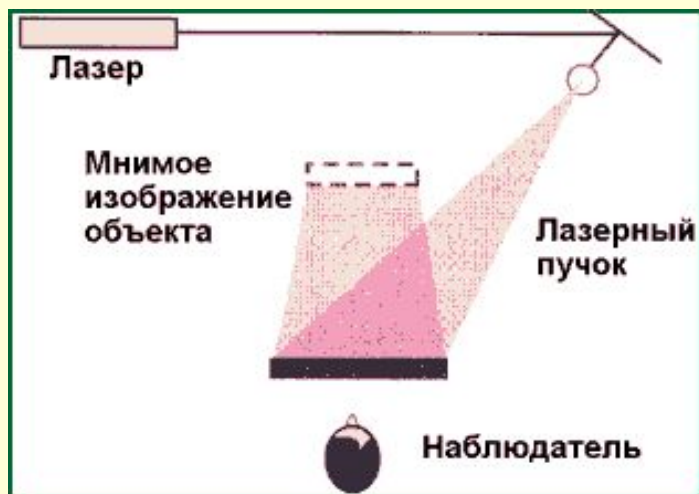
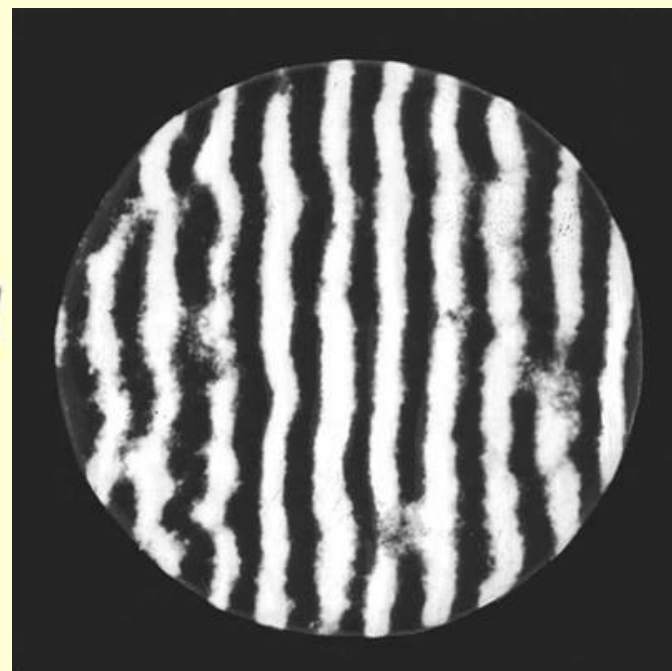
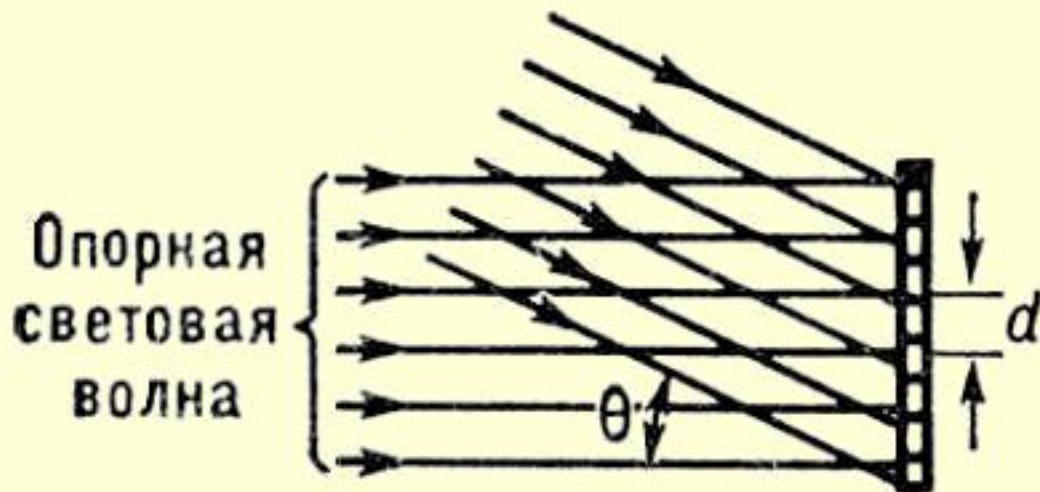


Схема восстановления изображения, записанного на пропускающей голограмме.



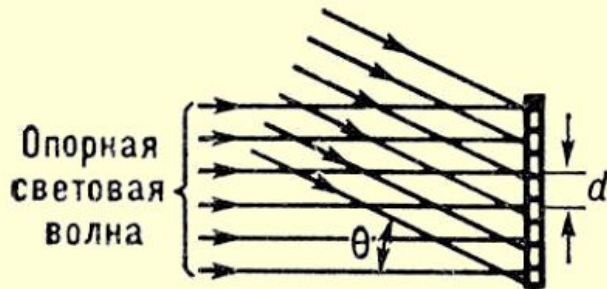
## Голографирование в плоских волнах



*Получение голограммы в случае интерференции двух плоских световых волн (опорной и предметной):  $\theta$  — угол между направлениями распространения опорной и предметной волн;  $d$  — расстояние между соседними тёмными полосками картины.*

