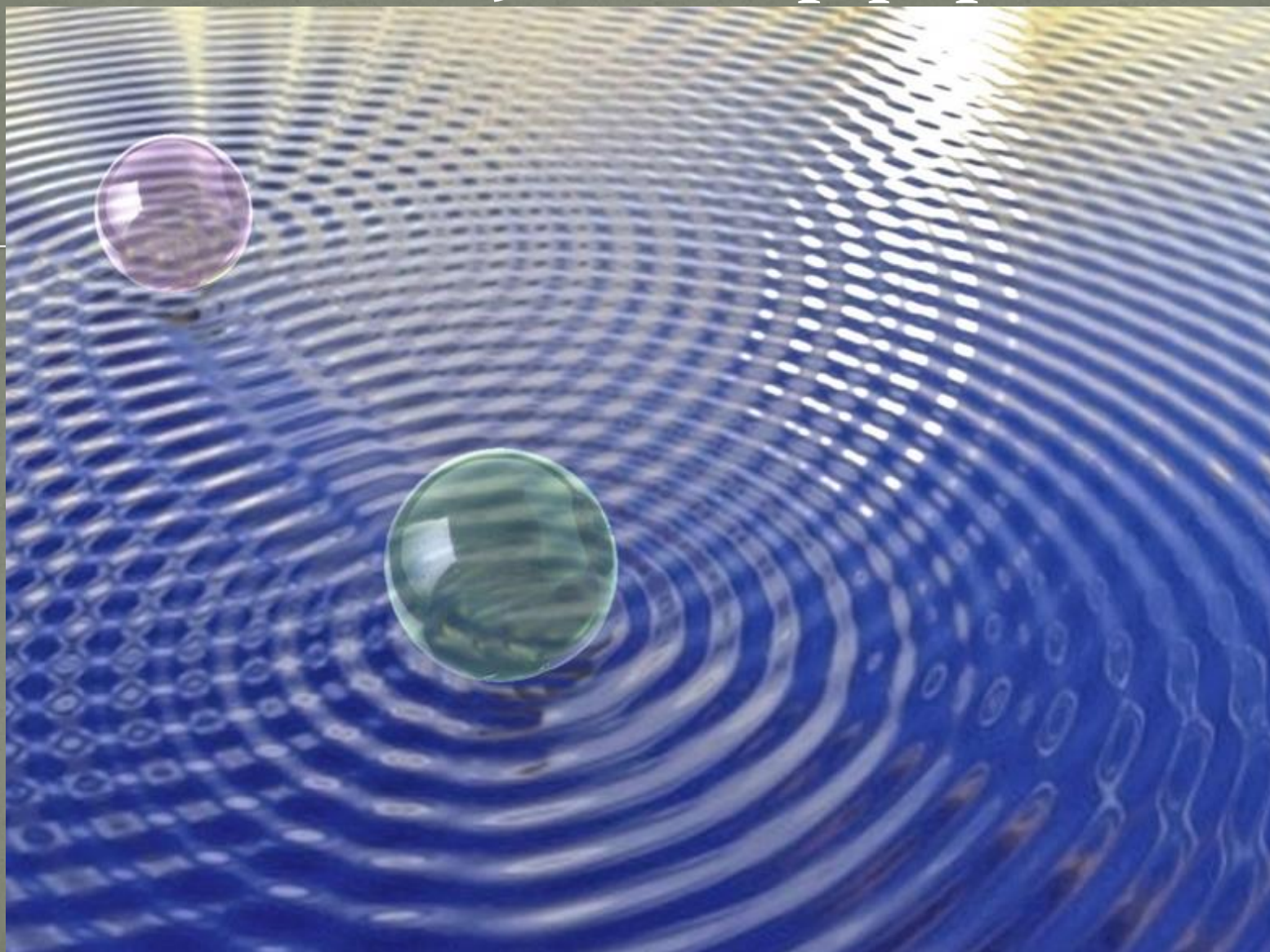
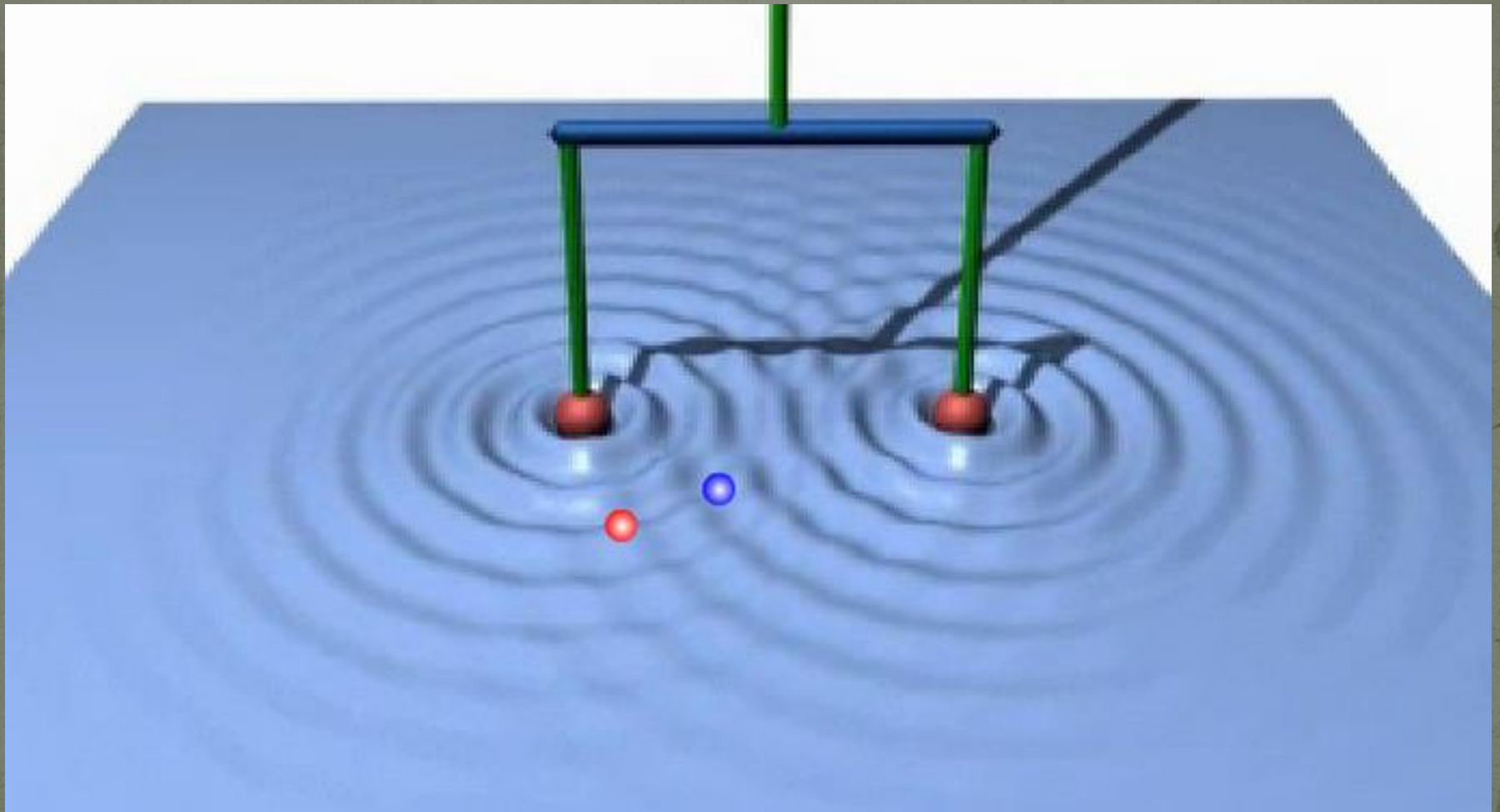


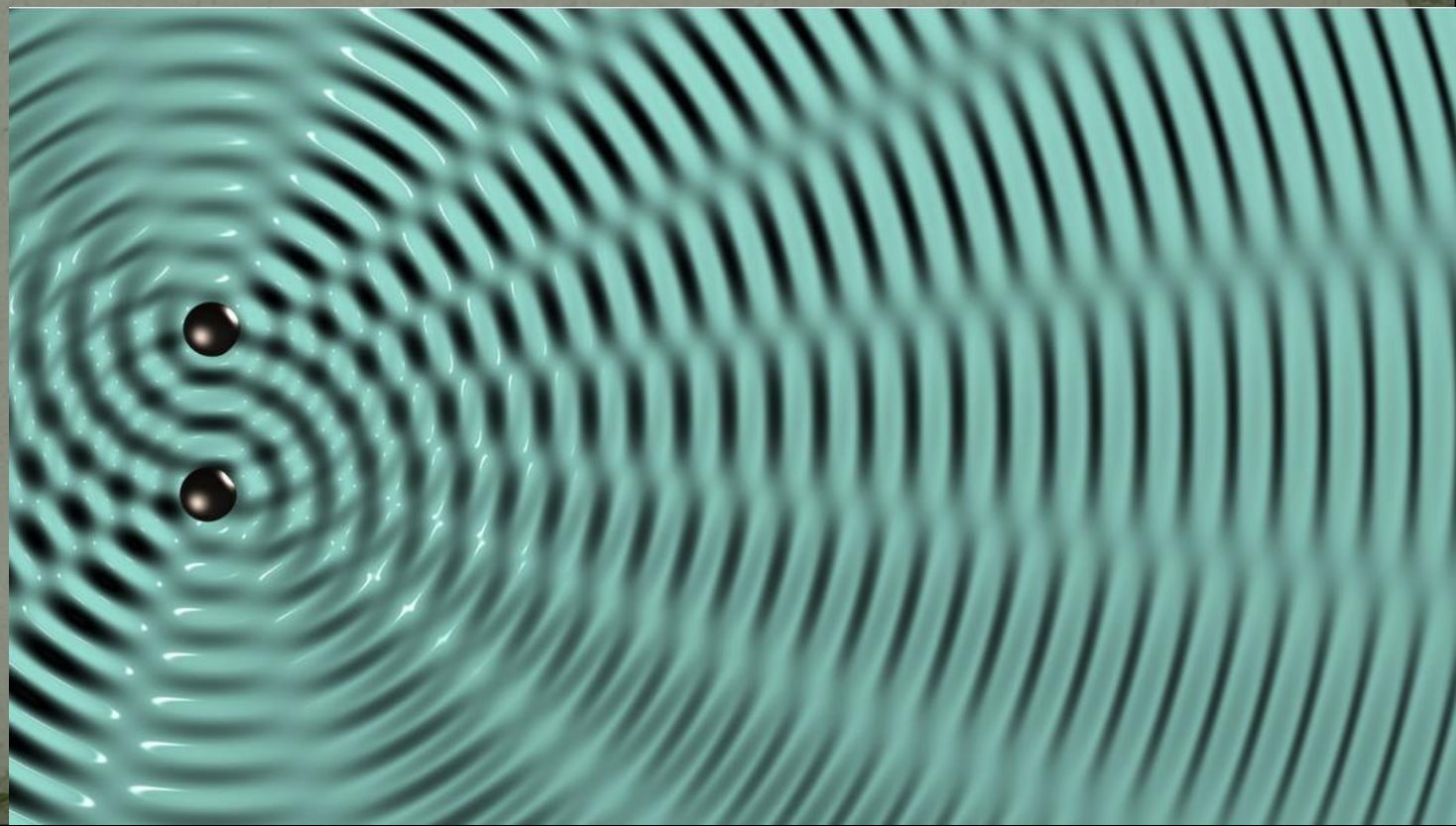
# Лекции 8-9. Интерференция



# Упругие волны







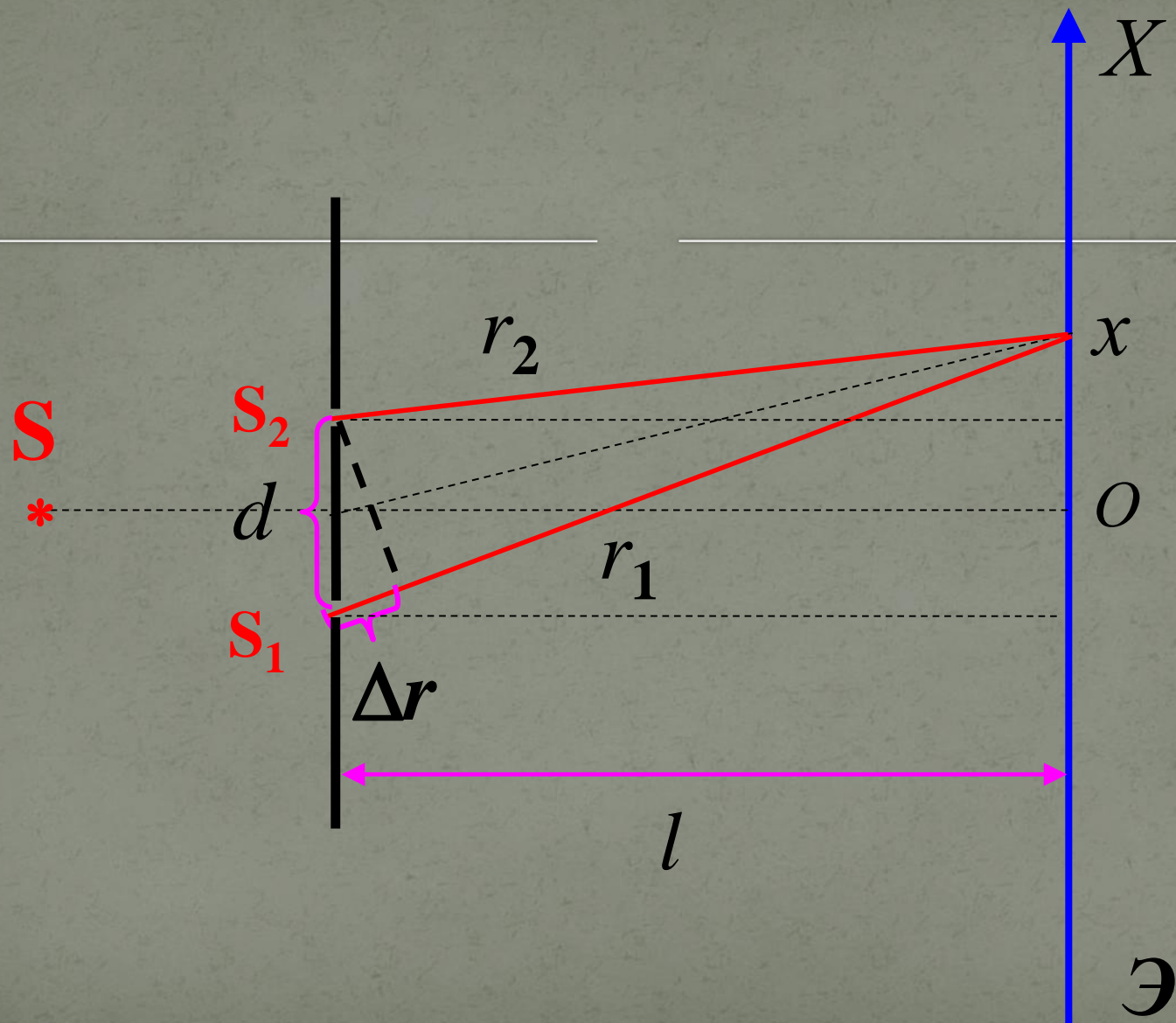
# *Интерференция света*

- ~~”Кто бы мог подумать, что свет слагаясь со светом, может вызвать мрак ...”~~

Франсуа Араго

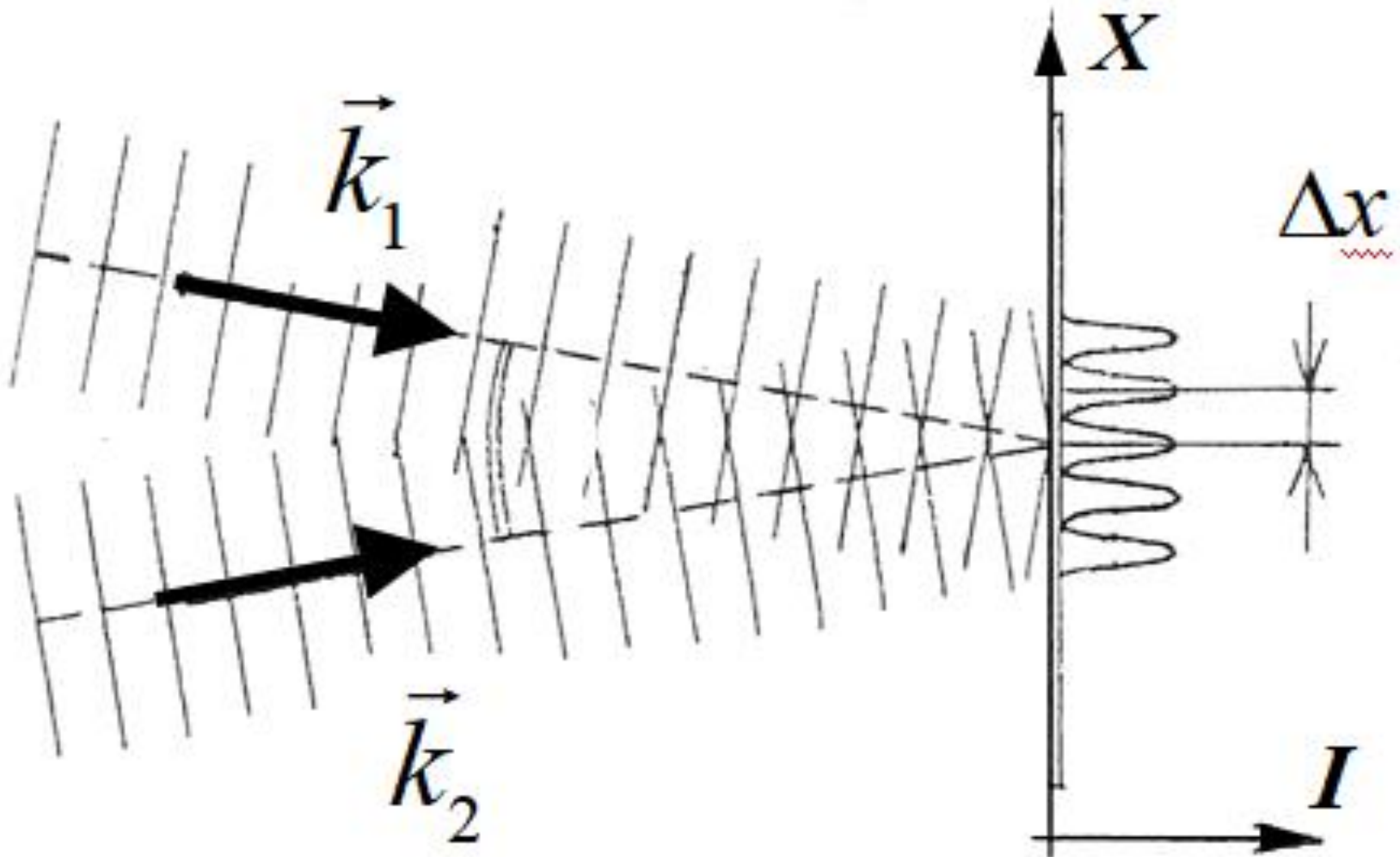


# Интерференционная схема Юнга



$$x_{\max} \approx \pm m \frac{L\lambda}{d},$$

$$\Delta x \approx \frac{L\lambda}{d}$$

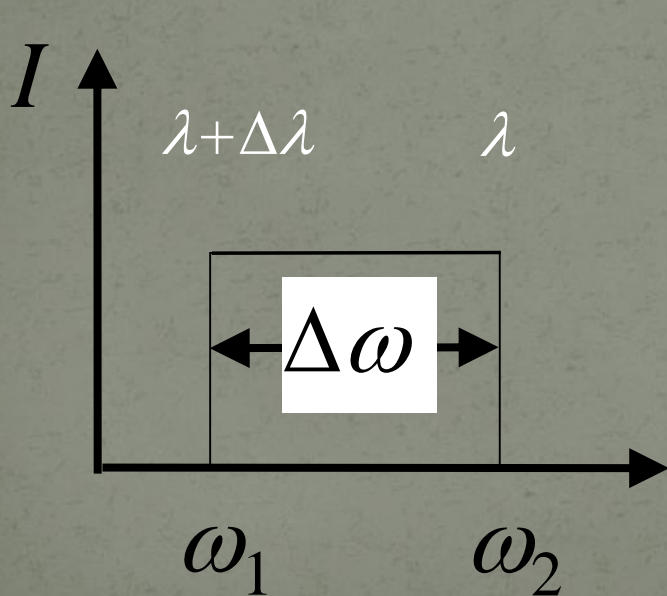




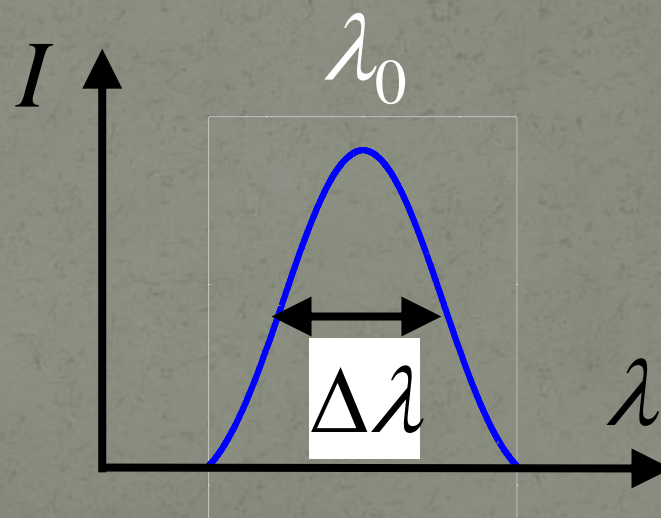
# Степень когерентности

## Временная когерентность

1) Немонохроматичность источника (ширина спектра  $\Delta\lambda$ )