*Структура голограммы, видимая в микроскоп.*

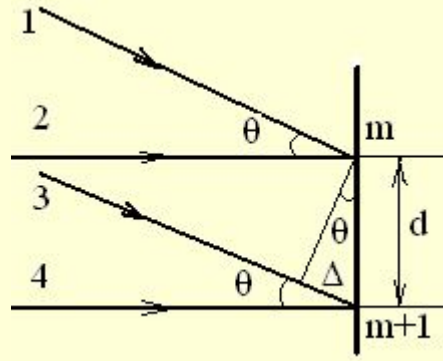
## Голографирование в плоских волнах



$$I = I_{np} + I_{on} + 2 (I_{np} I_{on})^{1/2} \cos \Delta\Phi$$

$$I = I_{np} = I_{on} = I_0$$

$$I = 4I_0 \cos^2 (\Delta\Phi/2)$$

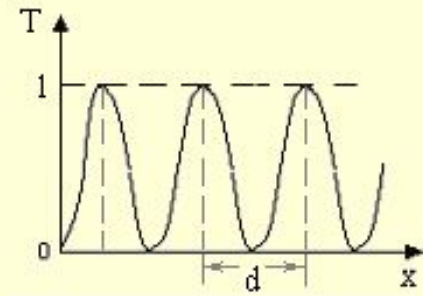


$$\Delta_{12} = m\lambda; \quad \Delta_{34} = (m+1)\lambda$$

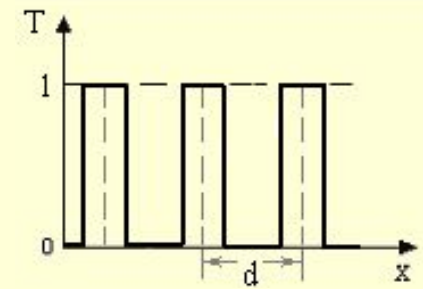
$$\Delta = \Delta_{34} - \Delta_{12} = d \sin \theta = \lambda$$

$$d = \lambda / \sin \theta$$

## Пропускание дифракционных решеток



голографической



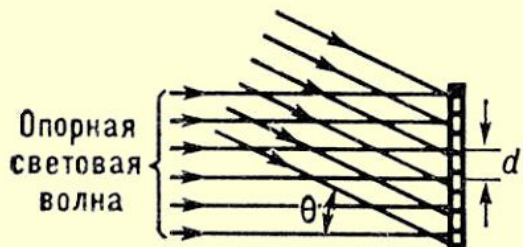
искусственной

$d$  – период голографической дифракционной решетки



# Голографирование в плоских волнах

## Восстановление изображений с помощью голограммы

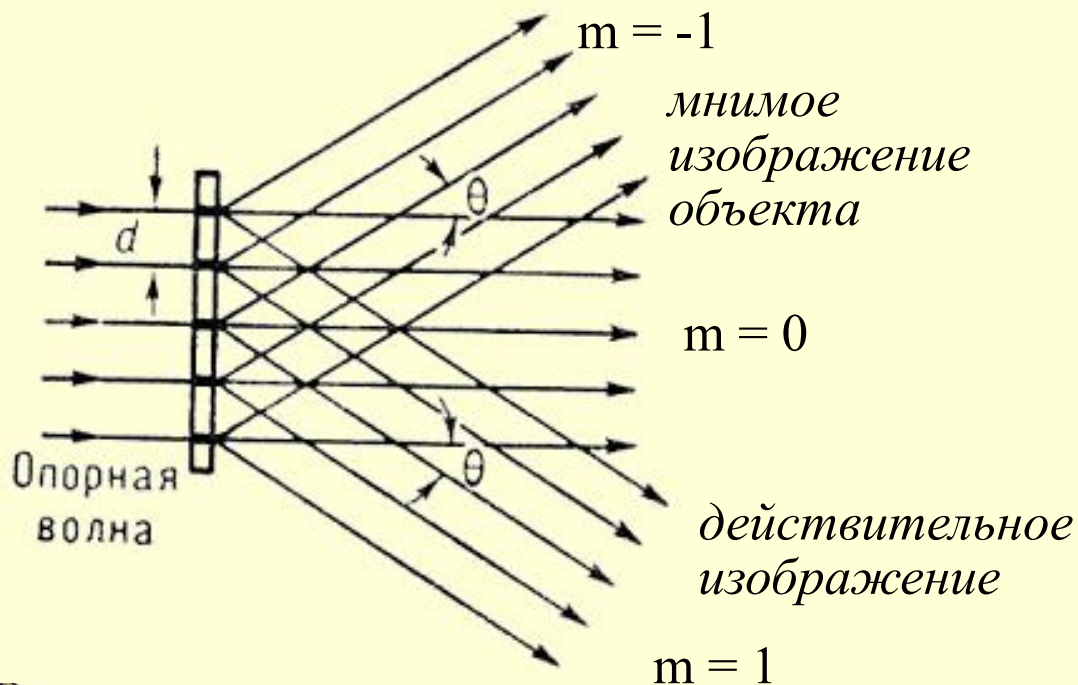


Условие главных максимумов на дифракционной решетке:

$$d \sin \varphi = m \lambda$$

$$m = 1 \quad d = \lambda / \sin \theta$$

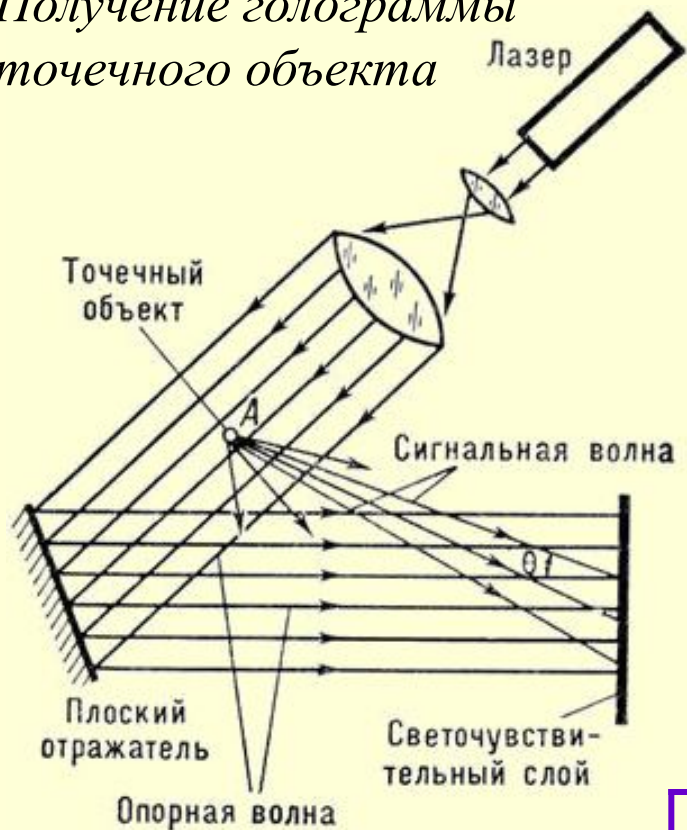
$$\varphi = \theta$$



Характеристики волны такие же, как у предметной

# Голограмма точки

Получение голограммы  
точечного объекта



Геометрическое место точек, до которых опорная и предметная волны доходят одной фазе – окружность.

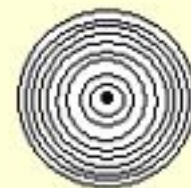
Голограмма – темные и светлые кольца

$$AO_k - b = k\lambda / 2 \quad k = 2m - \text{max}$$

$$AO_k = b + k\lambda / 2 \quad k = (2m+1) - \text{min}$$

$$r_k^2 = (b + k\lambda / 2)^2 - b^2$$

$$r_k^2 = k\lambda b$$

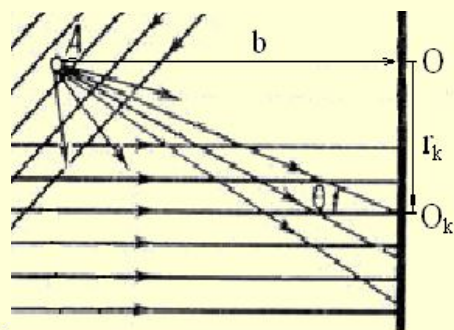


Голограмма точки – зонная пластинка Френеля.

$$2r_k \Delta r_k = \lambda b \Delta k$$

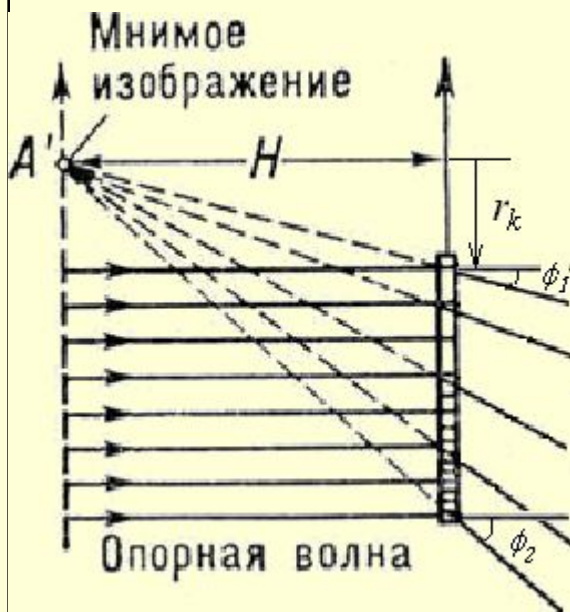
$d = \Delta r_k$  при  $\Delta k = 1$  –  
период решетки

$$d = \lambda b / r_k \neq \text{const}$$





# Голограмма точки – стадия восстановления изображения



Условие главных максимумов на дифракционной решетке:

$$d \sin\varphi = m\lambda$$

$$d = \lambda b / r_k$$

$$\sin\varphi = m r_k / b$$

$$m=0; \varphi = 0$$

$$m=-1; \sin\varphi = -r_k/b$$

Пучок – расходящийся, мнимое изображение – т.А'

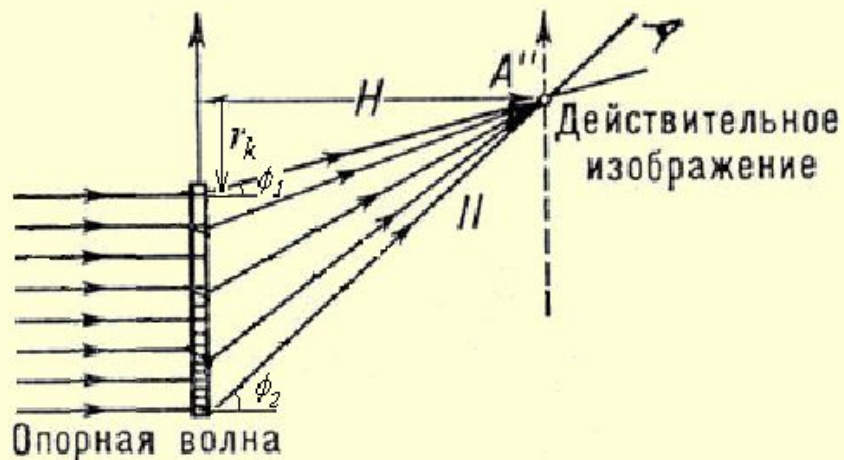
$$H = r_k \operatorname{tg}\varphi_k$$

$$\sin\varphi \approx \operatorname{tg}\varphi$$

$$H \approx b$$

– мнимое изображение там же, где был предмет.