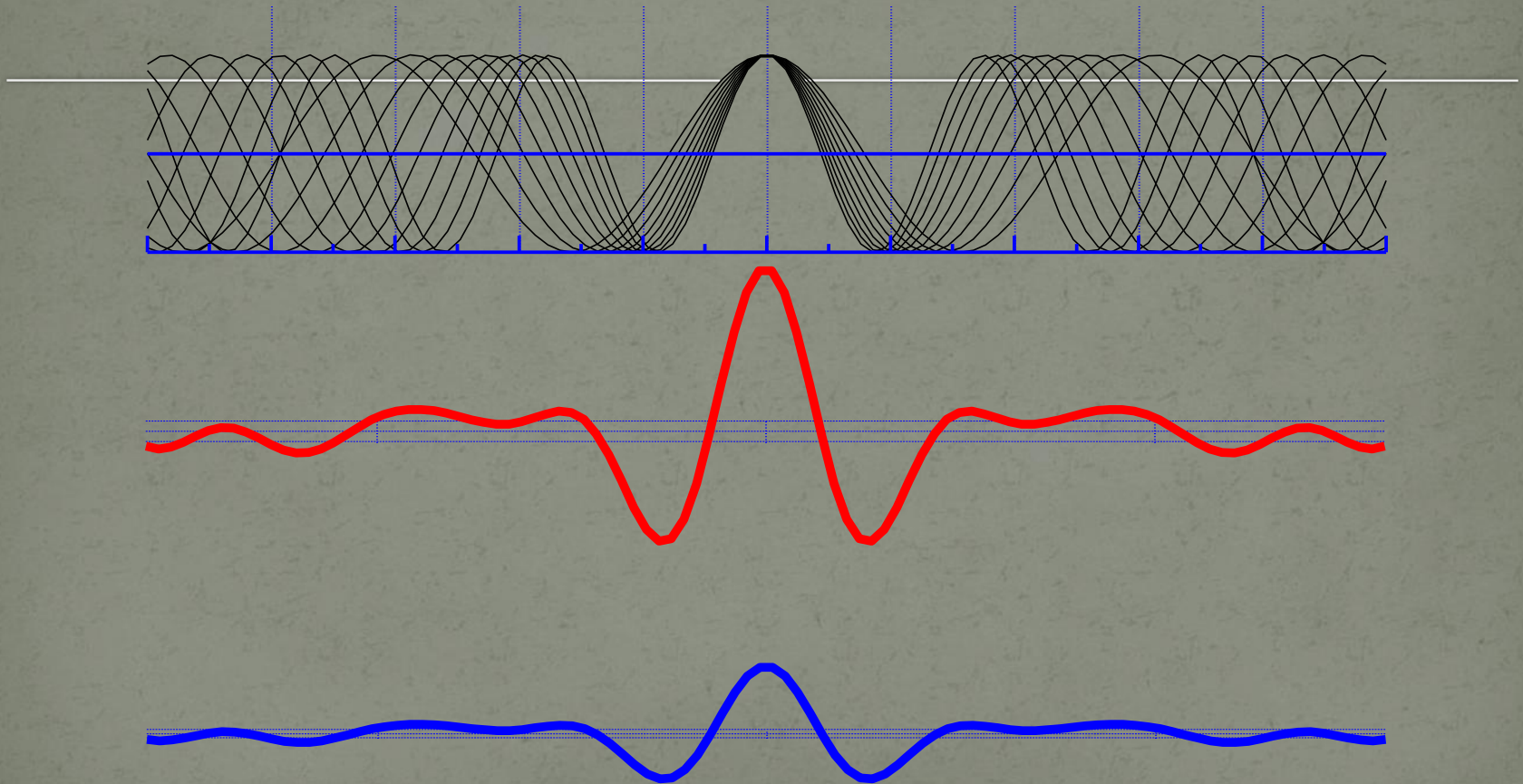
а



б

# Временная и пространственная когерентность

## 1) Немонохроматичность источника ( $\Delta\lambda$ )

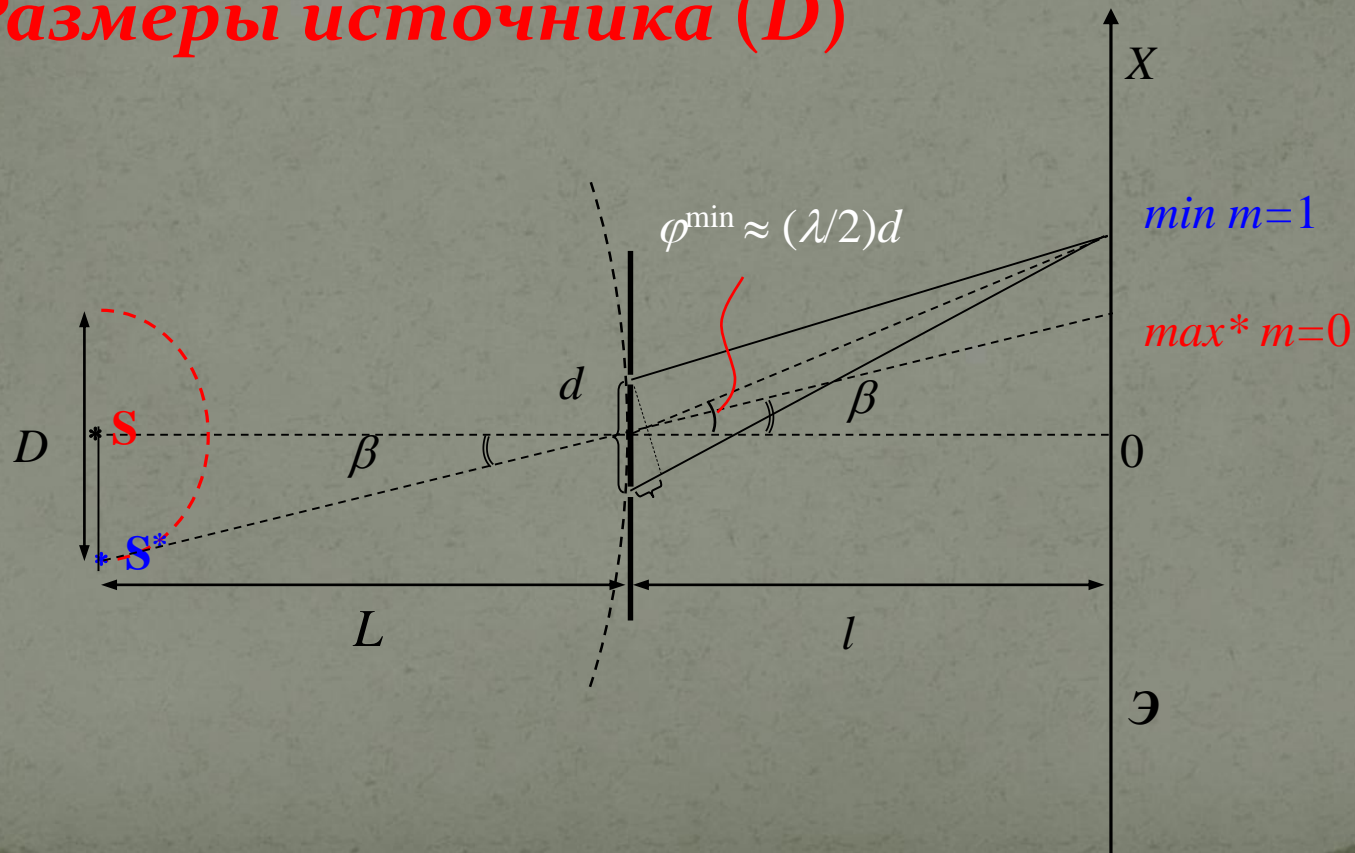




# Степень когерентности

## Пространственная когерентность

### 2) Размеры источника ( $D$ )

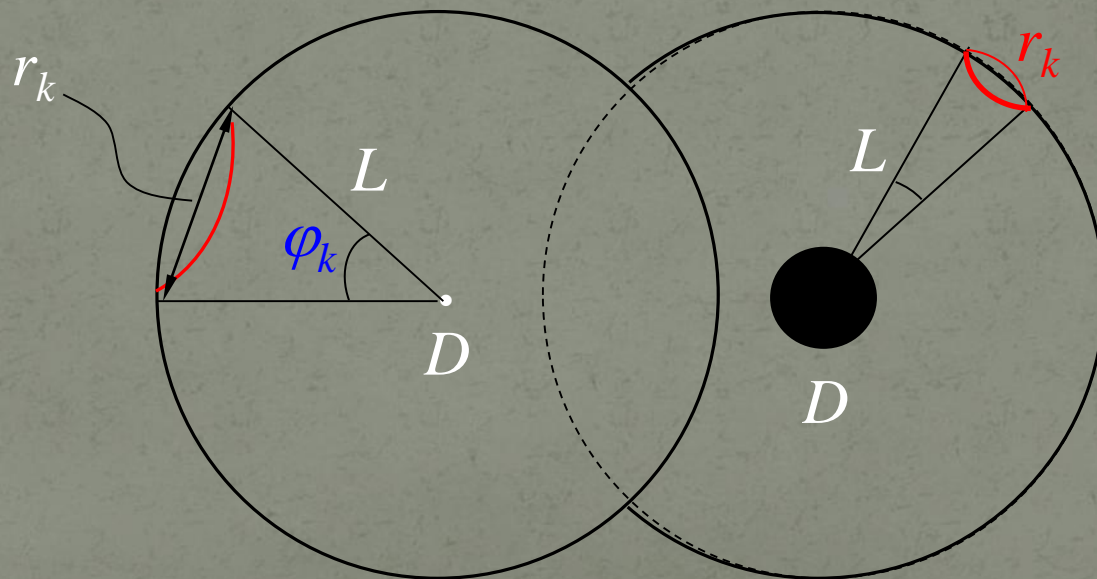


# Степень когерентности

## Пространственная когерентность

---

### 2) Размеры источника ( $D$ )



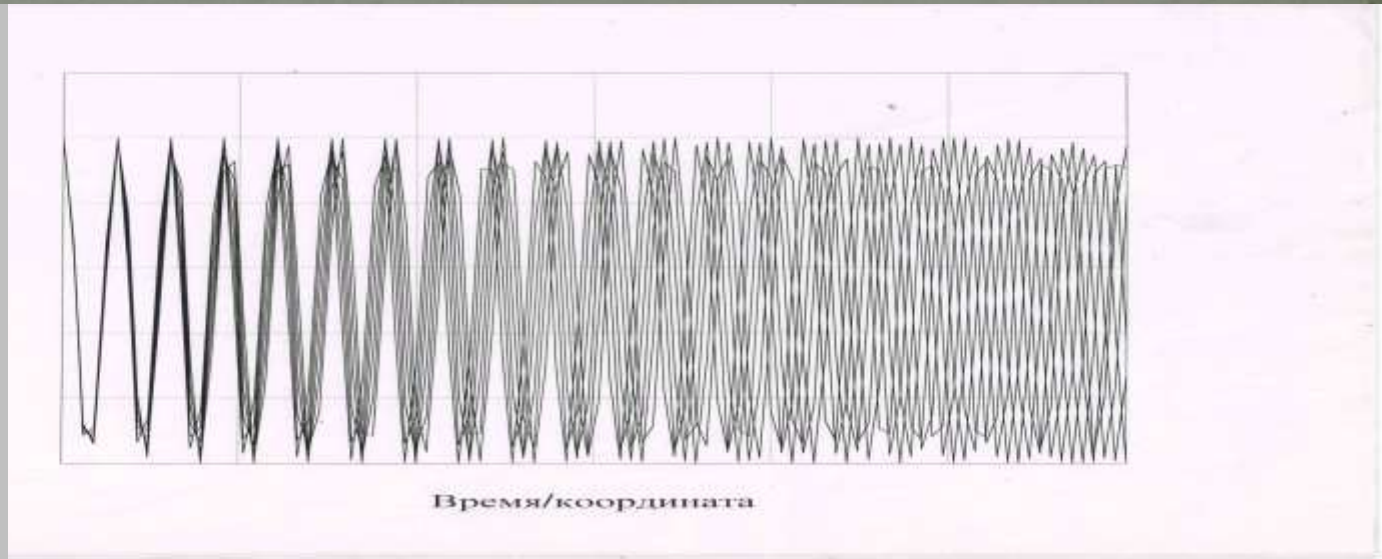
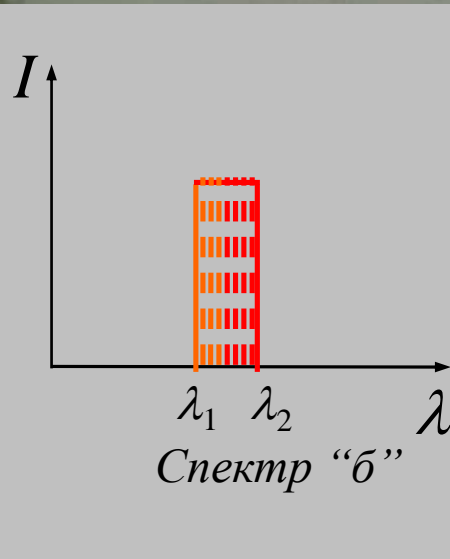
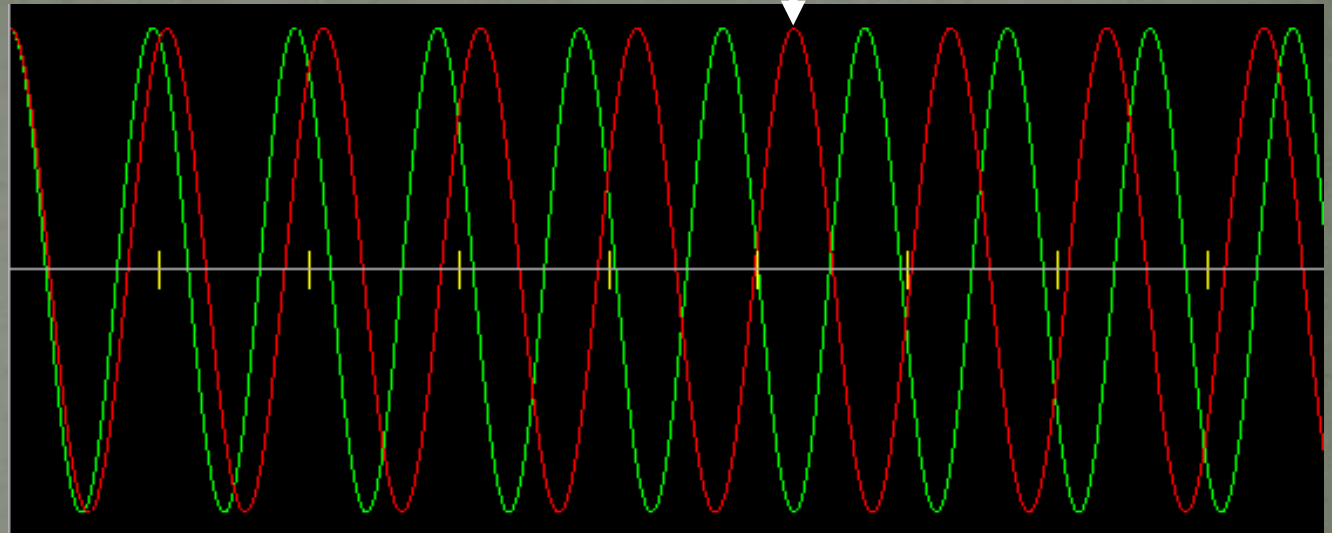
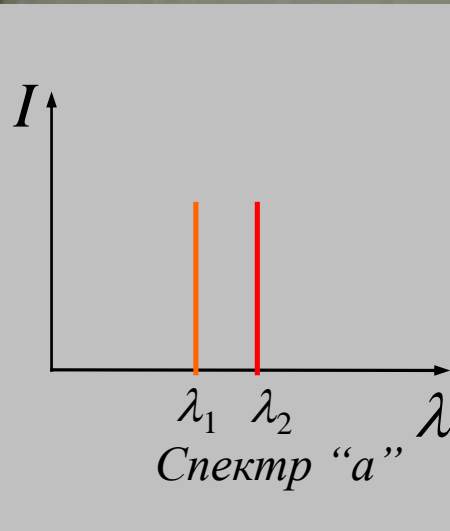


# Лекции 8-9. Интерференция света



# Время когерентности,

$\tau_{\text{КОГ}}$

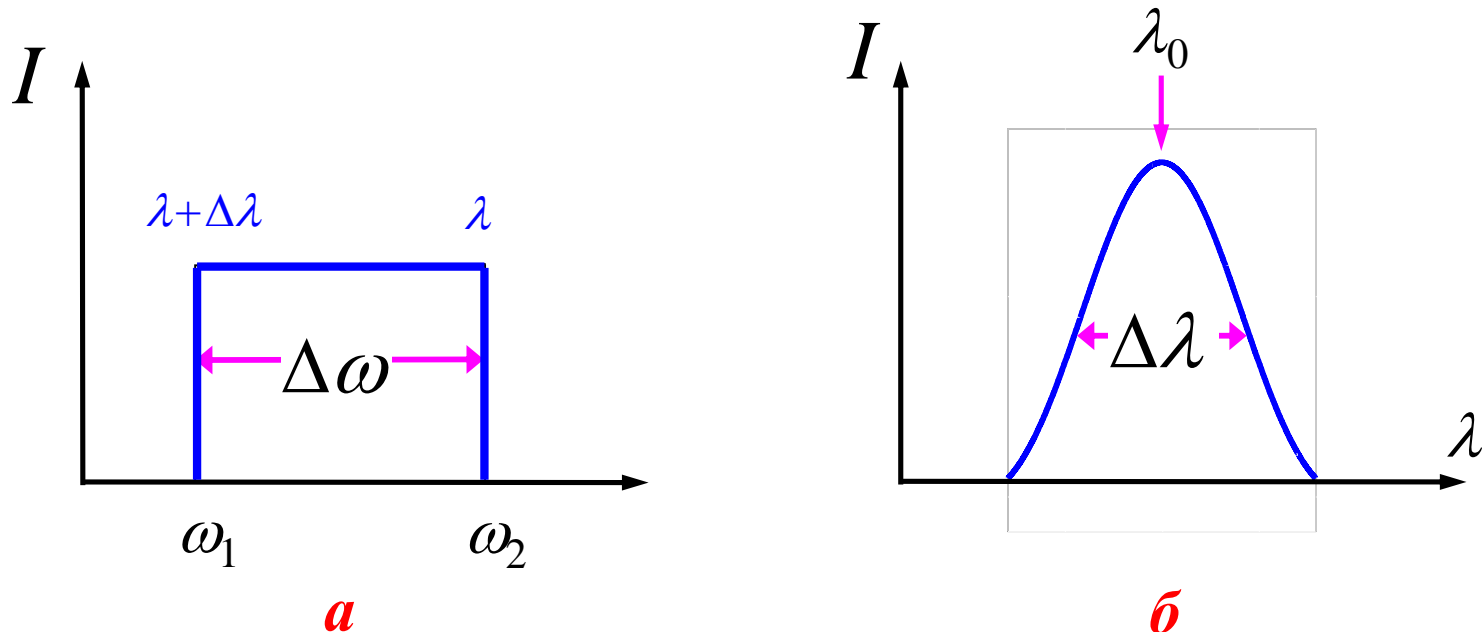




# Степень когерентности

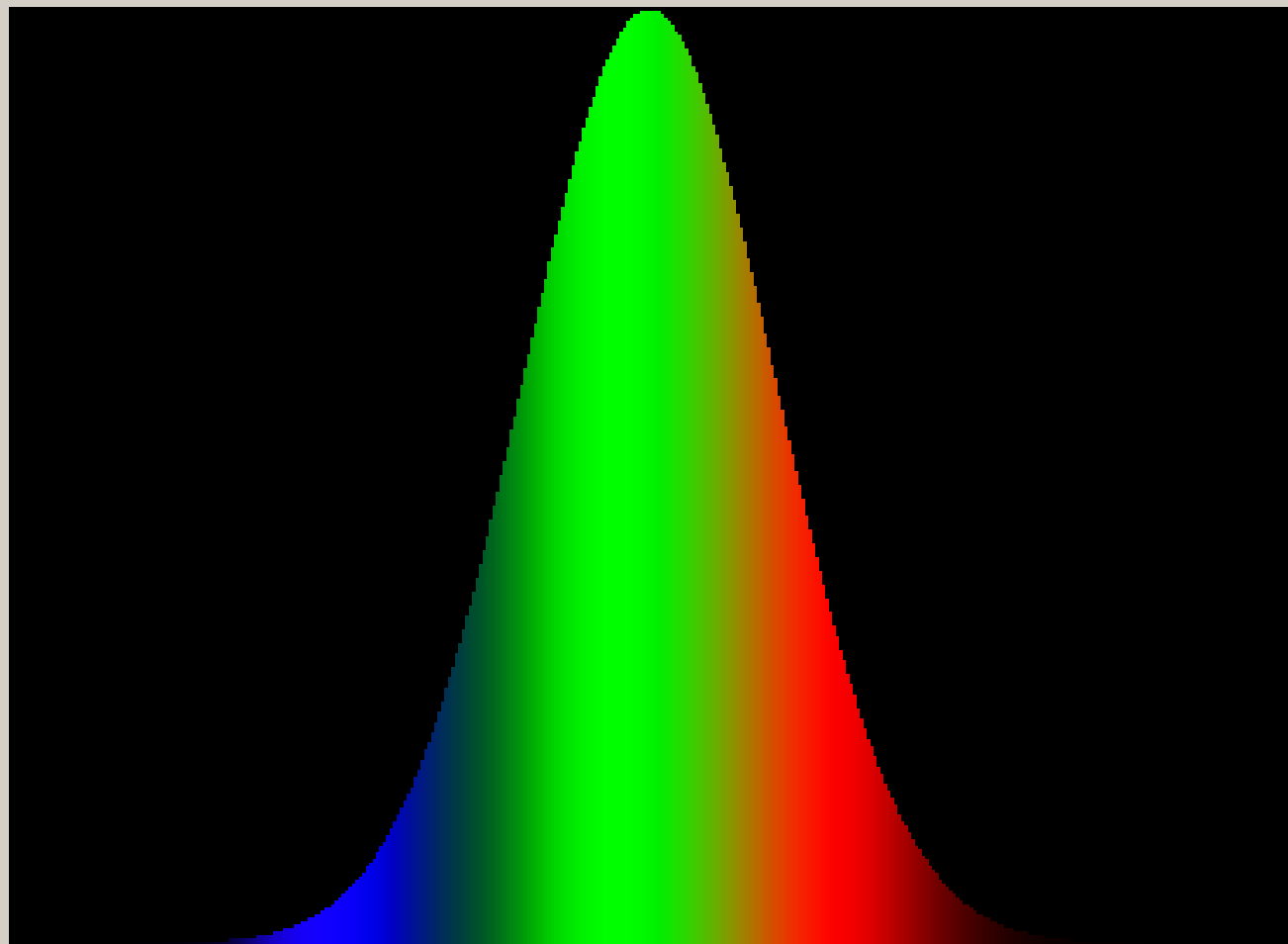
## 1) Временная когерентность

Немонохроматичность источника  
(ширина спектра излучения  $\Delta\lambda$ )