# Голограмма точки – стадия восстановления изображения

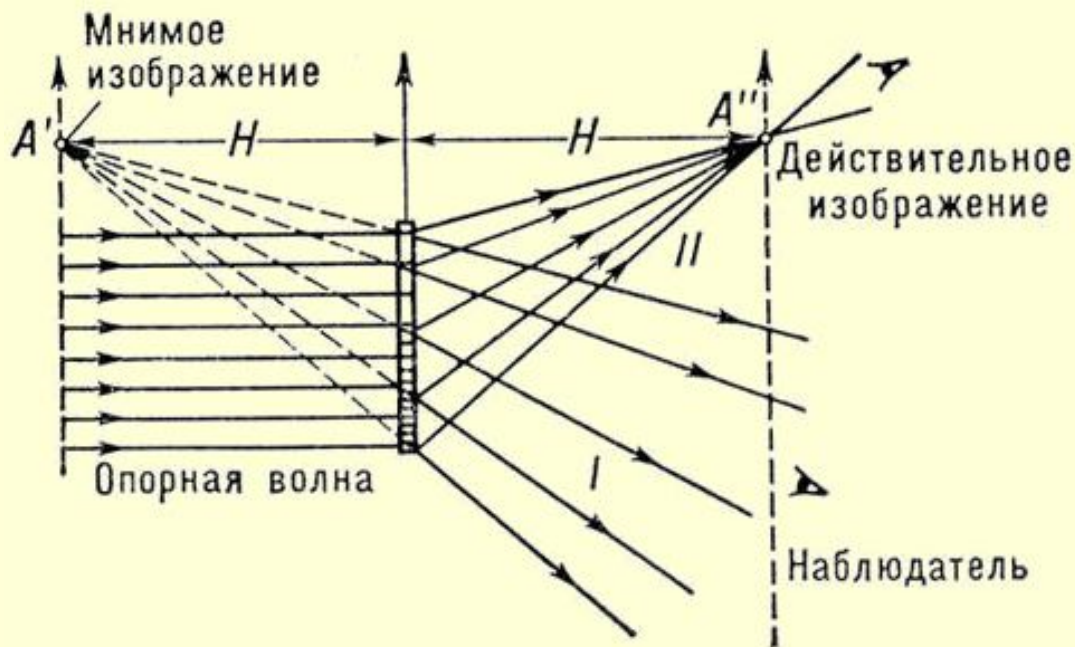


$$m=0; \varphi = 0$$

$$m=+1; \sin\varphi = + r_k / b$$

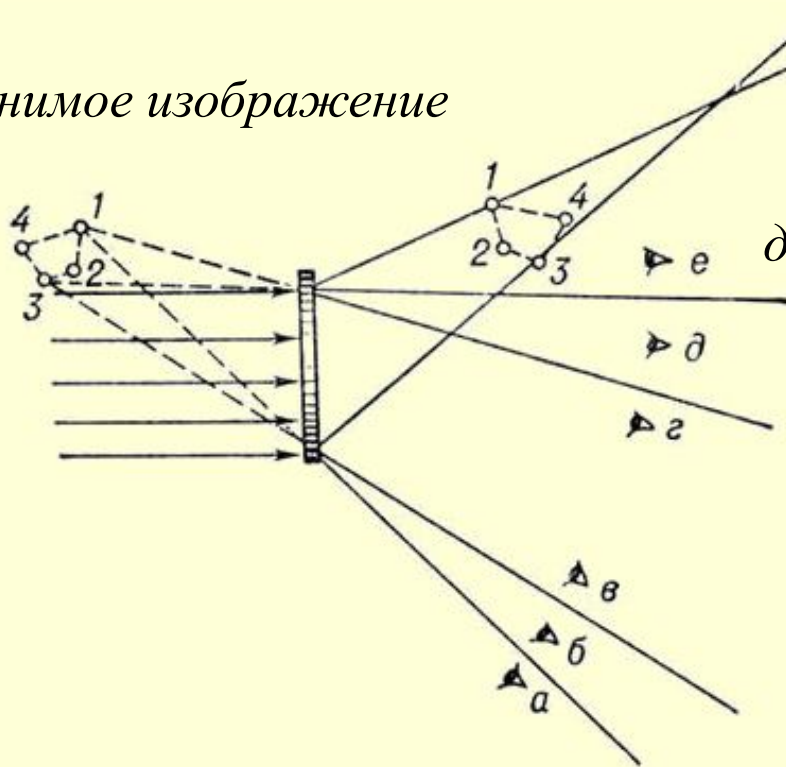
Пучок –сходящийся, т. А'' –  
действительное изображение

*Действительное А'' и мнимое А' изображения точки А; Н —  
расстояние от объекта до  
голограммы*



# Объёмность голографических изображений

*мнимое изображение*



*действительное изображение*

*Голограммы объекта,  
состоящего из четырёх  
точек*



## Объёмность голографических изображений



*Фотографии мнимого голографического изображения шахматных фигур, полученные при разных направлениях наблюдения*





# Толстослойные голограммы Денисюка

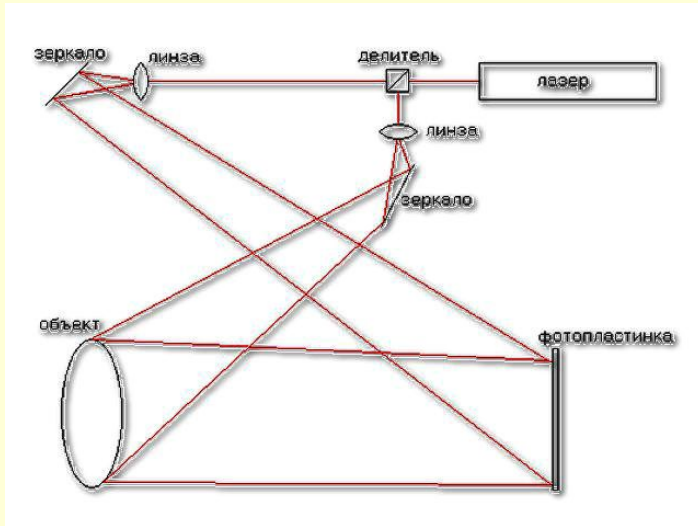


Схема Лейта-Упатниекса

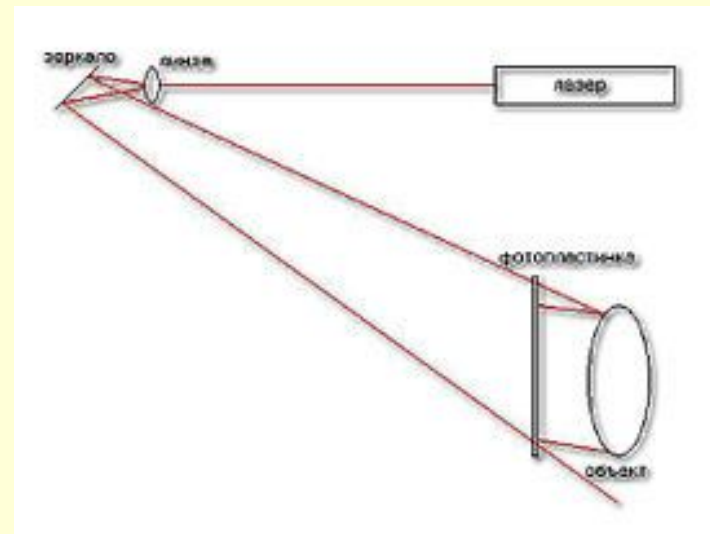
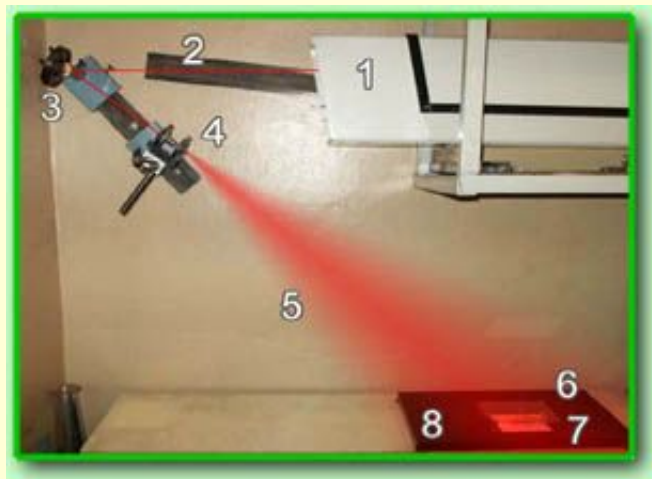


Схема Денисюка



# Толстослойные голограммы Денисюка

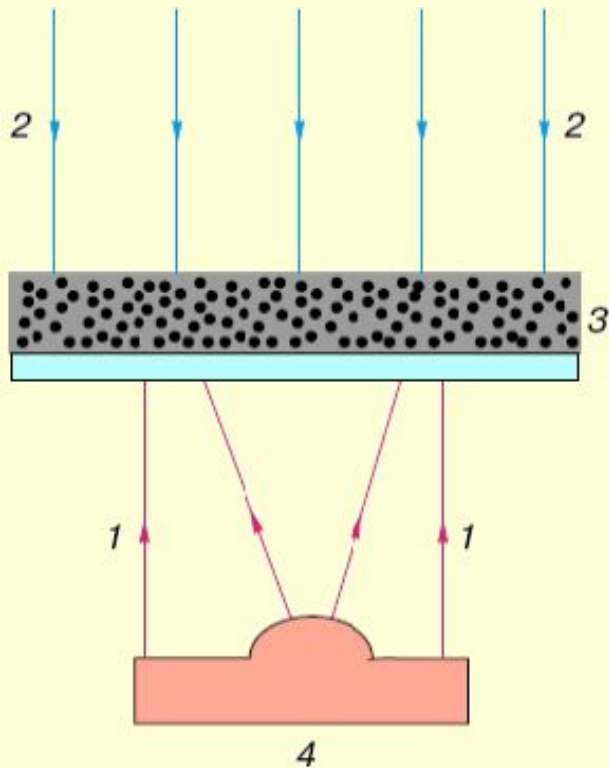


Схема записи

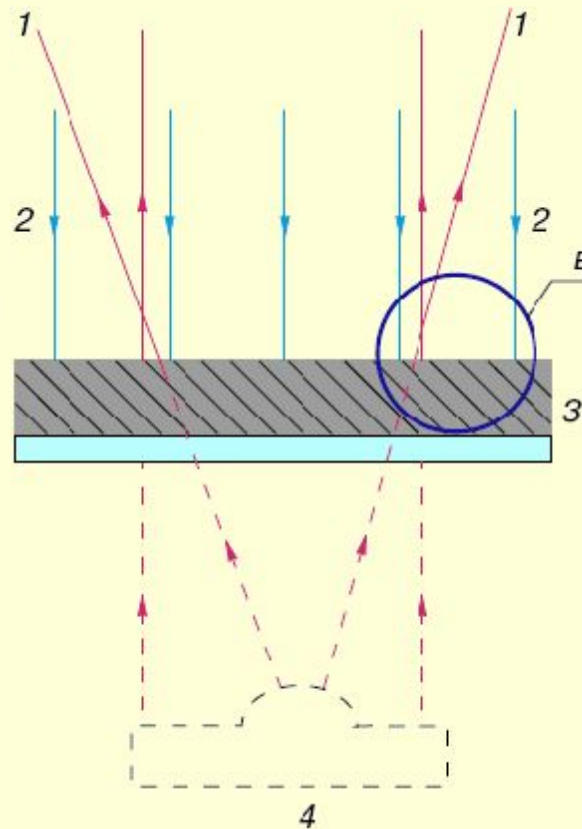


Схема воспроизведения

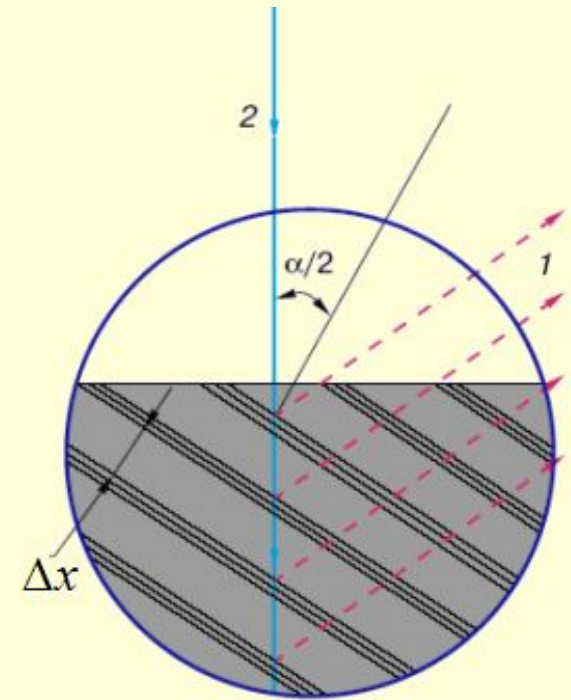
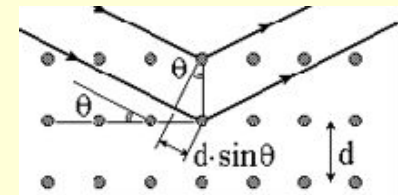