# Спектр видимого света

Спектральная плотность



346

длина волны, нм

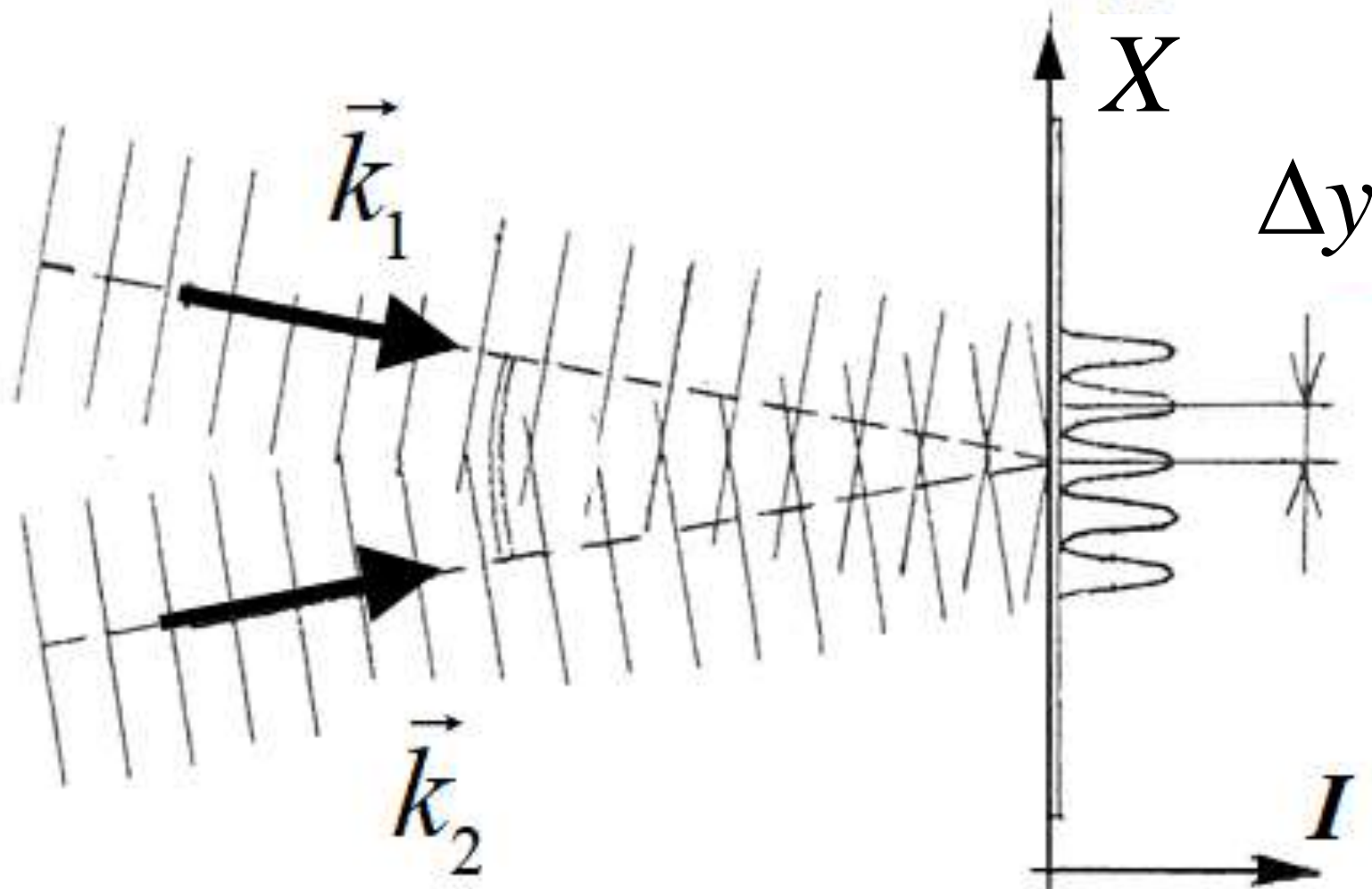
756

$\lambda$ , нм



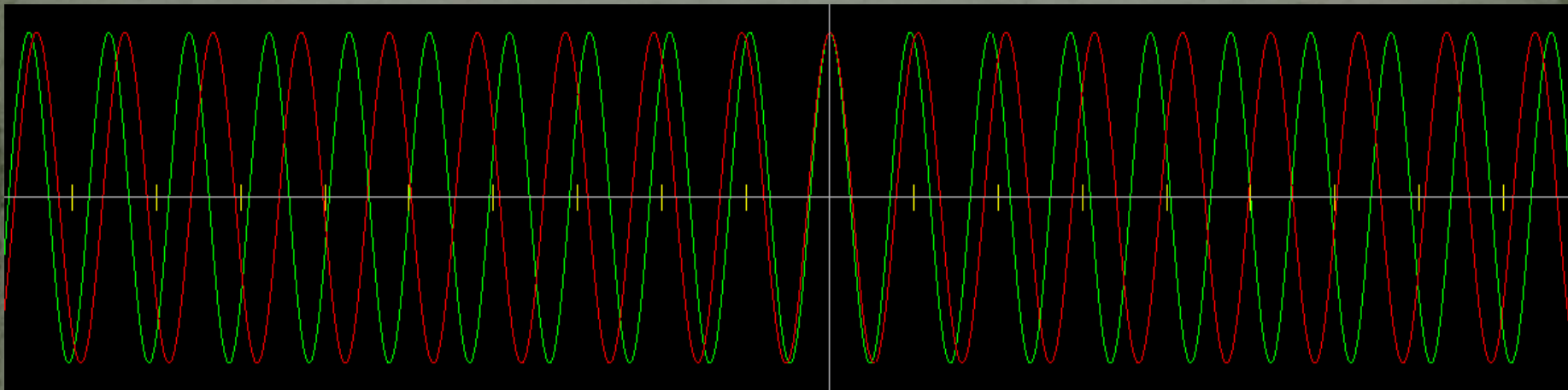
$$y_{\max} \approx \pm m \frac{l}{d} \lambda,$$

$$\Delta y \approx \frac{l}{d} \lambda$$



# Наложение интерференционных картин на экране в схеме Юнга

**Центральный максимум**

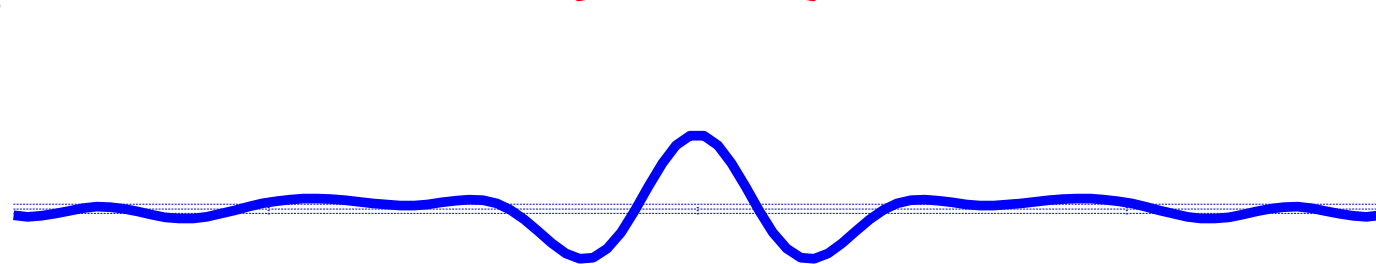
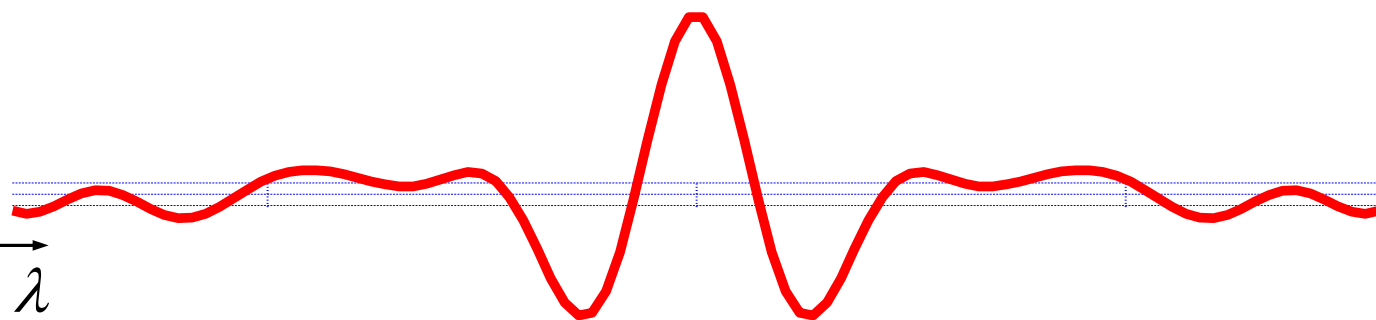
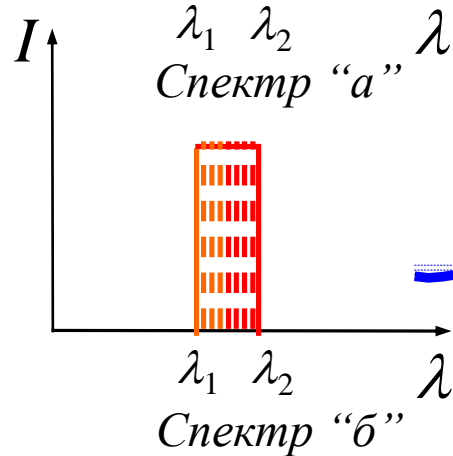
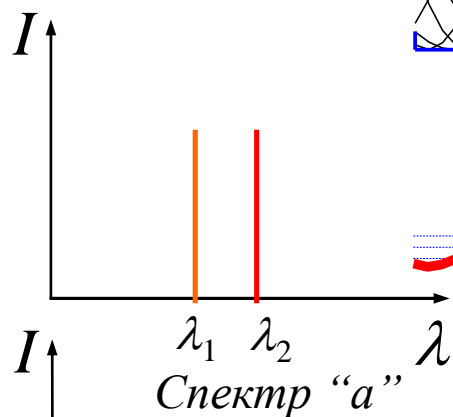
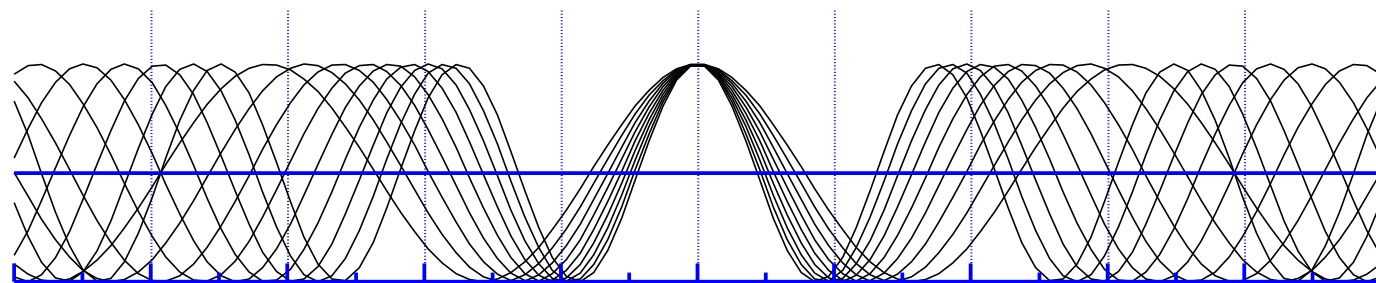


O

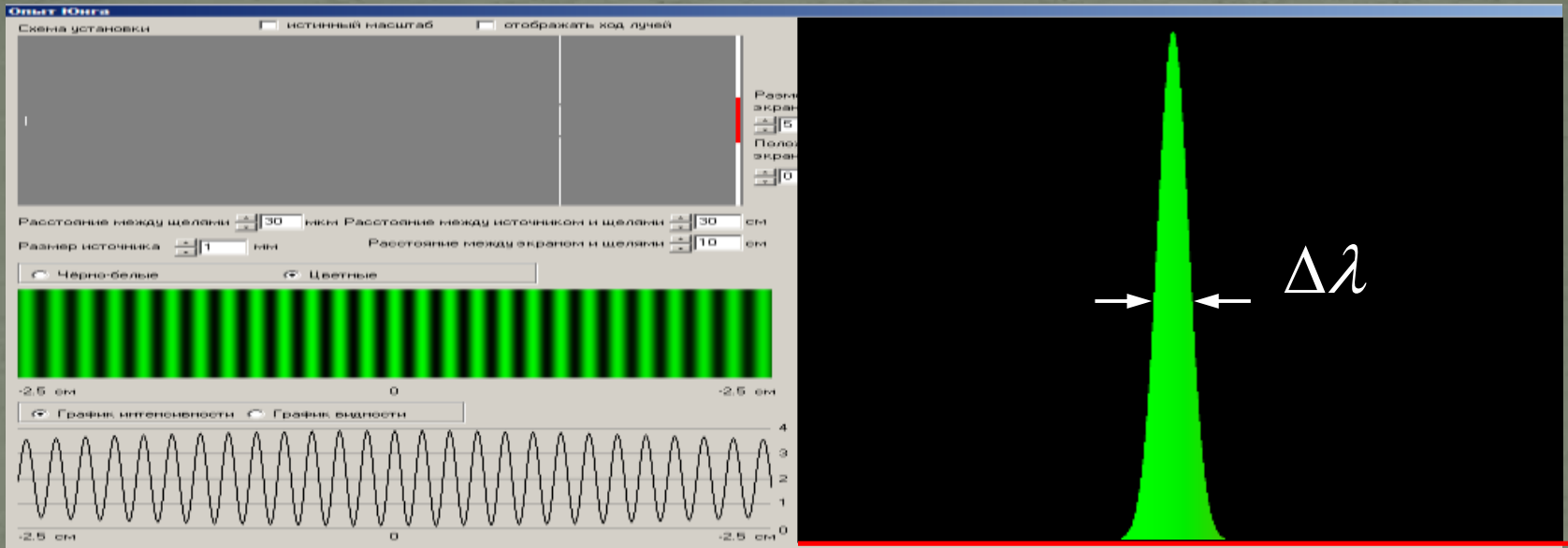


# Временная и пространственная когерентность

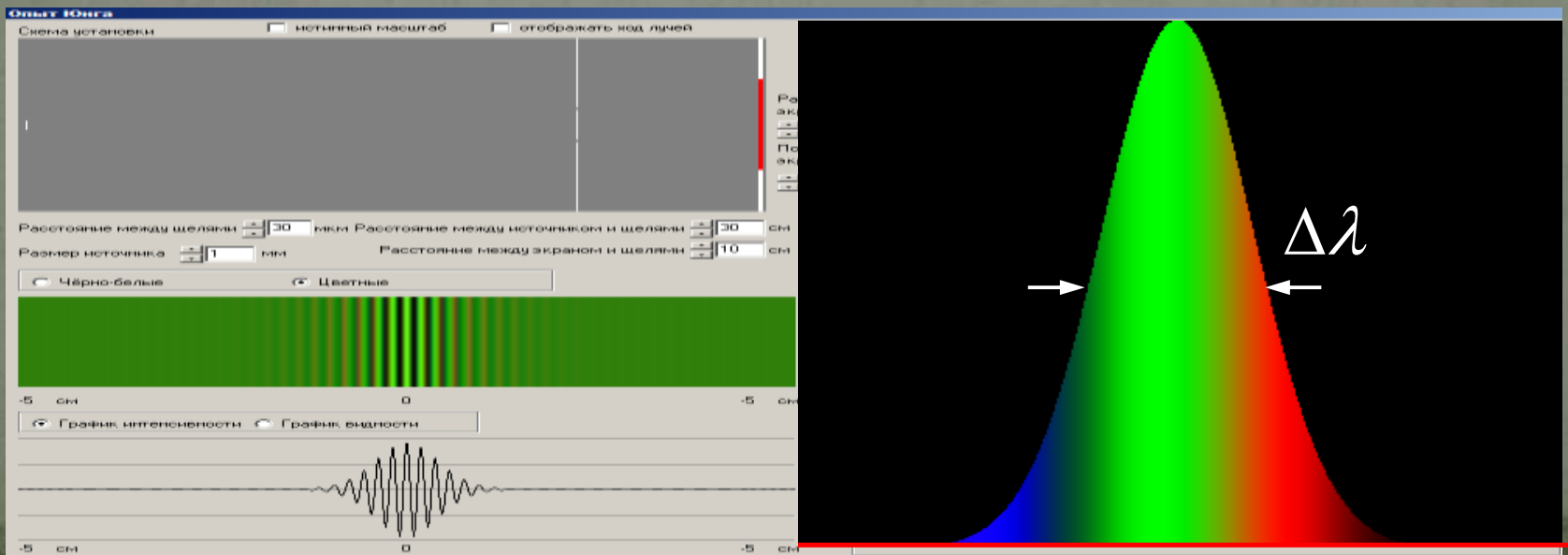
## 1) Немонохроматичность источника ( $\Delta\lambda$ )



# Свет монохроматичен – хорошая «видность»



# Широкий спектр – «видность» падает





# Влияние некогерентности, $\Delta\lambda$

Схема установки

истинный масштаб  отображать ход лучей



Размер экрана

5 см

Положение экрана

0 мм

Расстояние между щелями 30 мкм Расстояние между источником и щелями 30 см

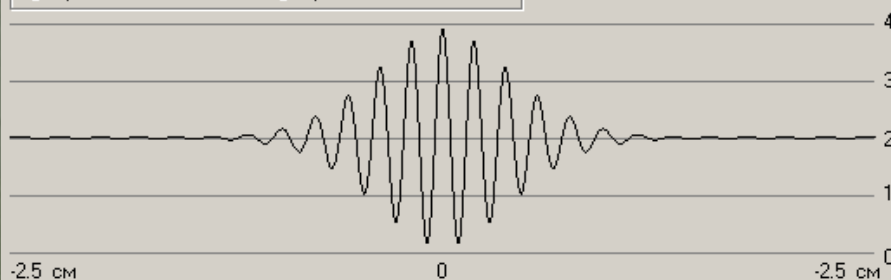
Размер источника 1 мм Расстояние между экраном и щелями 10 см