Схема интерференции  
отраженных волн



$$\Delta x = \frac{\lambda}{2 \sin(\alpha / 2)}$$

1,2 – предметная и опорная волны,  
3 – фоточувствительный слой, 4 - предмет

# Толстослойные голограммы Денисюка



*Голографический портрет  
Ю.Н. Денисюка*



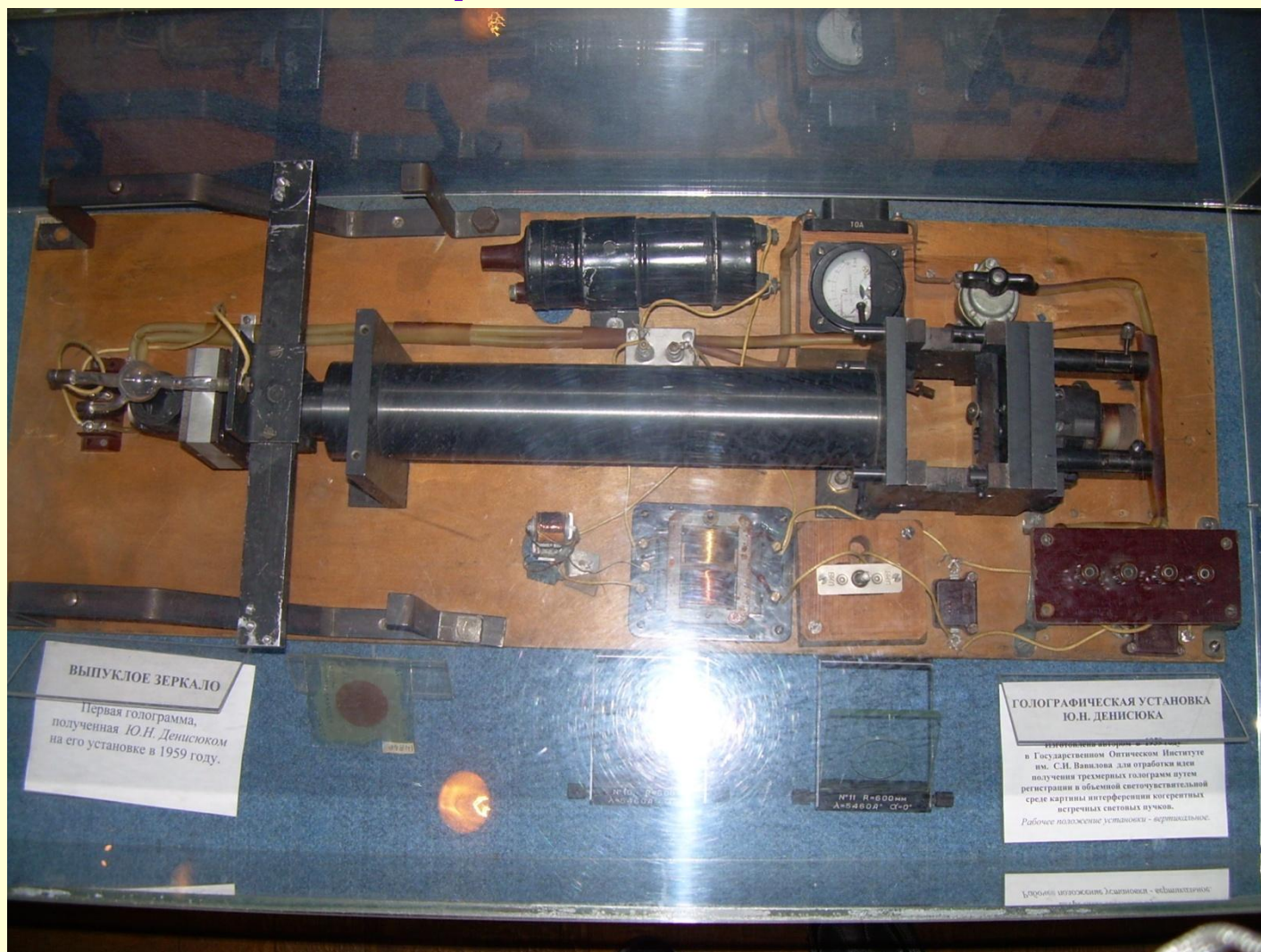
*Система плоскостей почернения  
является встроенным фильтром*

Преимущество - голограммы видны в обычном свете, при восстановлении голограмма действует как интерференционный фильтр.





# Голограммы Денисюка



Голографическая установка Ю.Н. Денисюка, 1959г.,  
Москва, Политехнический музей

[ВИДЕО](#)

## Радужные голограммы



С. Бентон

В 1969 г. Стивен Бентон из Polaroid Research Laboratories (США) изготовил пропускающую голограмму, видимую в обычном белом свете. Голограммы, изобретенные Бентоном, были названы радужными, так как они переливаются всеми цветами радуги, из которых состоит белый свет. Открытие Бентона позволило начать массовое производство недорогих голограмм путем "штамповки" интерференционных картин на пластик. Голограммы именно такого типа применяются сегодня для защиты от подделок документов, банковских карточек и т.д. Благодаря Бентону голография обрела популярность в широких слоях общества.

# Свойства голограмм

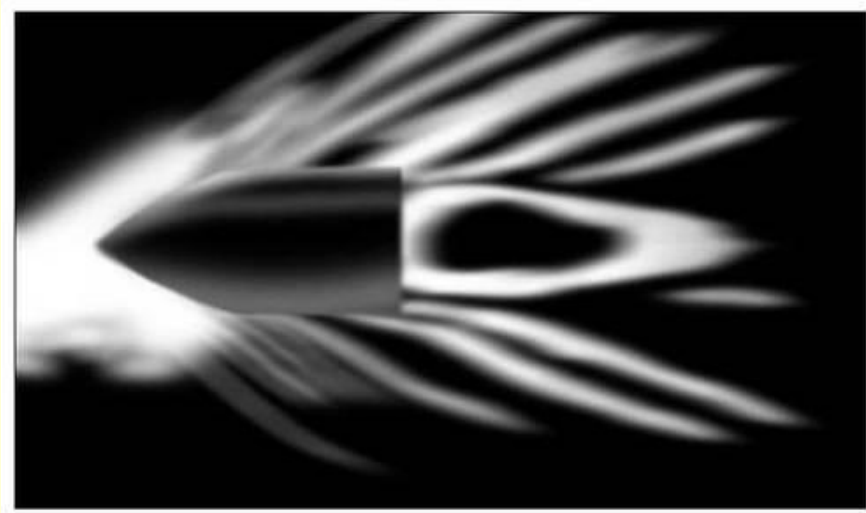


- Каждый участок голограммы содержит информацию обо всём объекте и поэтому позволяет восстановить полное изображение объекта. Следствием этого является высокая надёжность хранения информации, записанной в виде голограммы.
- При уменьшении размера голограммы  $D$  ухудшается лишь разрешающая способность изображения.
- При просвечивании голограмм можно изменить длину опорной волны  $\lambda$ . В этом случае наблюдаются 2 изображения, но на другом расстоянии  $H'$  от голограммы:  $H' = H \lambda_1 / \lambda_2$ .  $H$  — расстояние между объектом и голограммой при съёмке,  $\lambda_1$  — длина опорной волны при съёмке, а  $\lambda_2$  — при просмотре голограммы. Таким способом можно сделать видимыми изображения объектов, полученных с помощью радиоволн или инфракрасного, ультрафиолетового и рентгеновского излучений.