Чёрно-белые  Цветные

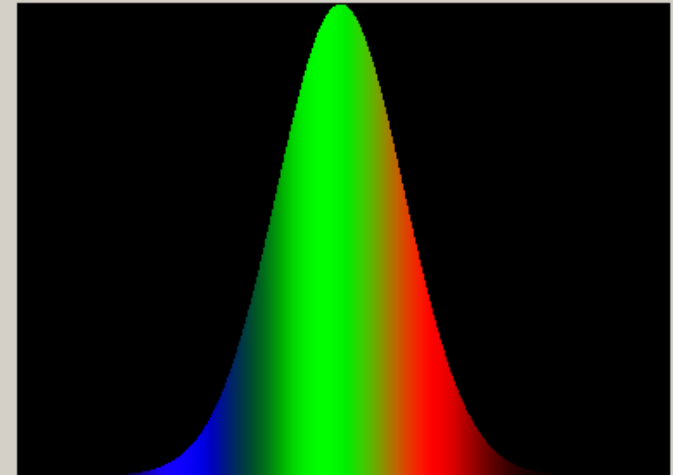


-2.5 см 0 -2.5 см

График интенсивности  График видности



Спектральная плотность



346  
длина волны, нм

756

Число спектральных линий: 1

длины волн

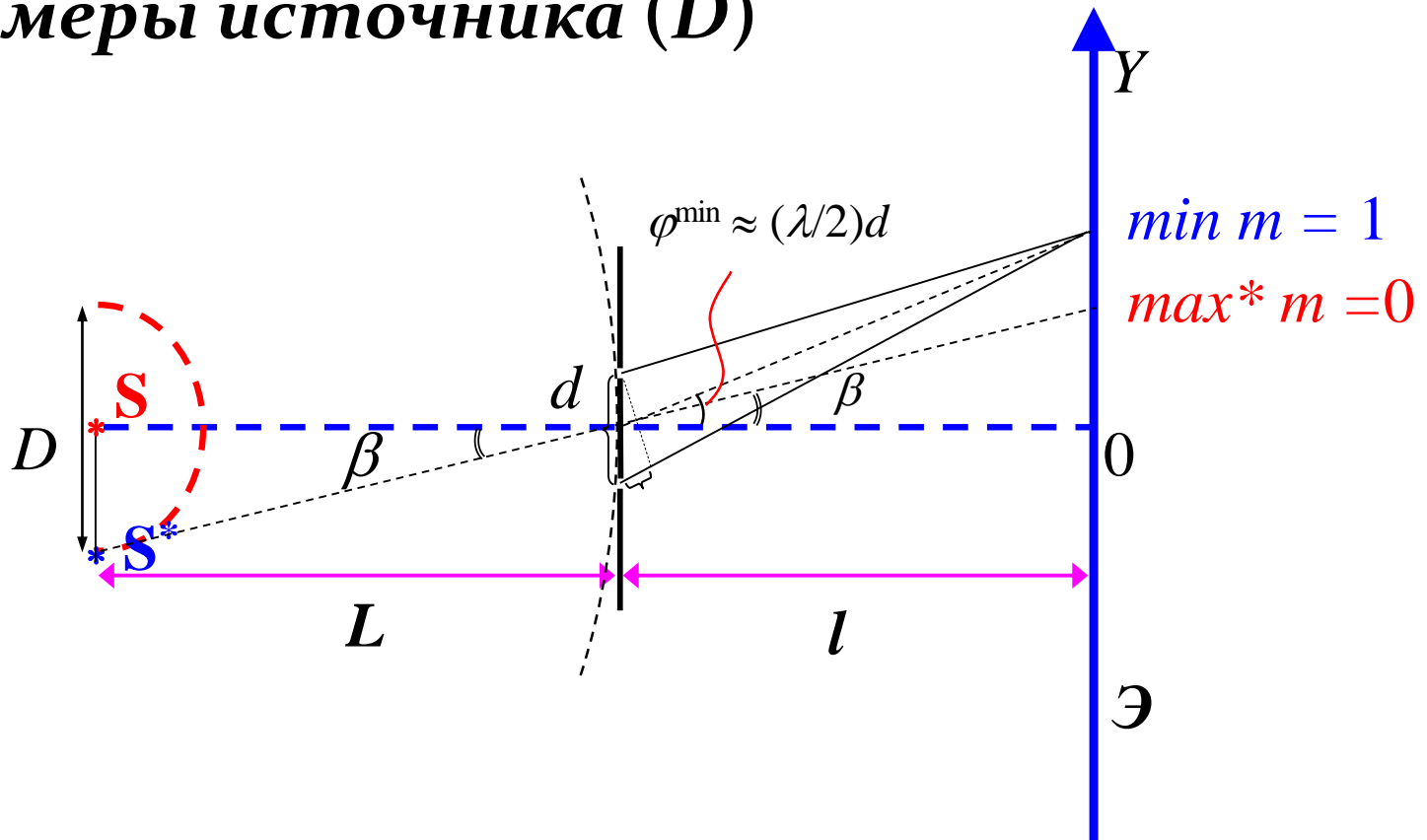
частоты

форма линии	отн. интенсивность	длина волны/ частота	полуширина спект. линии
Гауссовская	1	5500 А	400 А
Гауссовская	0	0 А	0 А
Гауссовская	0	0 А	0 А
Гауссовская	0	0 А	0 А
Гауссовская	0	0 А	0 А

# Степень когерентности

## 2) Пространственная когерентность

Размеры источника ( $D$ )



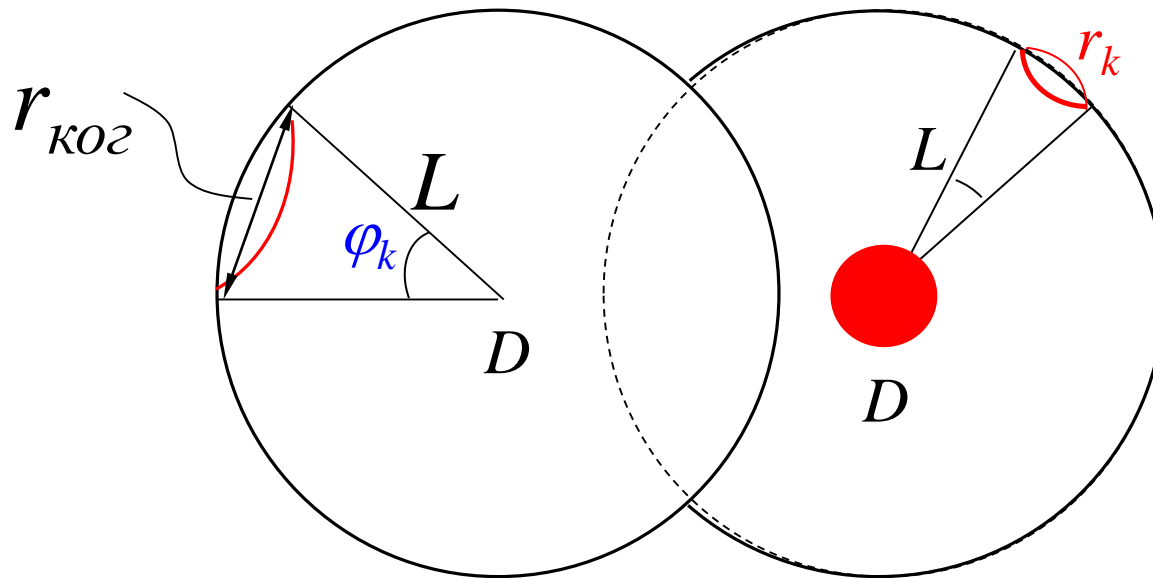
$$d, D \ll l, L!$$



# Степень когерентности

## 2) Пространственная когерентность

Размеры источника ( $D$ )



$$r_{\text{ког}} = \frac{L}{D} \lambda$$

или

$$r_{\text{ког}} = \frac{\lambda}{2\beta}$$

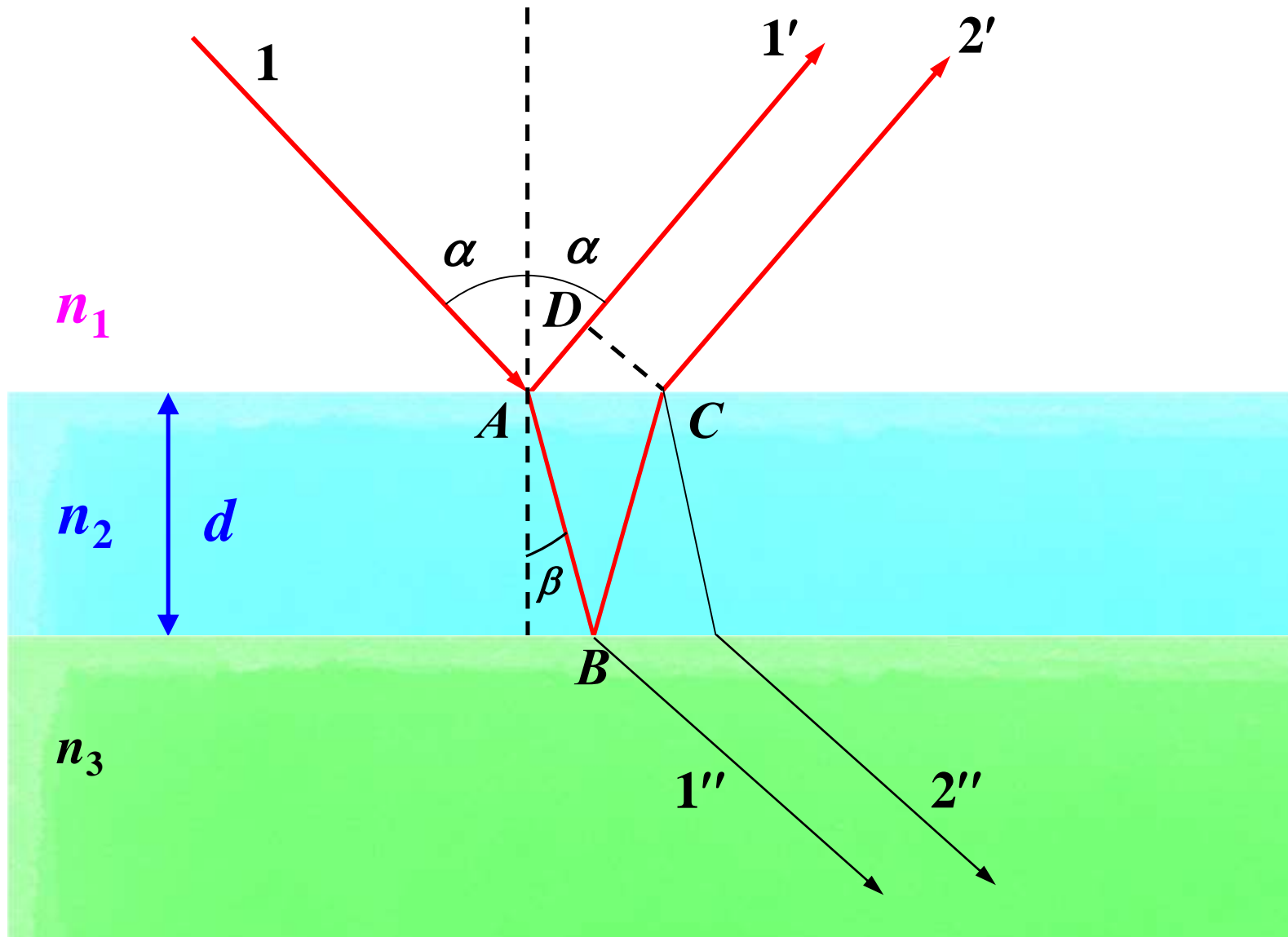
# Интерференция в тонких плёнках

*Мыльный пузырь витая в воздухе...зажигается всеми оттенками цветов, присущими окружающим предметам. Мыльный пузырь, пожалуй, самое изысканное чудо природы*

*Марк Твен*

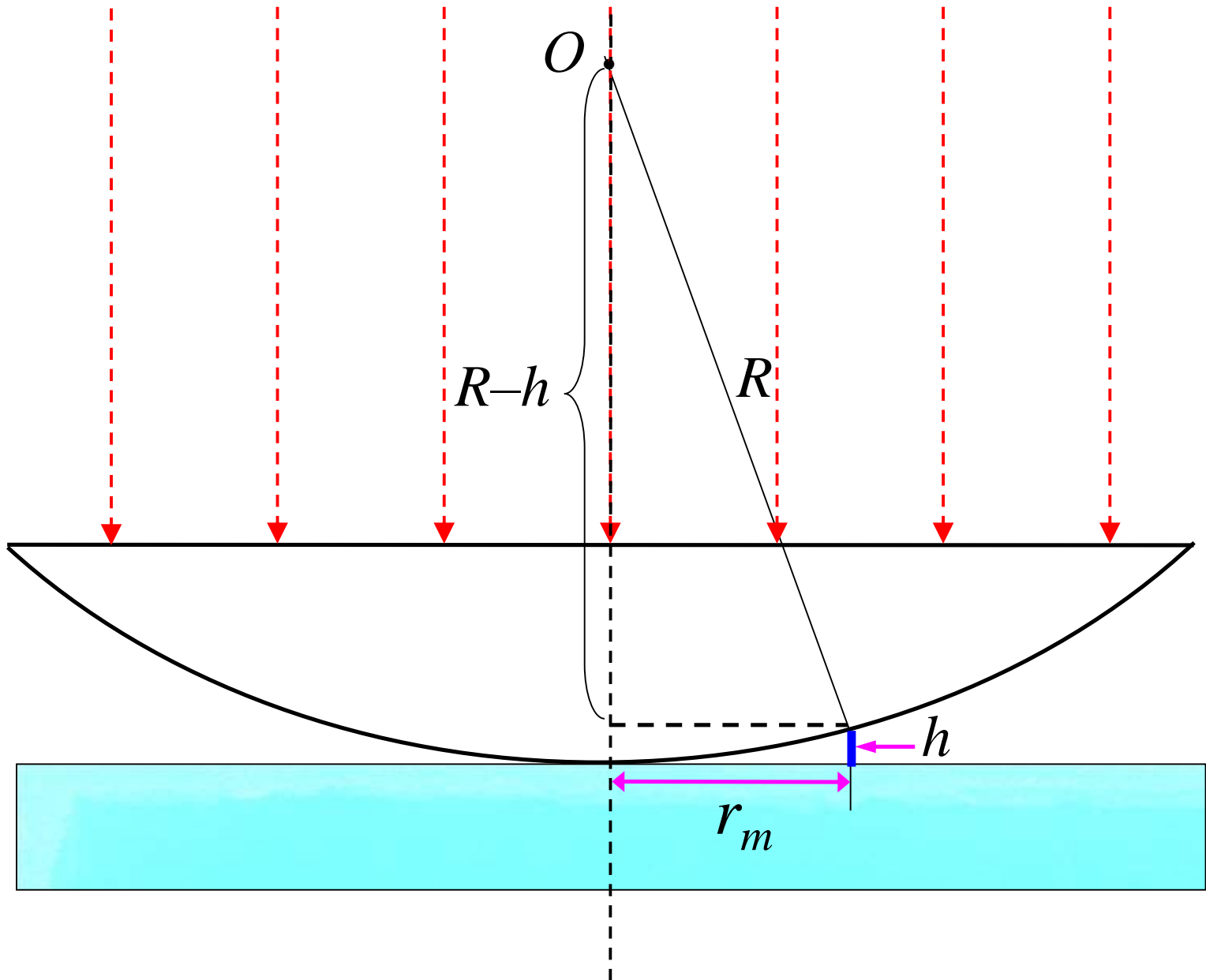


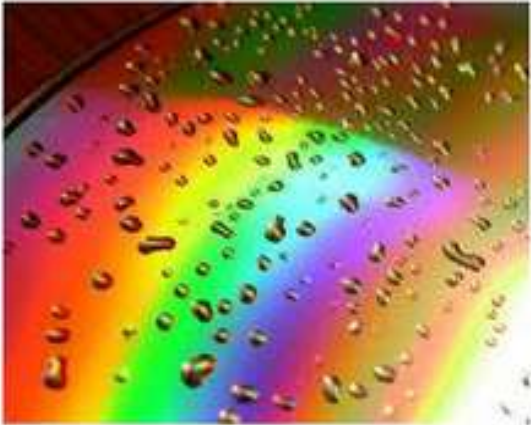
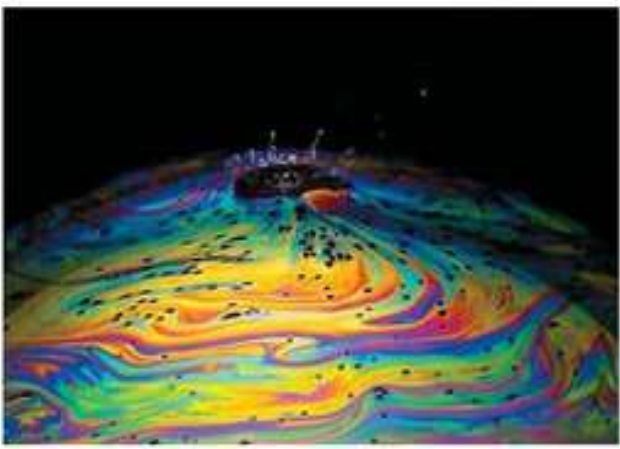
# Интерференция в тонких плёнках





# “Полосы равной толщины”






# Свет немонохроматичен – «видность» пропадает

**Опыт Юнга**

истинный масштаб     отображать ход лучей

Схема установки



Размер экрана: 44 см  
Положение экрана: 0 мм

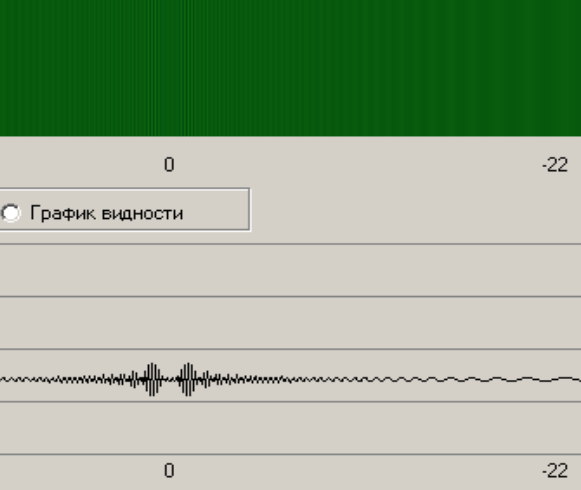
Расстояние между щелями: 30 мкм    Расстояние между источником и щелями: 30 см  
Размер источника: 1 мм    Расстояние между экраном и щелями: 10 см

Чёрно-белые     Цветные



313    789  
длина волны, нм

Спектральная плотность

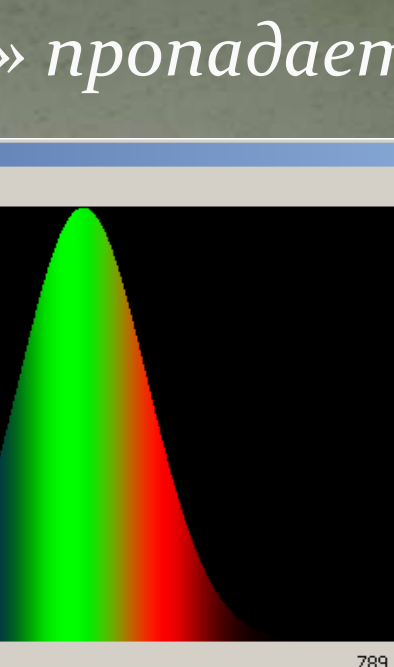


Число спектральных линий: 1

длины волн     частоты

форма линии	отн. интенсивность	длина волны/ частота	полуширина спект. линии
Гауссовская	1	5500 А	466 А
Гауссовская	0	0 А	0 А
Гауссовская	0	0 А	0 А
Гауссовская	0	0 А	0 А
Гауссовская	0	0 А	0 А

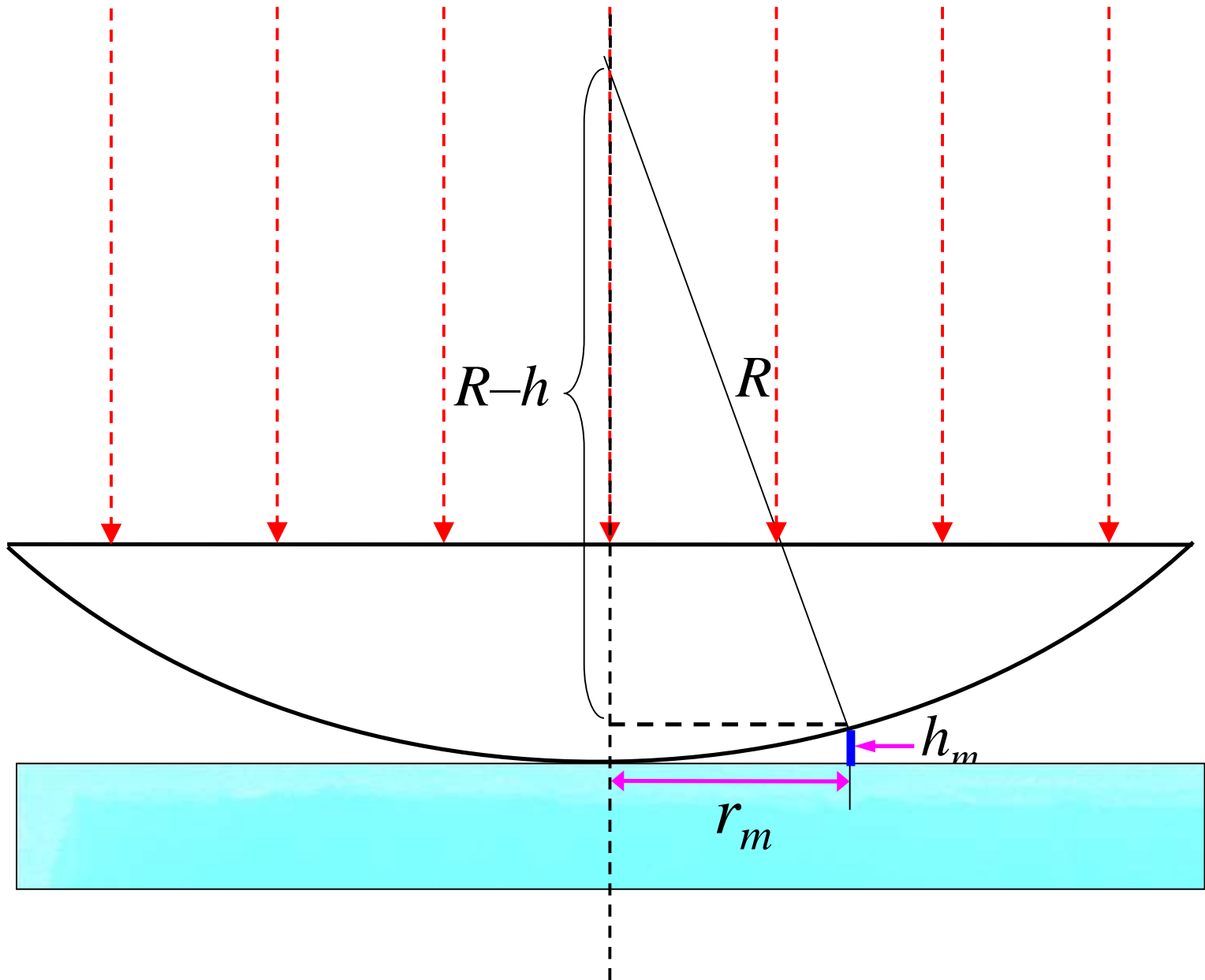
График интенсивности     График видности

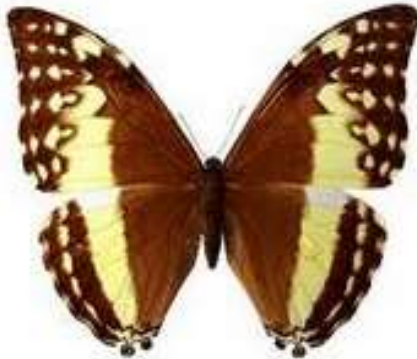
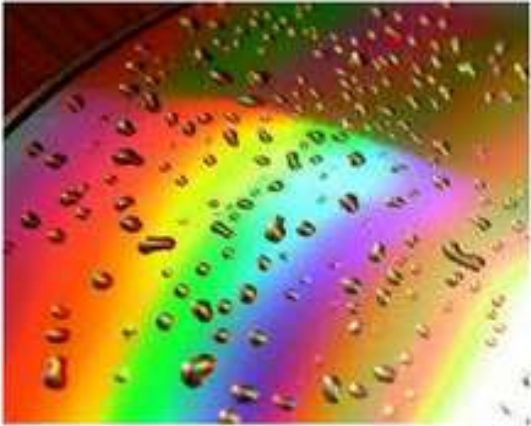
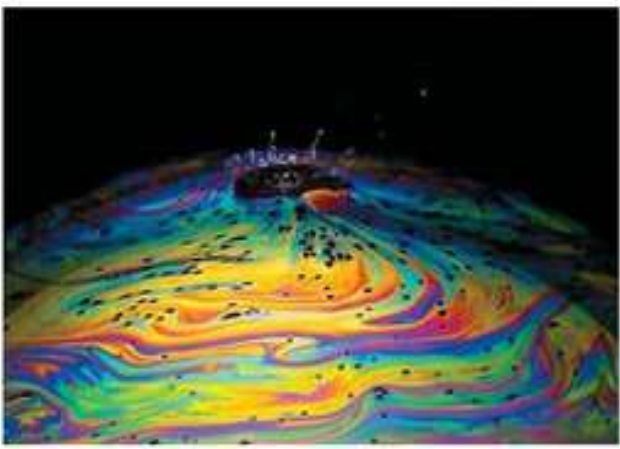


-22 см    0    -22 см



# “Полосы равной толщины”





# *Лекции 10. Дифракция Френеля*

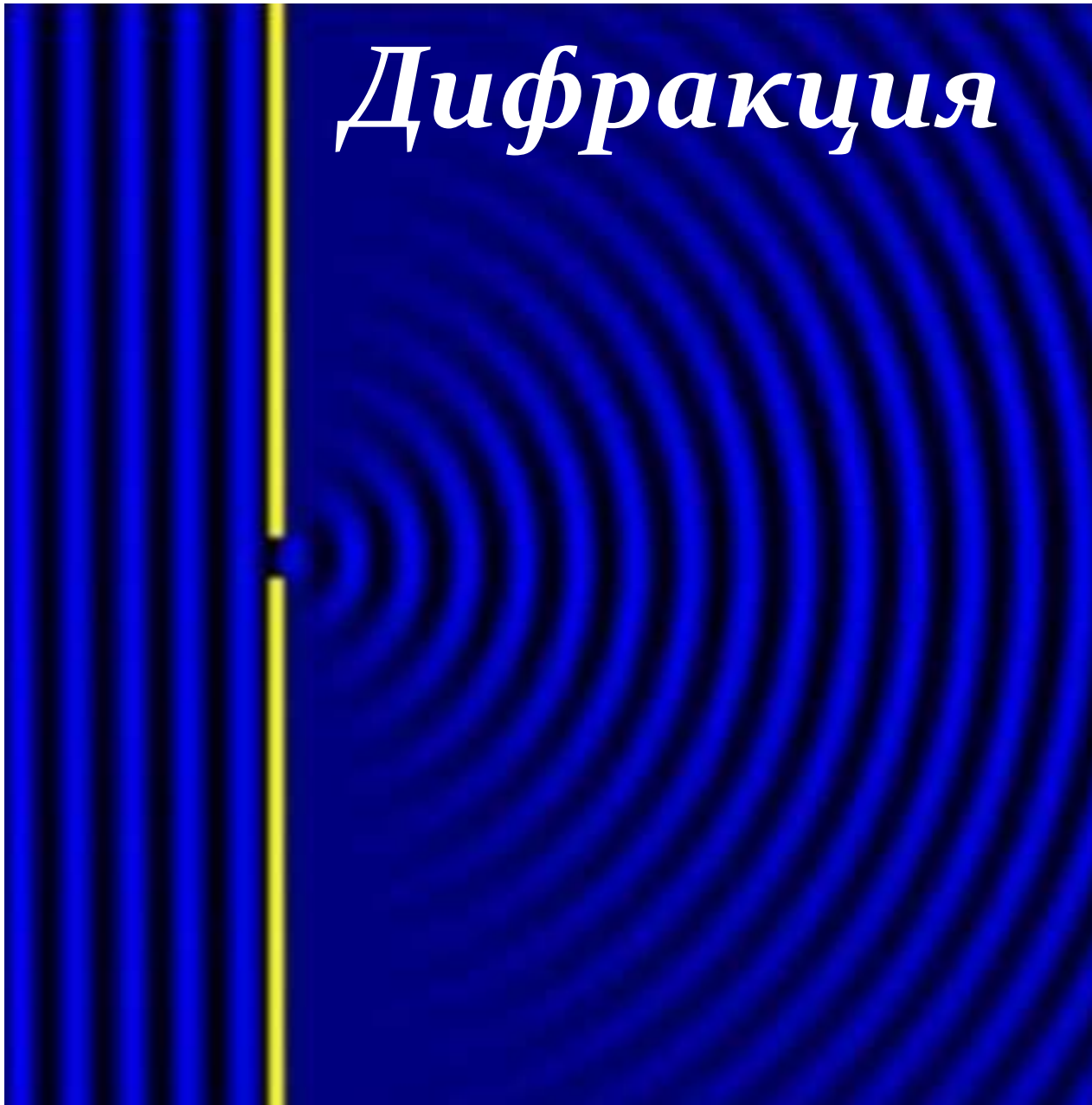




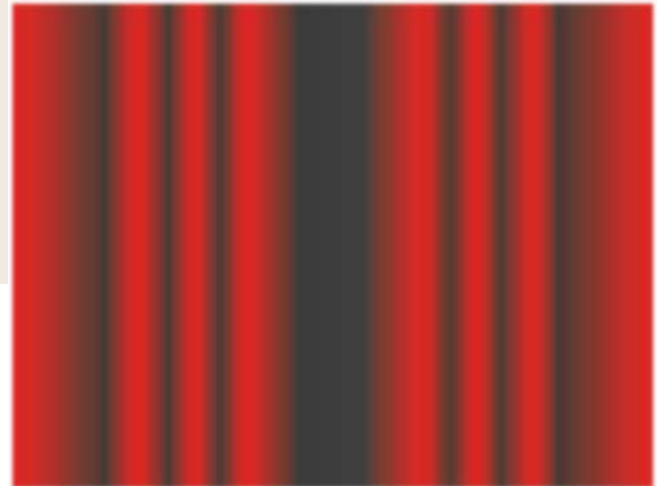
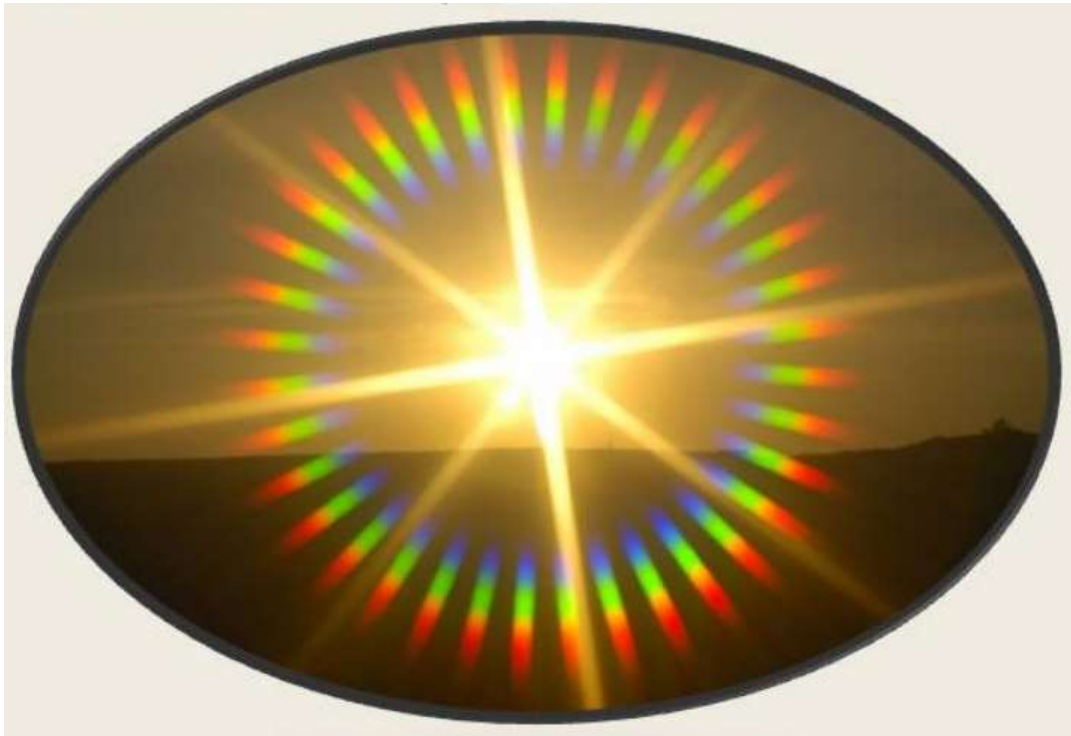
# *Дифракция волн*



# *Дифракция*

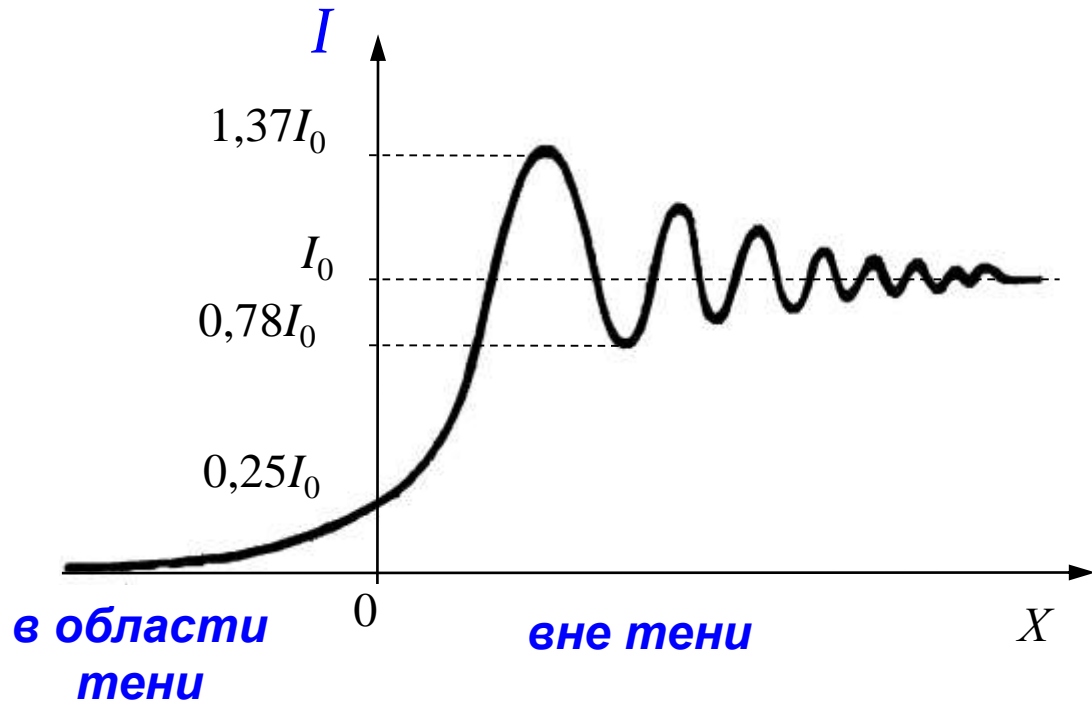
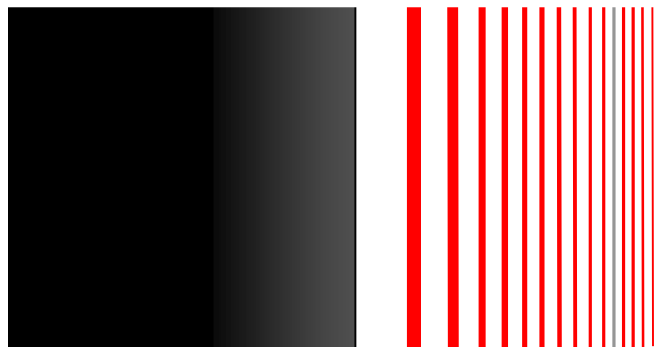
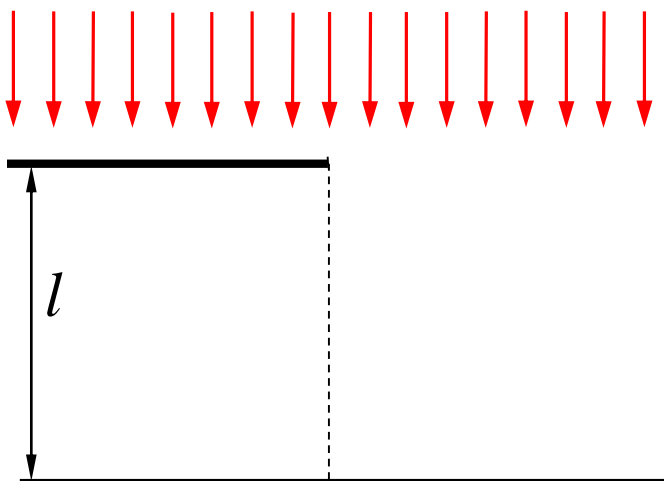


# Дифракция света





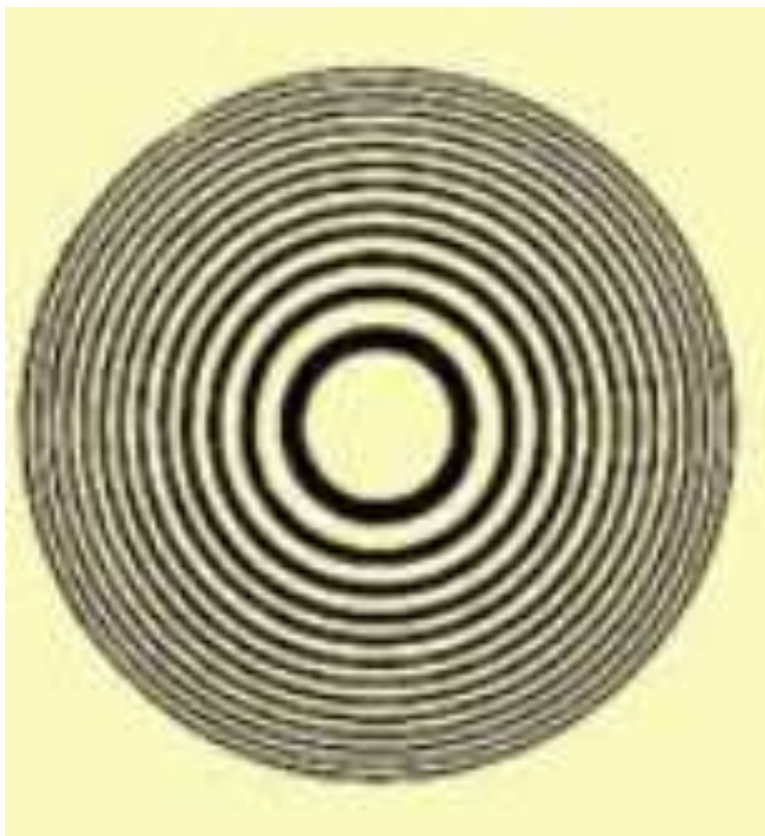
# Дифракция Френеля на полуплоскости и щели



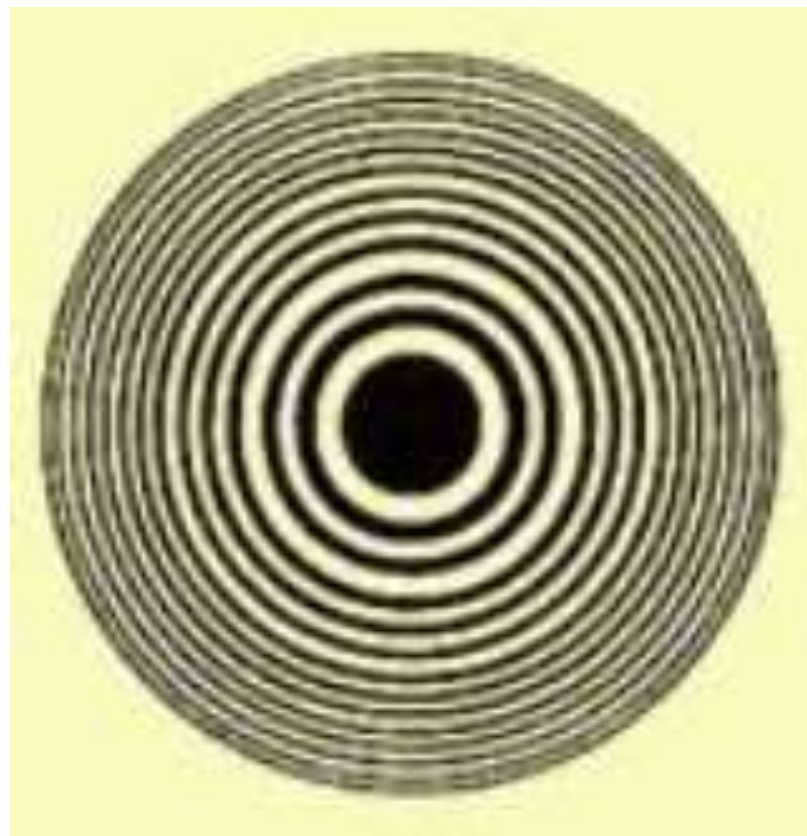
*Дифракция Френеля на  
круглом отверстии*



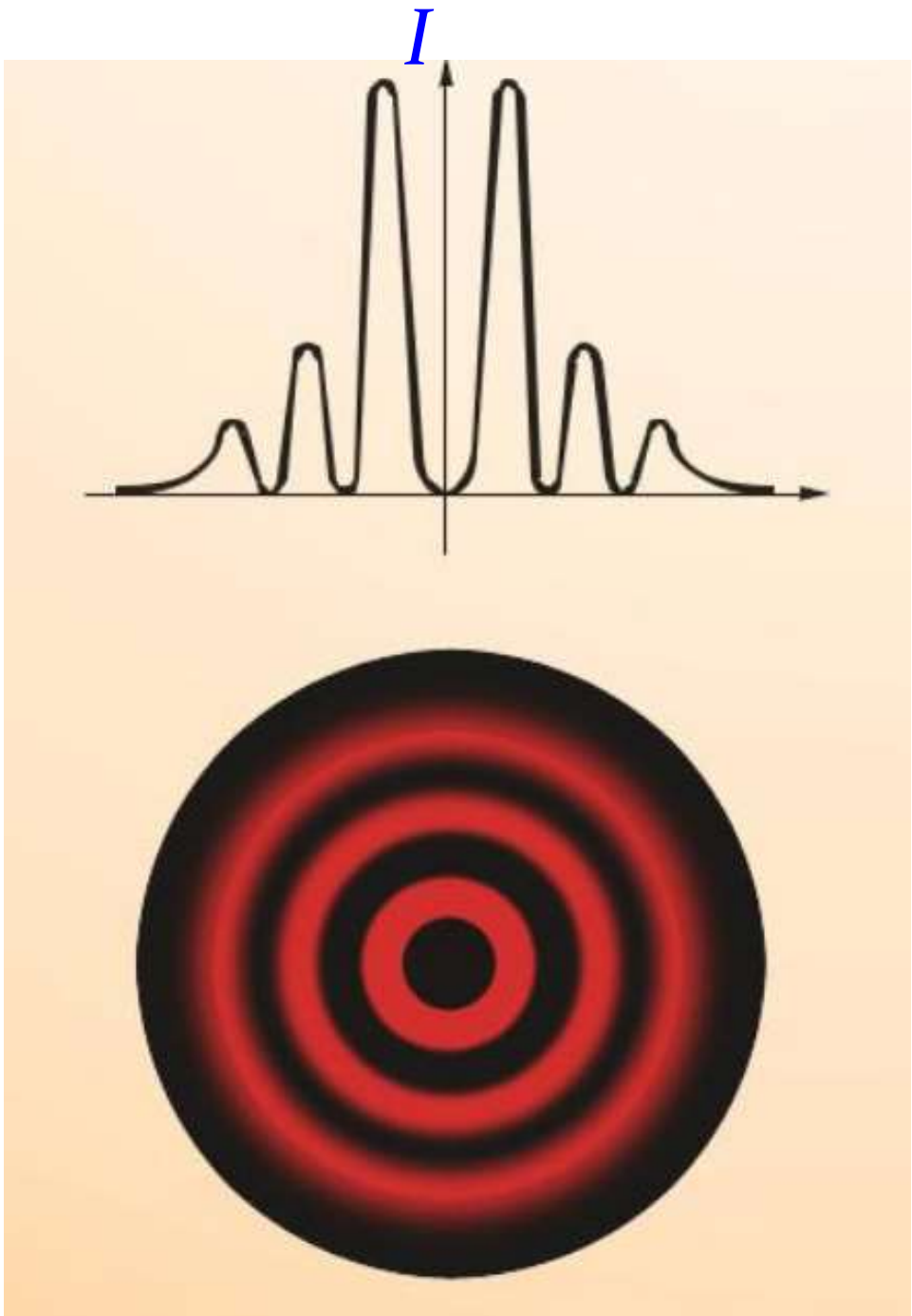
# Дифракция на круглом отверстии – что видим ?