## Свойства голограмм

- При просмотре голограмм можно менять форму волнового фронта опорной волны. Освещая голограмму расходящейся сферической волной, можно наблюдать увеличенное изображение предмета. На этом основано устройство голографического микроскопа. Заменяя расходящуюся волну на плоскую можно уменьшить и приблизить изображение.
- Качество голографических изображений зависит от монохроматичности излучения лазеров, разрешающей способности фотоматериалов, условий съёмки. При использовании мощных импульсных лазеров (до  $10^{-9}$  сек) легко получать голограммы объектов, движущихся со скоростями порядка 1000 м/сек.



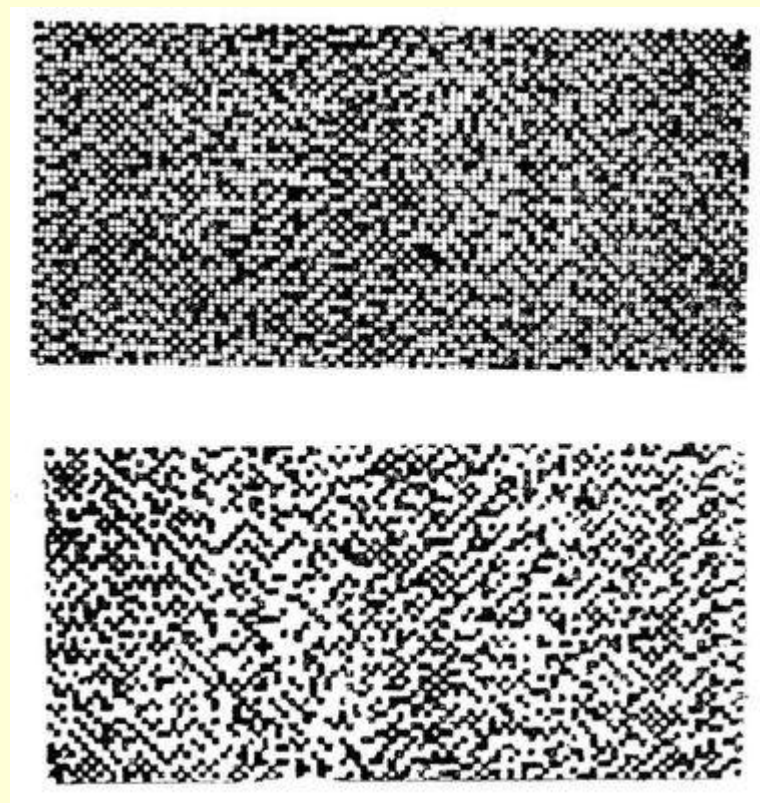
*Голографическое изображение летящей пули*



# Применение голографии

- Музейные выставки, художественная голография
- Создание объёмного цветного телевидения
- Создание новых систем памяти с большой плотностью записи

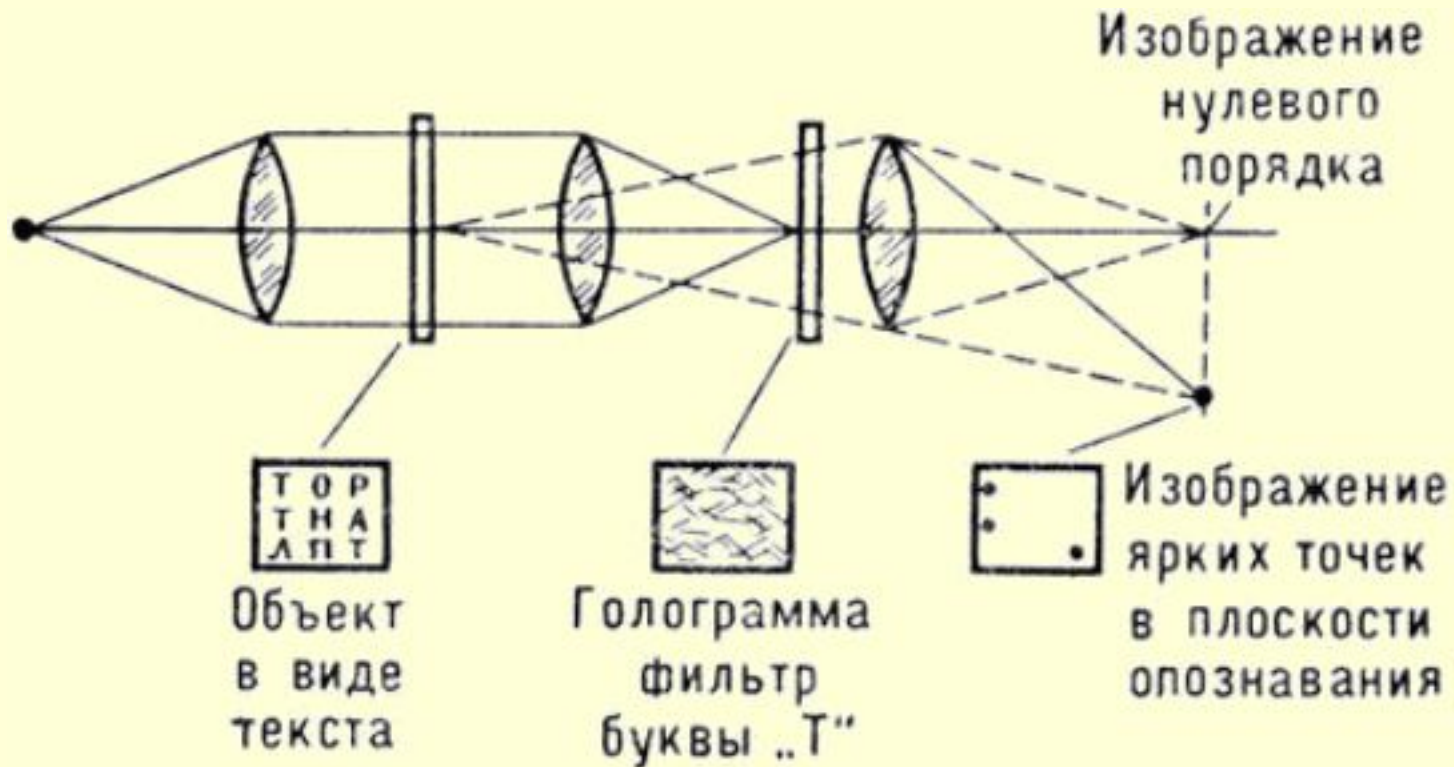
*Транспарант (матрица)  
голографического  
запоминающего устройства*