*a*

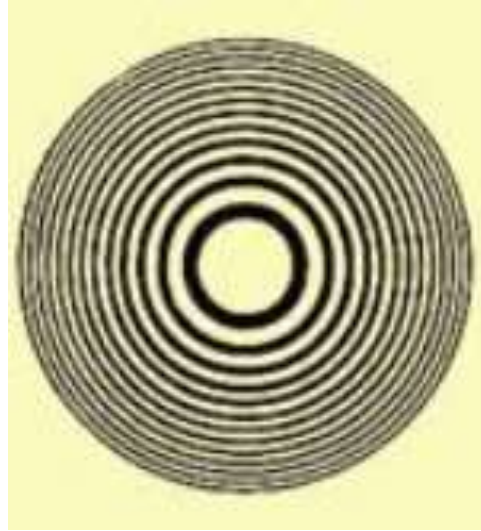
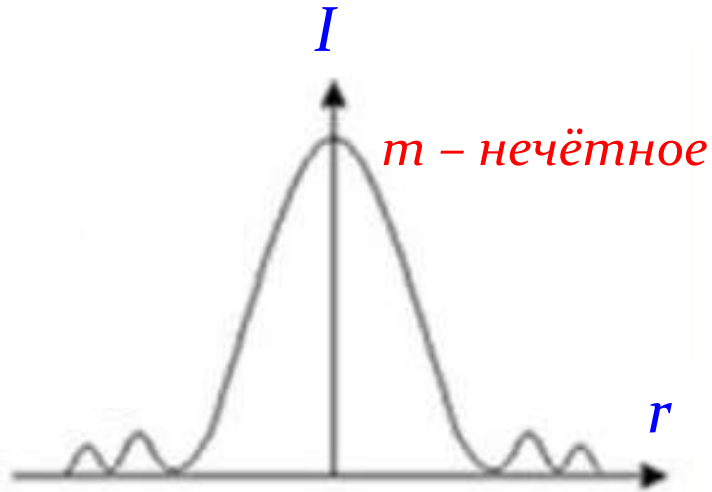


*б*

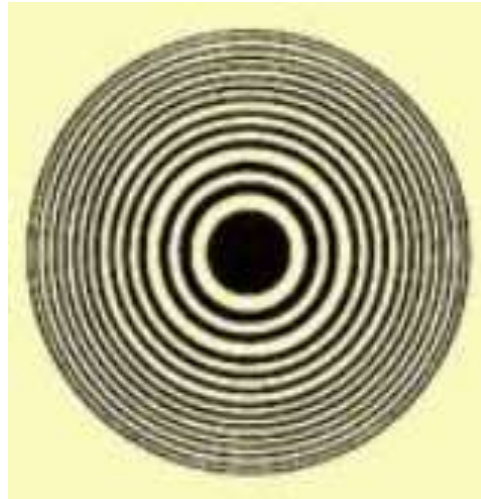
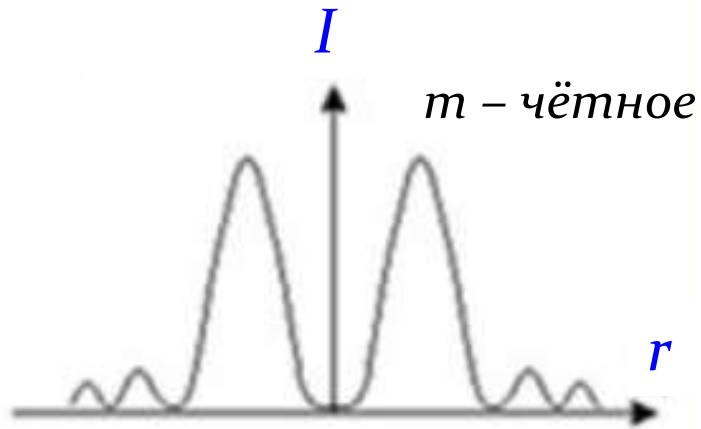




# Дифракция на круглом отверстии



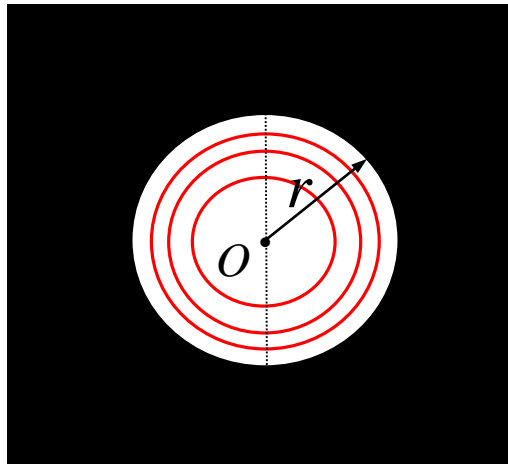
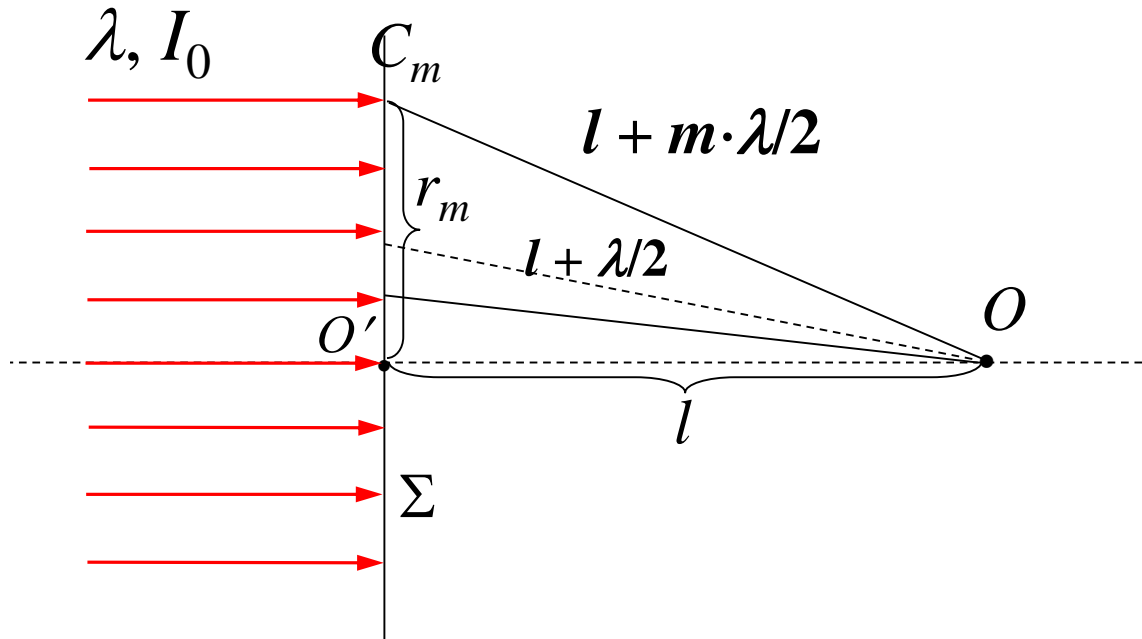
*В центре  
максимум*



*В центре  
минимум*

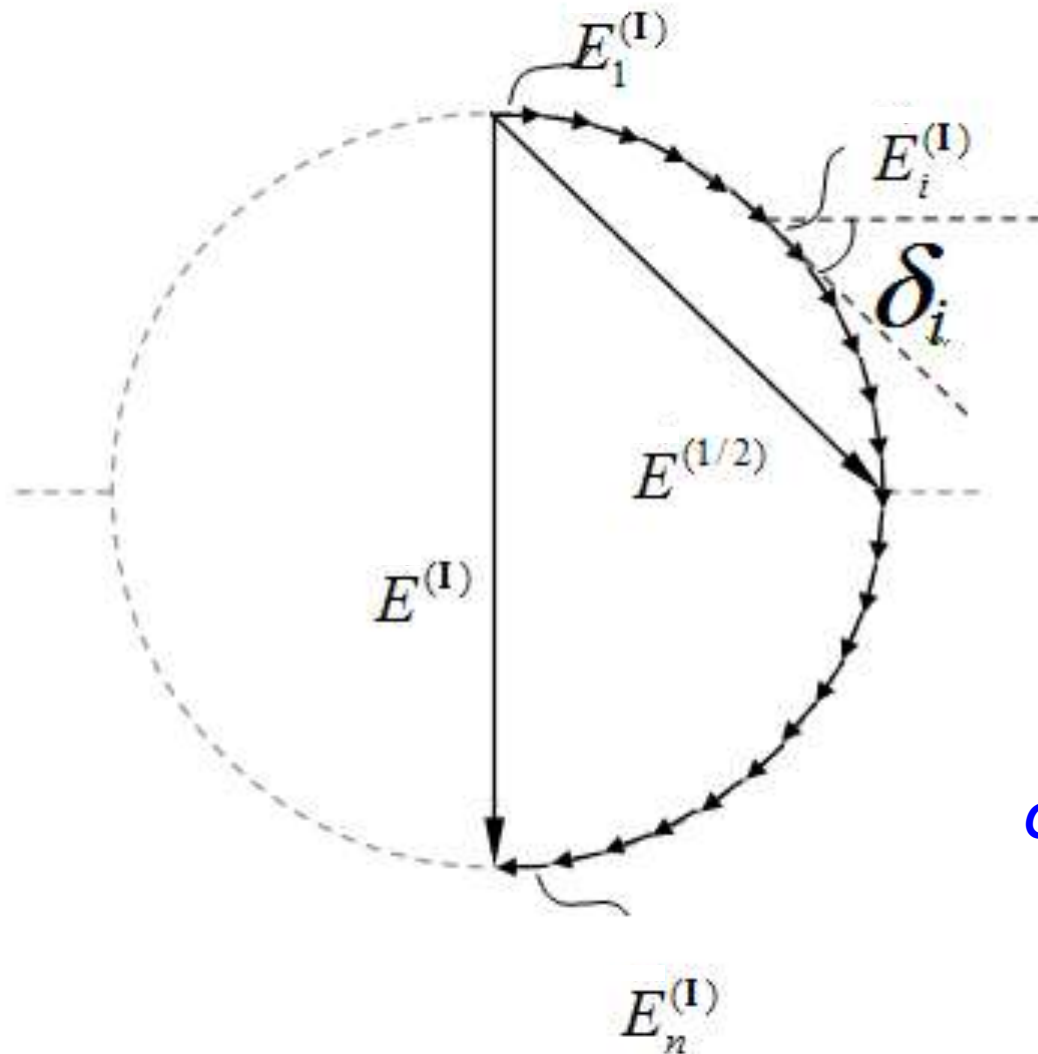
# Дифракция на круглом отверстии

## Вторичные источники и зоны Френеля



*Несколько первых зон  
Френеля внутри  
отверстия*

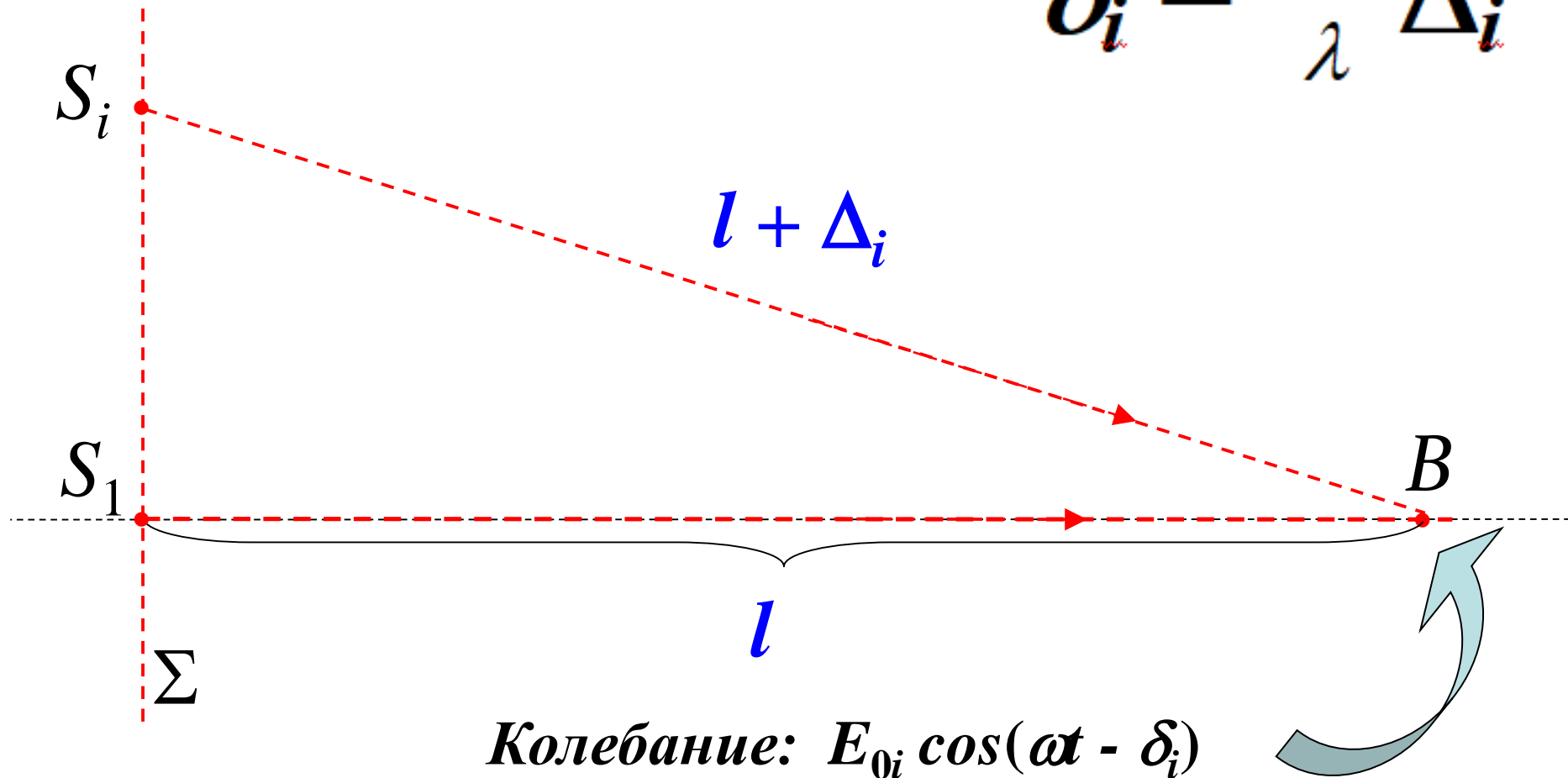
# Векторные диаграммы колебаний для центра дифракционной картины



От источников  
первой зоны  
Френеля

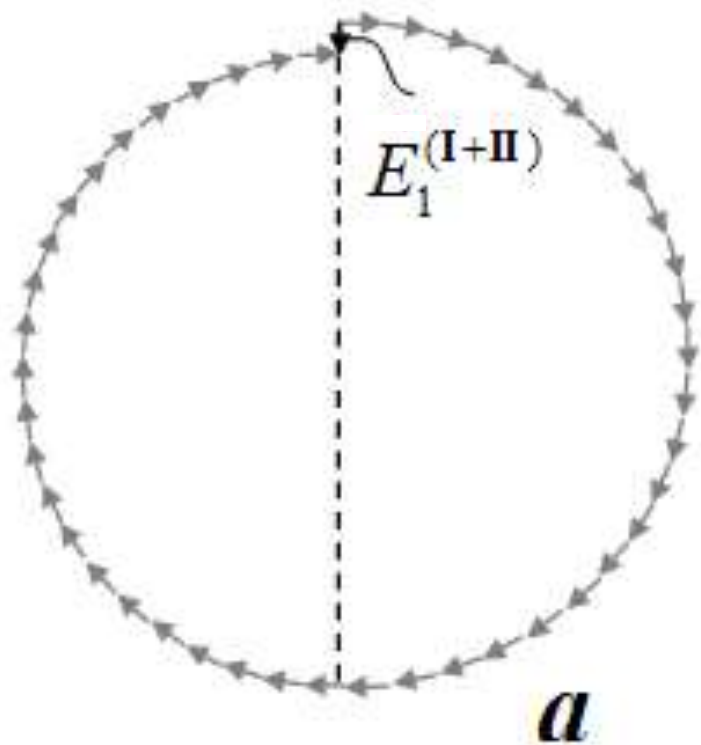
## К расчёту фазового запаздывания

$$\delta_i = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta_i$$

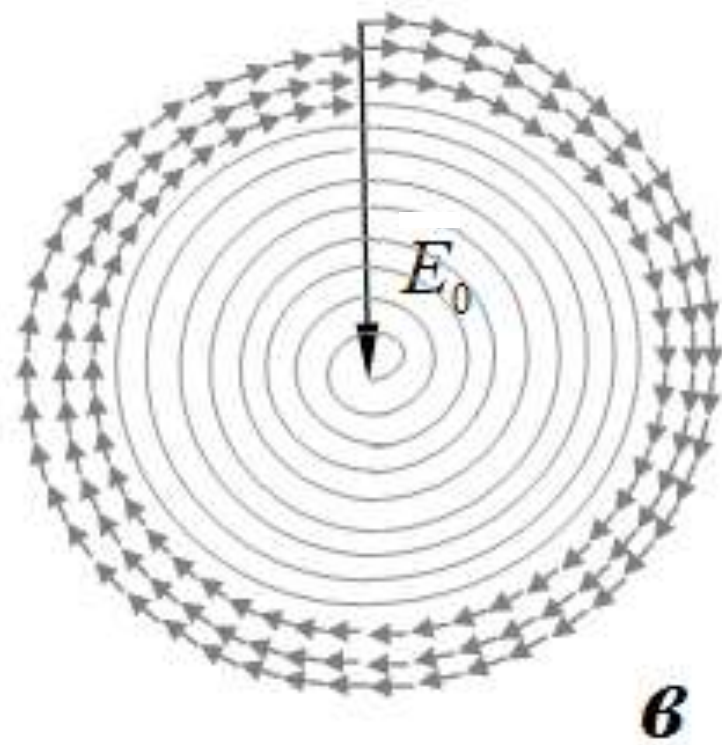




# Векторные диаграммы колебаний для центра дифракционной картины

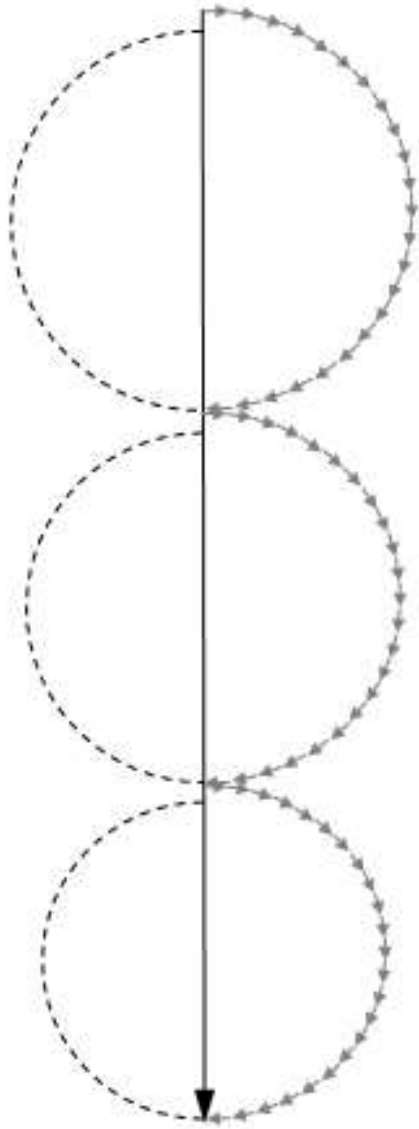


От источников первой и второй зоны Френеля



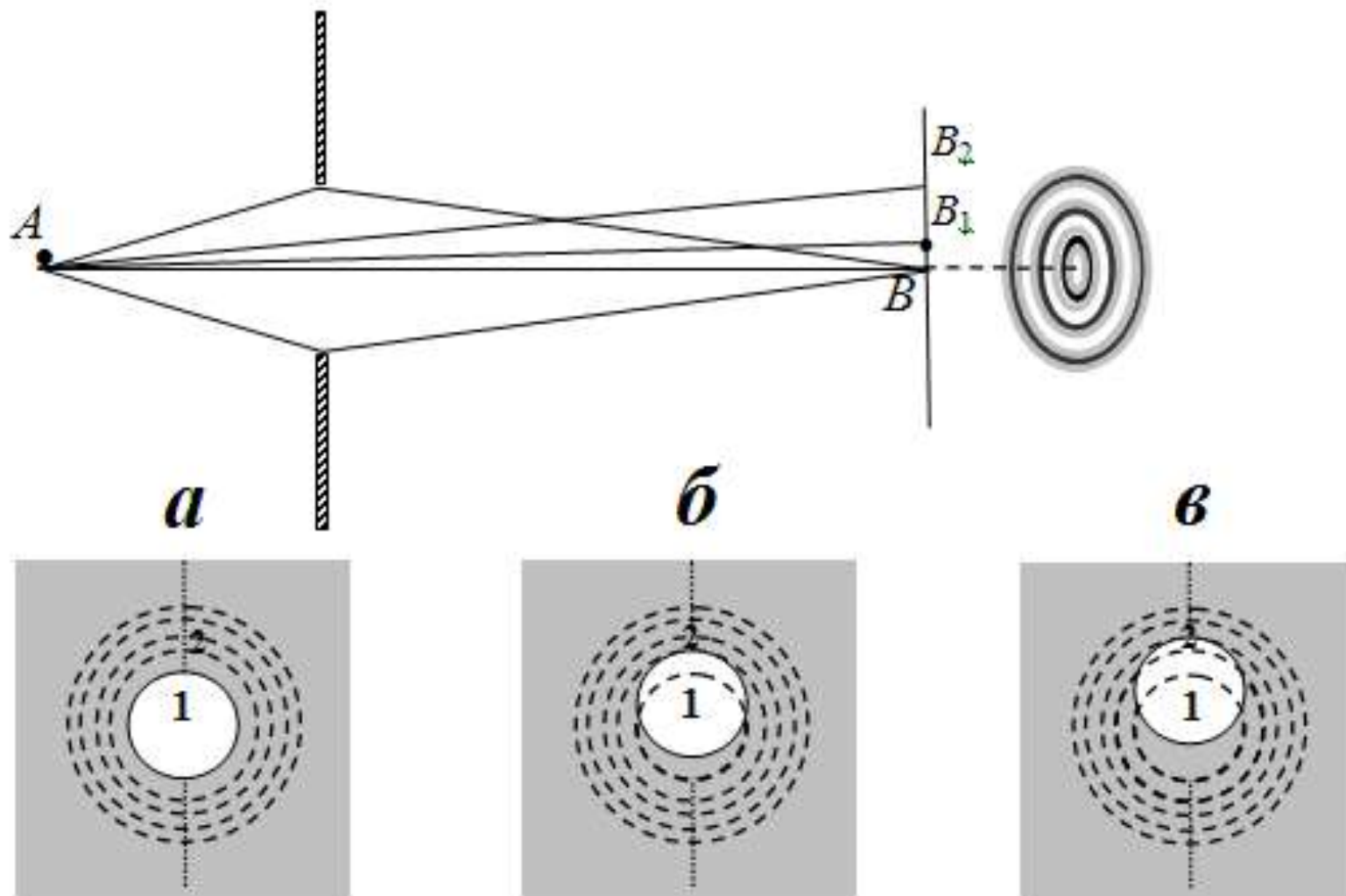
От источников всех зон Френеля

*Векторная диаграмма для амплитудной зонной  
пластинки*



$$F = \frac{r^2}{\lambda}$$

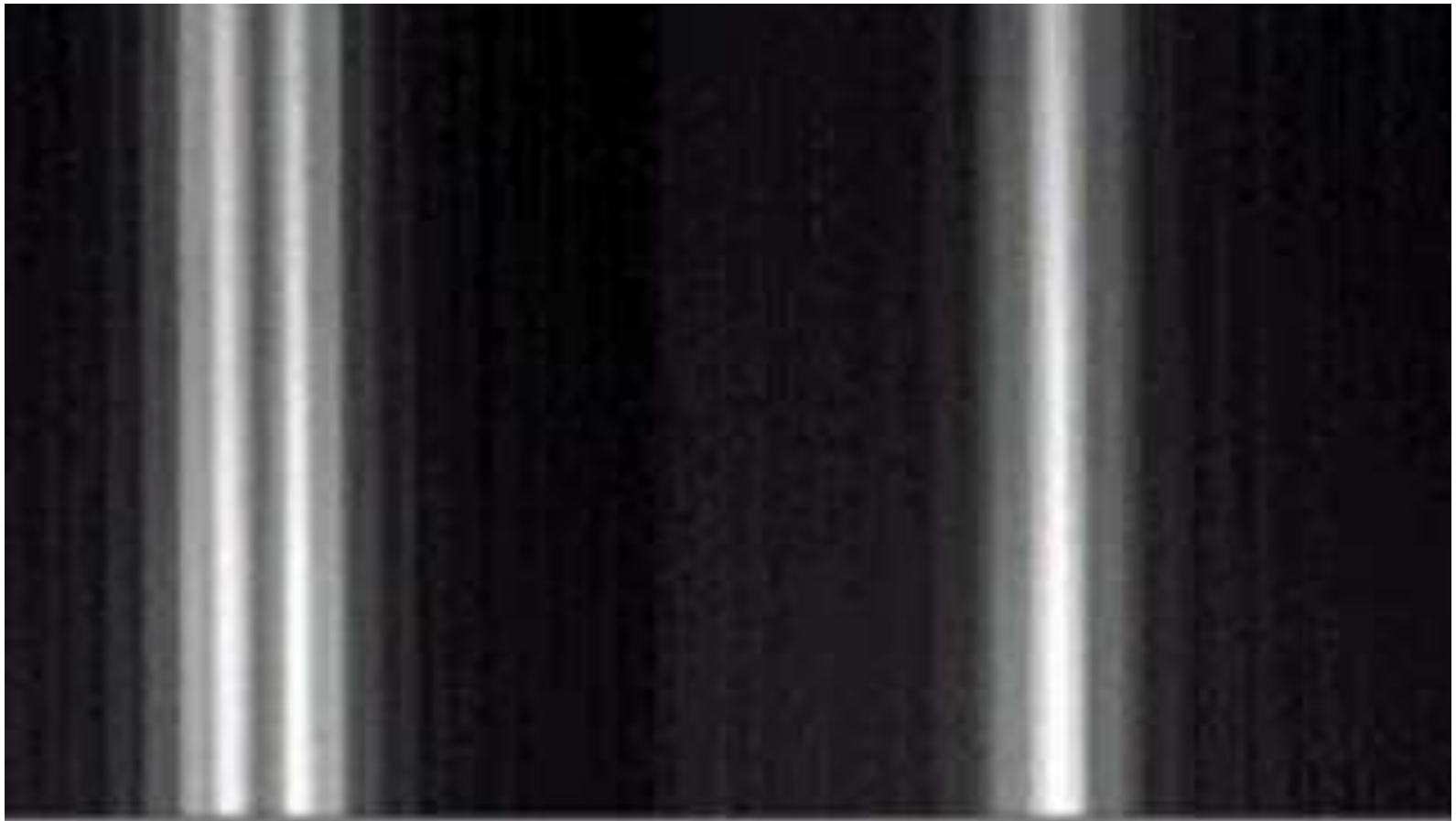
# К объяснению формирования дифракционной картины



# *Дифракционная картина Френеля на щели*

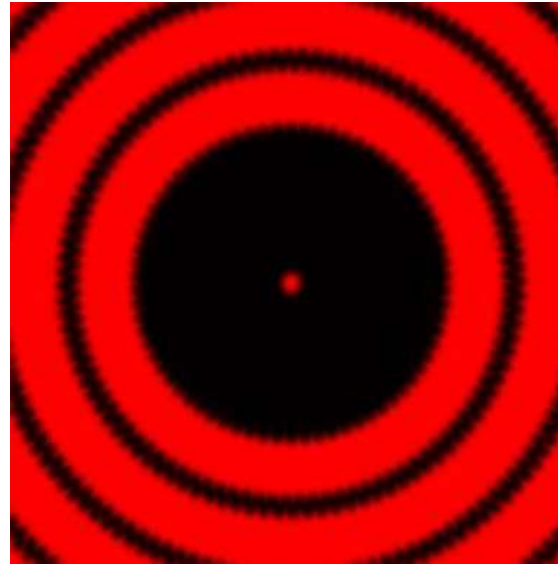
*В центре  
минимум*

*В центре  
максимум*

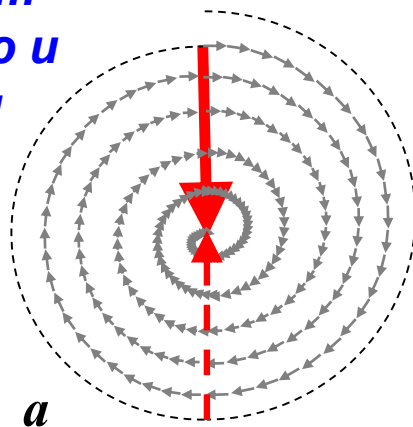




# Дифракция на диске. Пятно Пуассона - Араго

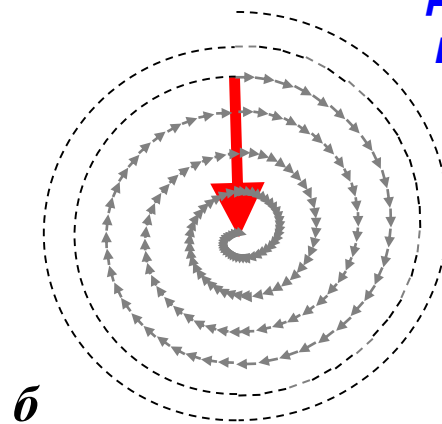


Диск закрывает  
первую / первую и  
вторую зоны  
Френеля



*a*

Диск закрывает  
первые четыре  
зоны Френеля

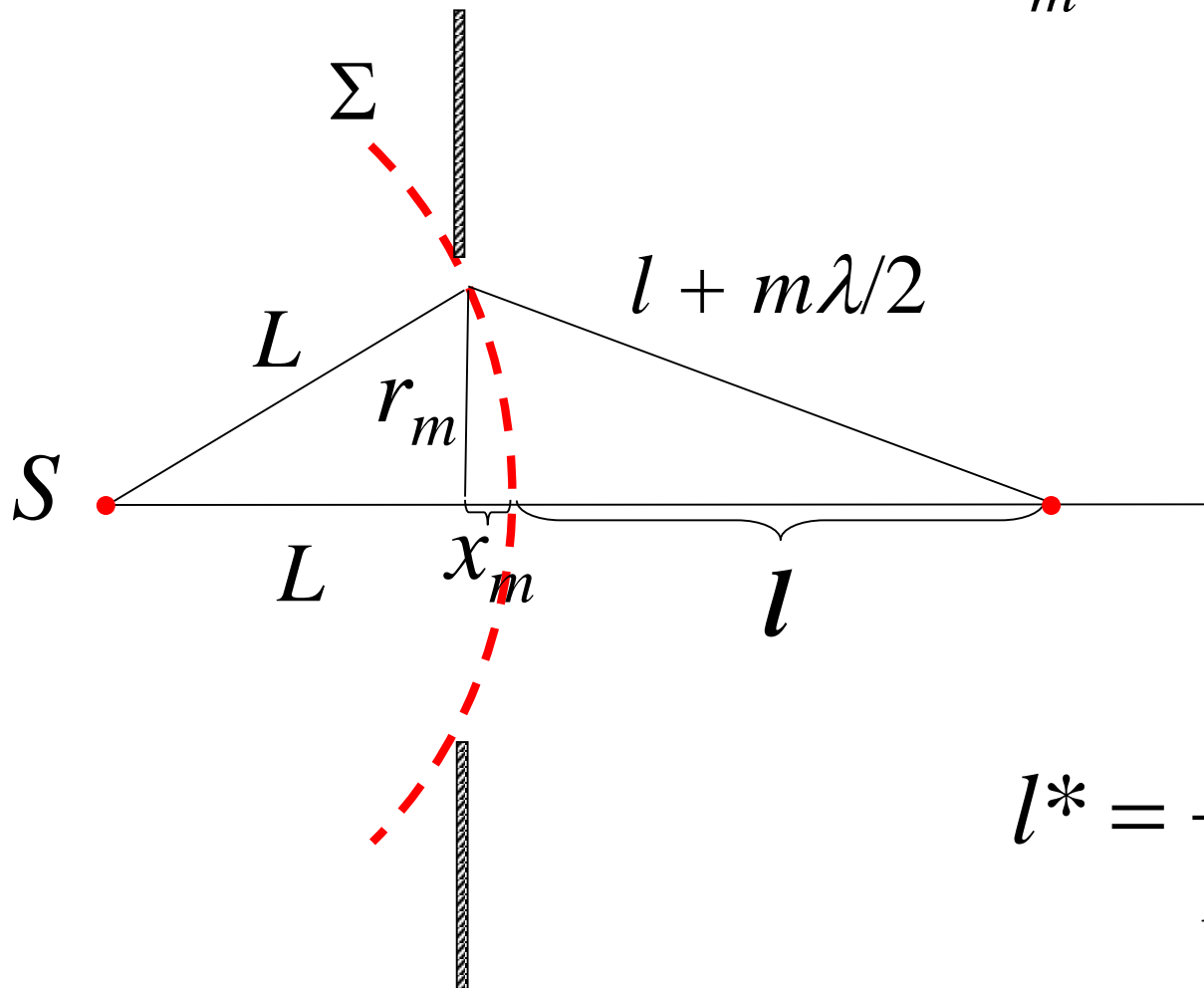


*б*

# Точечный источник, сферическая волна

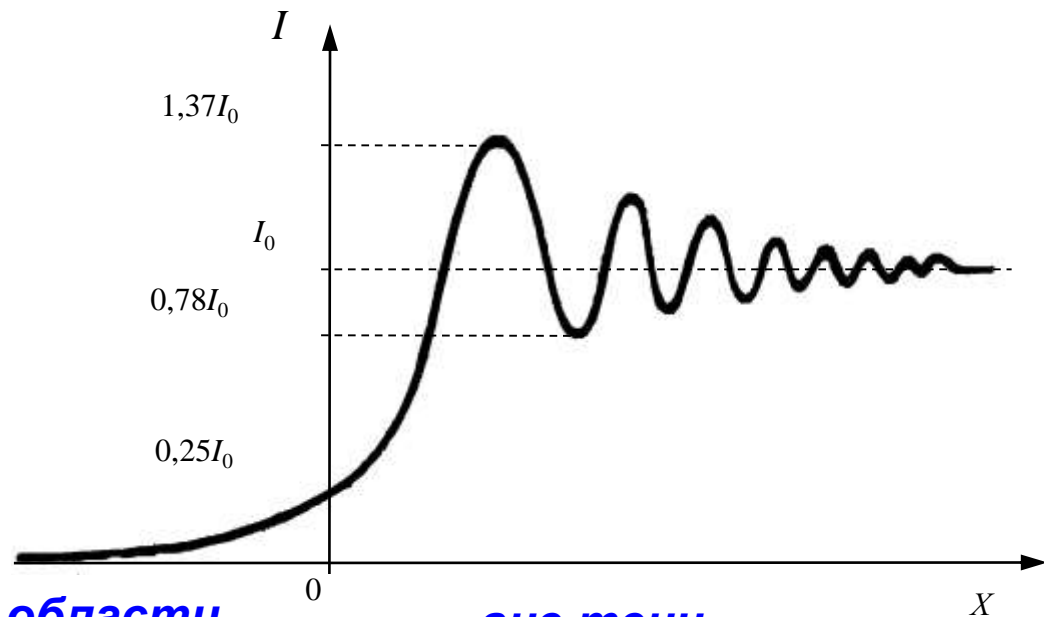
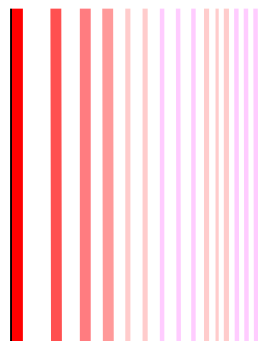
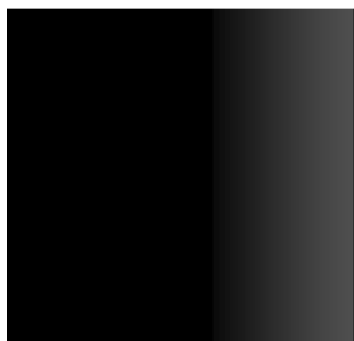
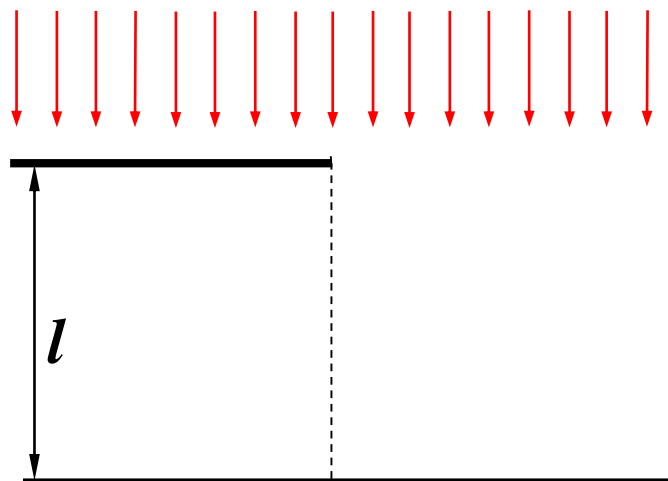
## Радиусы зон Френеля

$$r_m = \sqrt{m\lambda l^*}$$



$$l^* = \frac{Ll}{L+l}$$

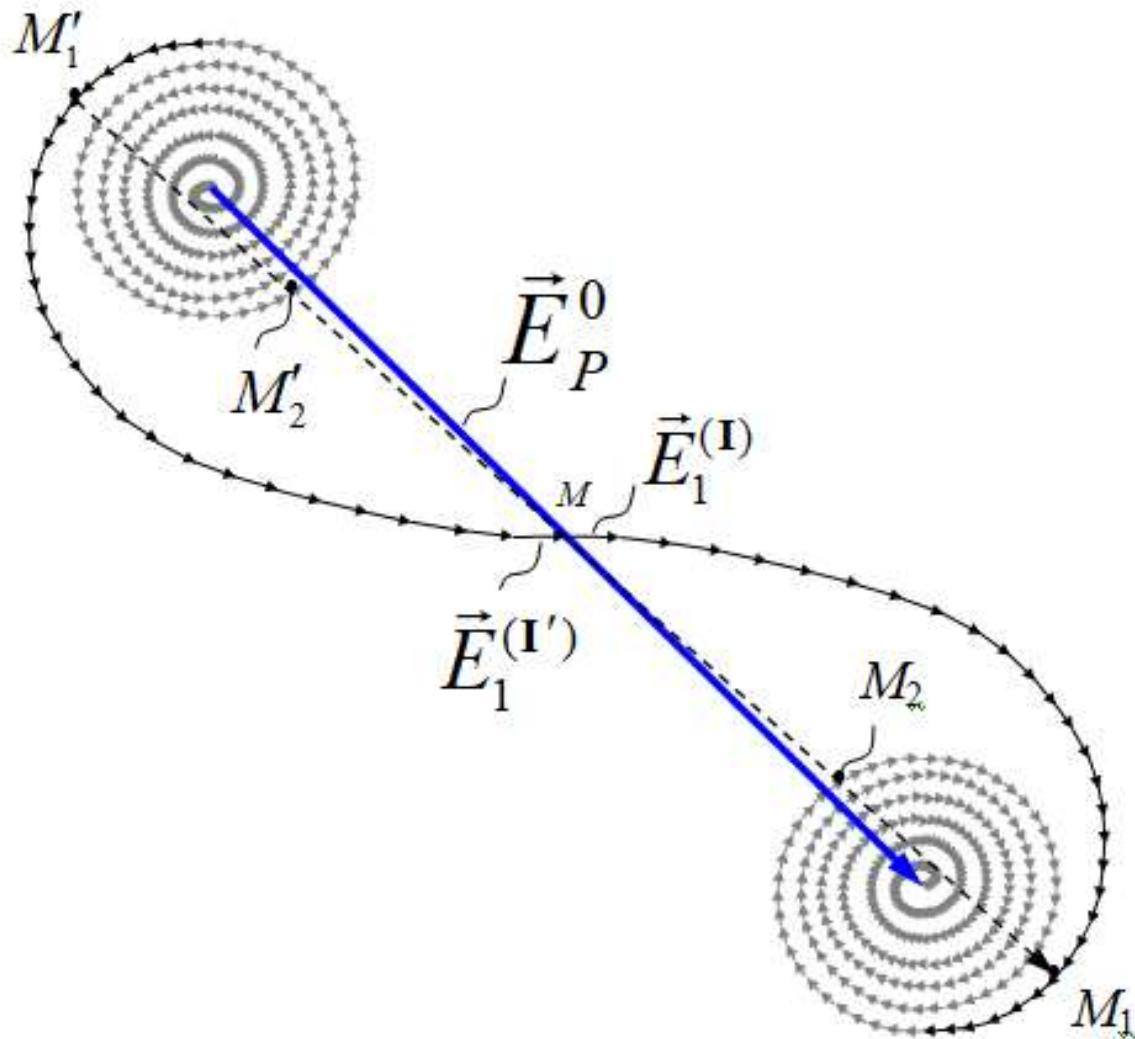
# Дифракция Френеля на полуплоскости и щели