*Изображение матрицы*

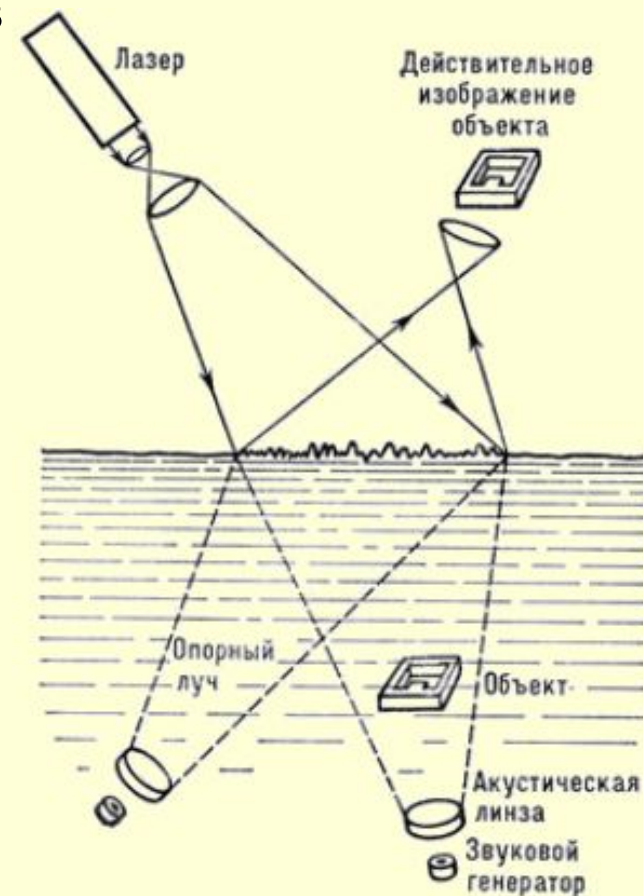
# Применение голографии

- Создание устройств для поиска заданной информации и опознавания образов (автоматическое чтение информации, классификация различных объектов, дешифровка сложных изображений, кодирование информации)



# Применение голографии

- Создание специальных «голографических объективов», заменяющих линзовые объективы и свободных от aberrаций, дифракционных решеток, светофильтров
- Создание акустических голограмм (в частности, для исследований внутренних органов животных и людей)
- Создание радужных голограмм (реклама, дизайн)



*Голографическое звуковидение*

# Применение голографии

- **Голографическая 3D-карта местности**

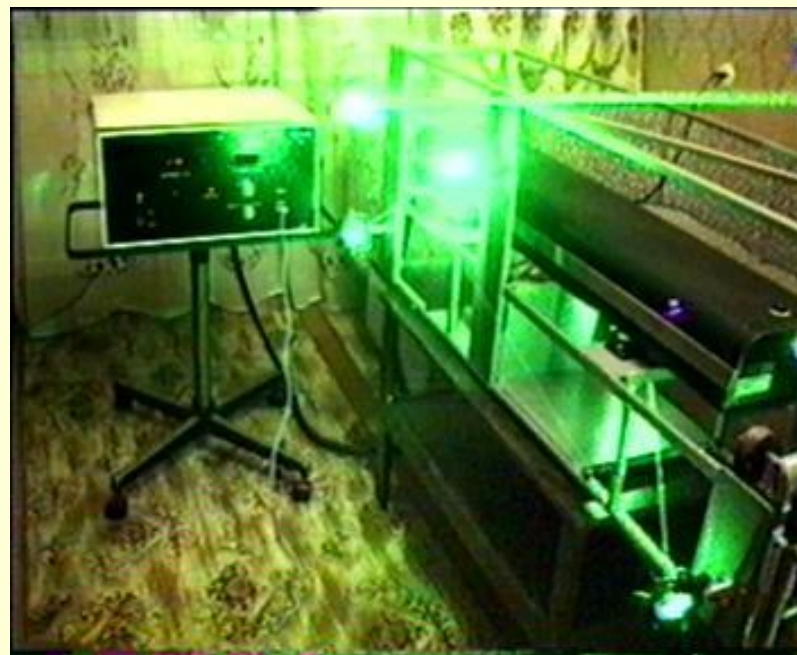
Компания Zebra Imaging производит удивительные голографические 3D-карты местности, и поверьте, технология эта куда круче, чем обычное стереоскопическое 3D. Они изготавливаются на специальной пленке с применением лазеров и благодаря этому обладают впечатляющим набором свойств. Карты достаточно детальные, полноцветны, их можно спокойно свернуть, сделать на них пометку маркером. При этом карты Zebra Imaging можно обойти кругом – чтобы получить максимальное точное представление об объекте. Глядя же на многоканальную карту, возможно увидеть не только фасады, но и интерьер зданий. Кроме того, для просмотра таких карт не нужны специальные очки – это как минимум значит, что ими могут пользоваться одновременно несколько человек. Стоимость карт Zebra Imaging колеблется от 1000 до 3000 долларов, их заказывают военные ведомства.



# Применение голографии

**Импульсная голография** – возможность фиксировать и анализировать быстро протекающие процессы:

- изучение следов (треков) частиц
- изучение динамики распределения неоднородностей в туманах, жидкостях и других прозрачных средах
- интерферометрия - измерение малых (порядка долей мкм) деформаций объектов, обусловленных вибрацией, нагреванием, неразрушающий контроль изделий; исследование взрывов, ударных волн



*Импульсная голографическая установка «Green Star»*