в области тени

вне тени

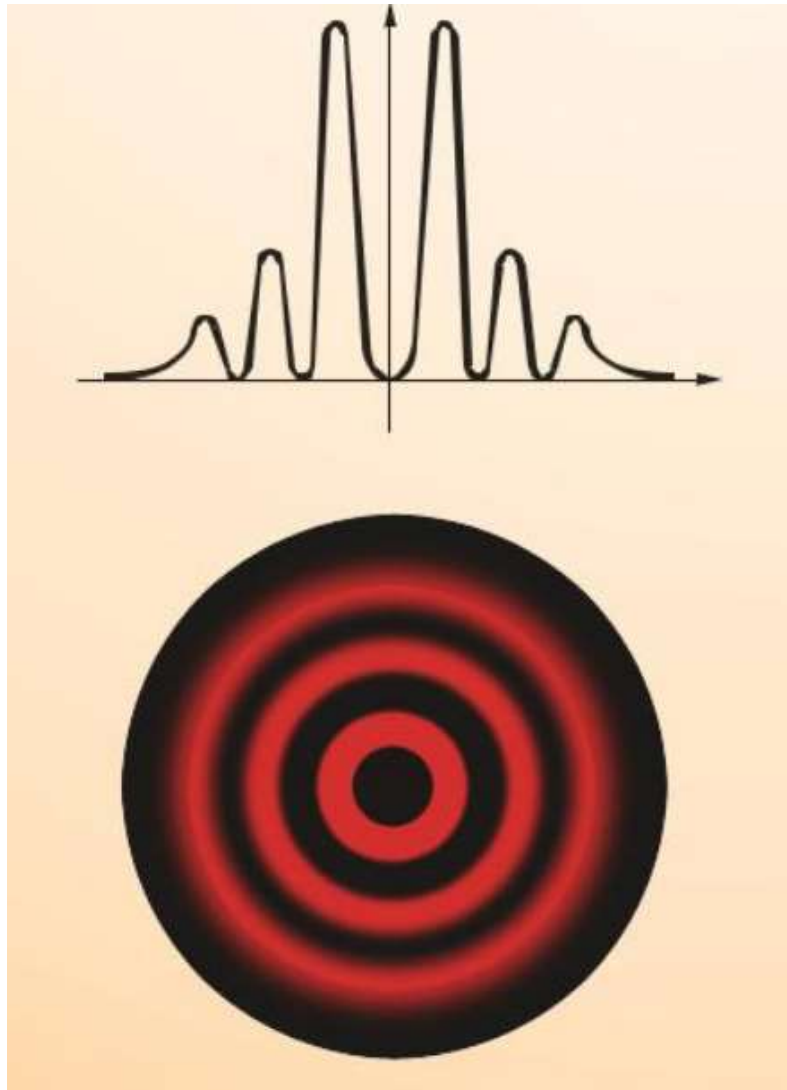
# Спираль Корню



\*\* см. стр. 97 - 104



**Открыты 1-я и 2-я зоны Френеля -  
в центре дифракционный минимум !**



**Круглое отверстие**



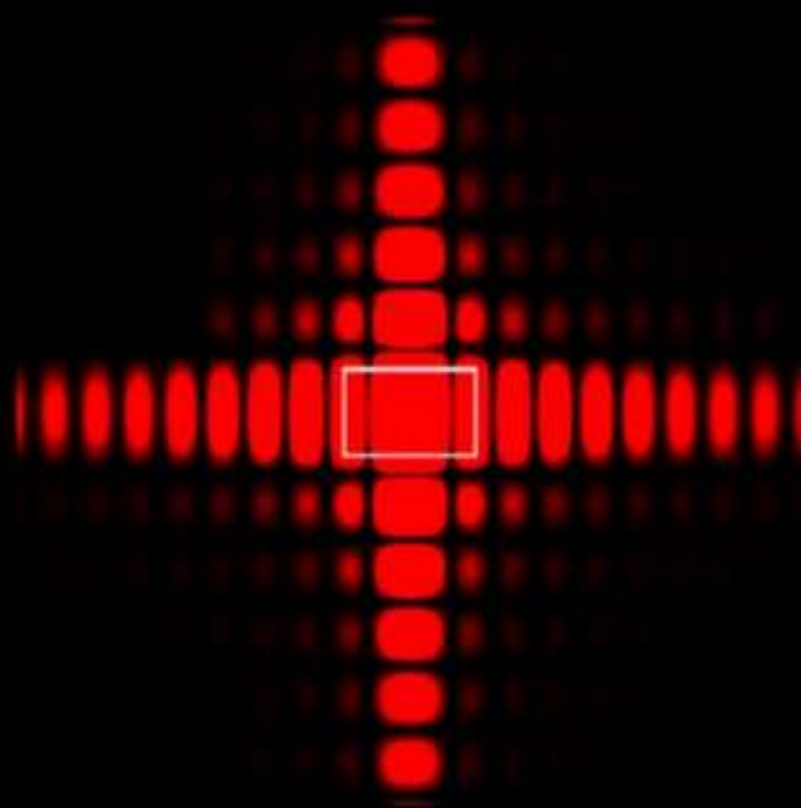
**горизонтальная щель**

# Лекция 11. Дифракция Фраунгофера



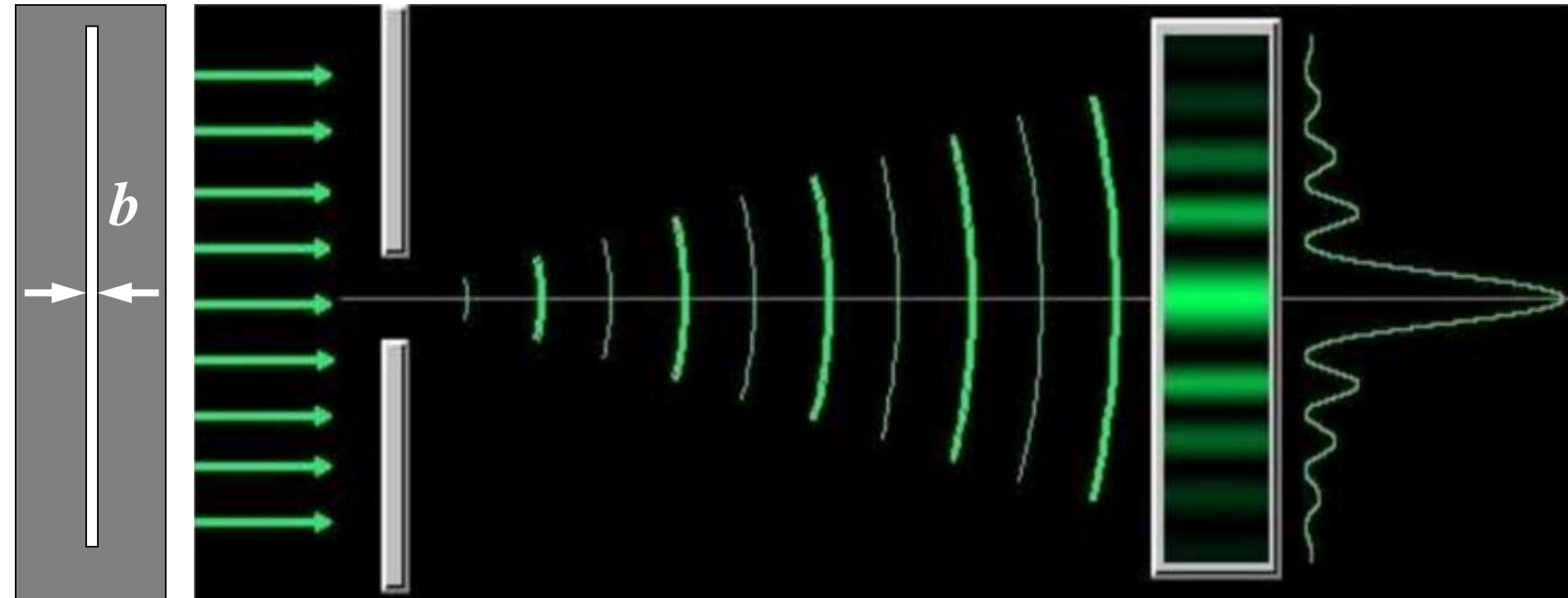
Круглое  
отверстие

Прямоугольное  
отверстие

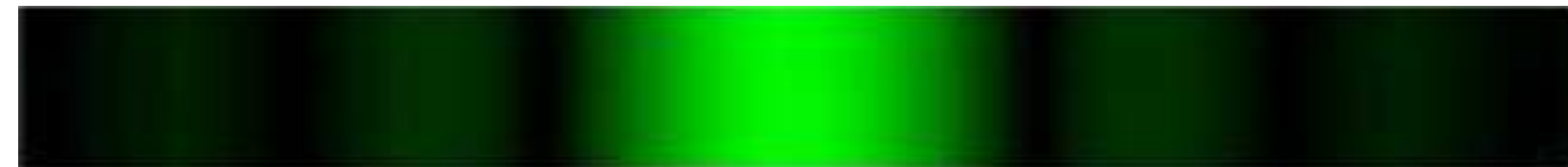


# Дифракция Фраунгофера на щели

Щель

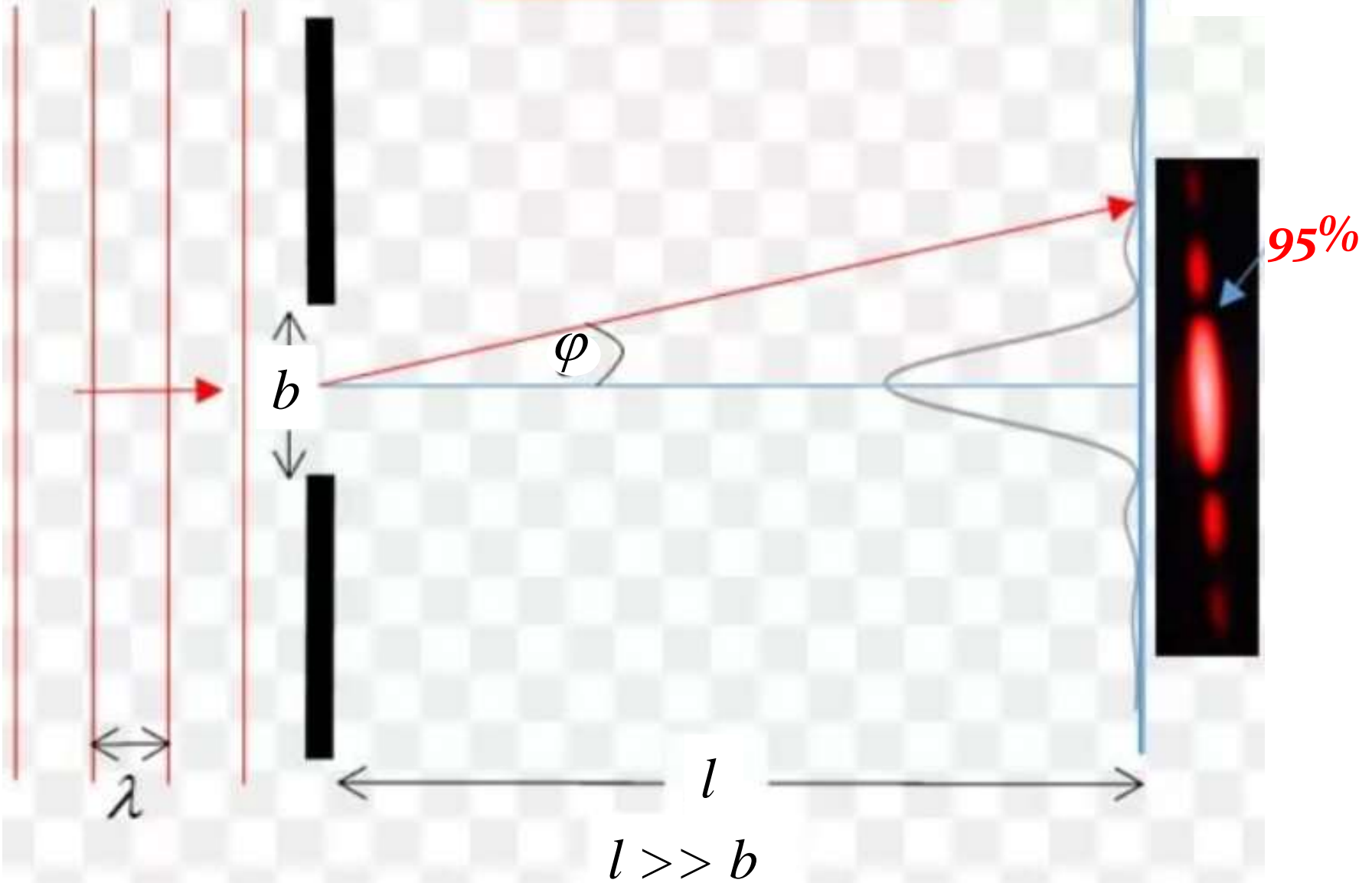


Центральный максимум:  $\approx 95\%$  энергии



incident plane wave

Fraunhofer Diffraction



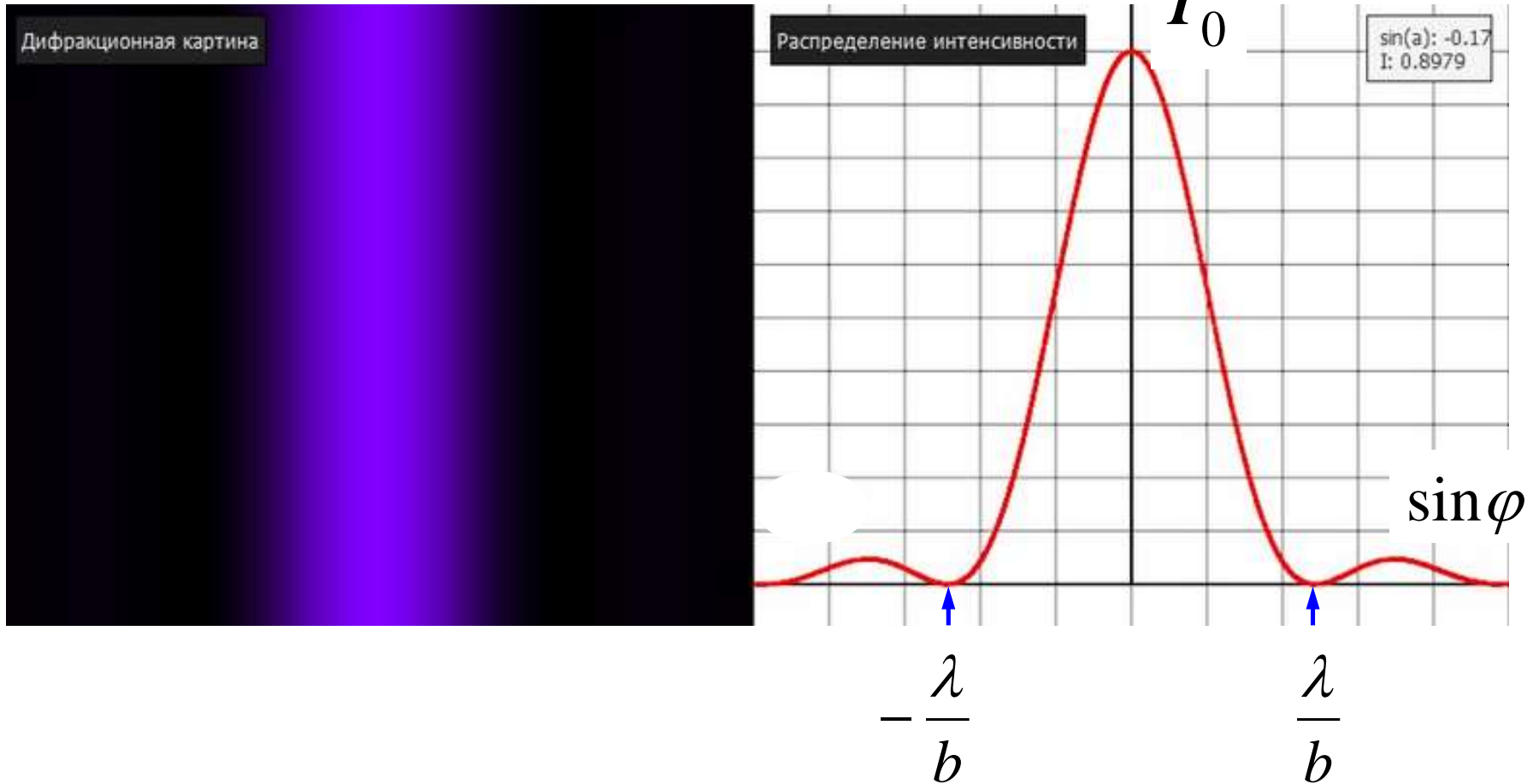


# Дифракция Фраунгофера

Центральный максимум

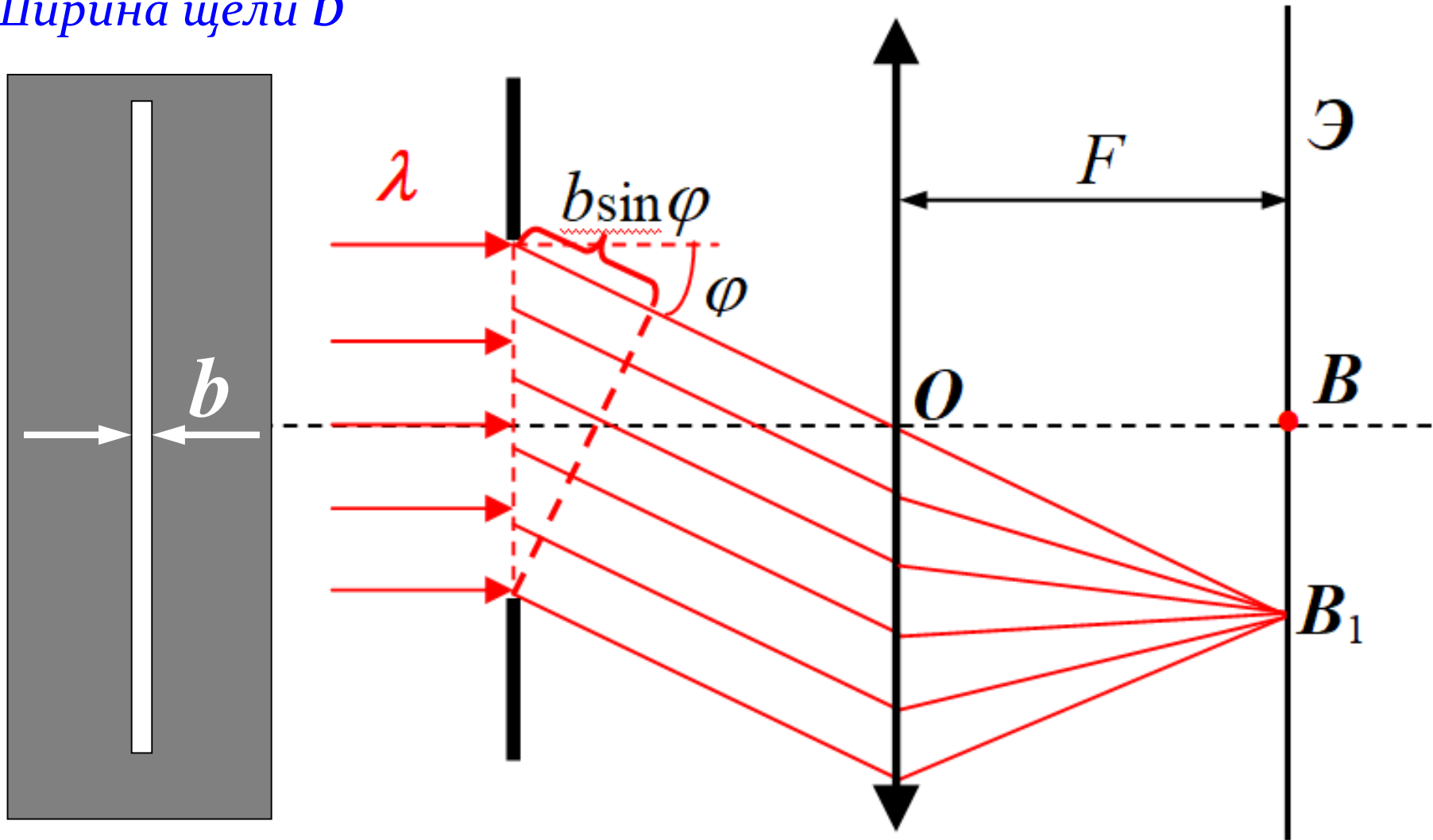


Распределение интенсивности



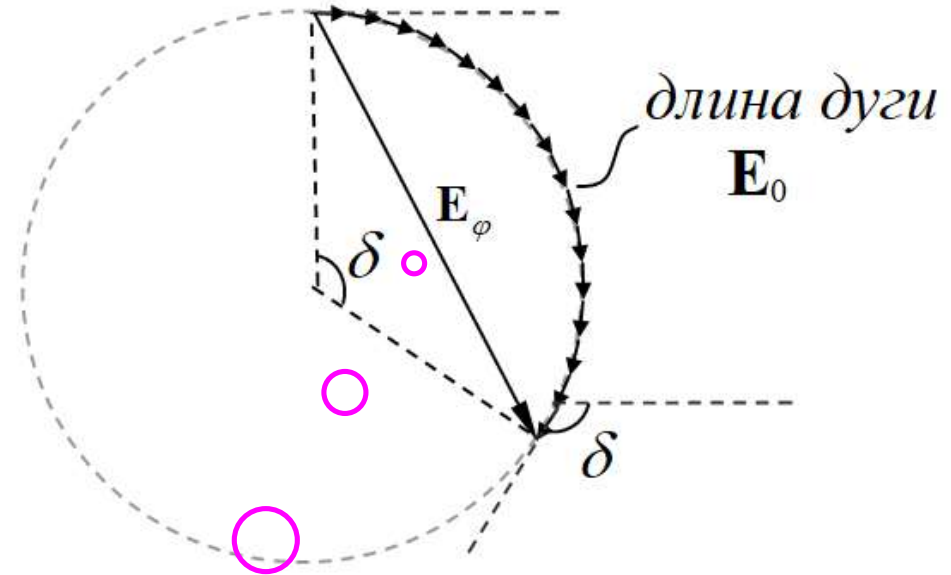
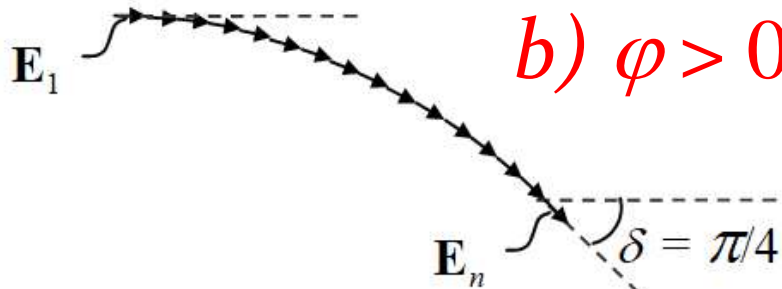
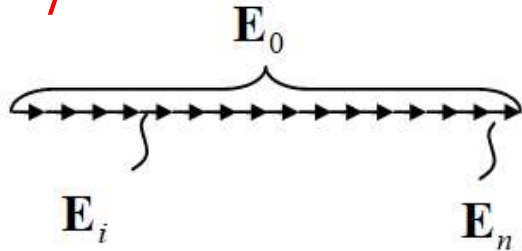
# Схема наблюдения

Ширина щели  $b$

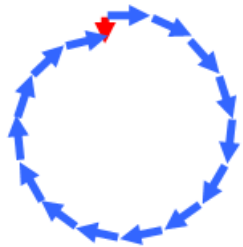


# Векторные диаграммы

a)  $\varphi = 0$



c)  $0 < \varphi < \varphi_1^{min}$



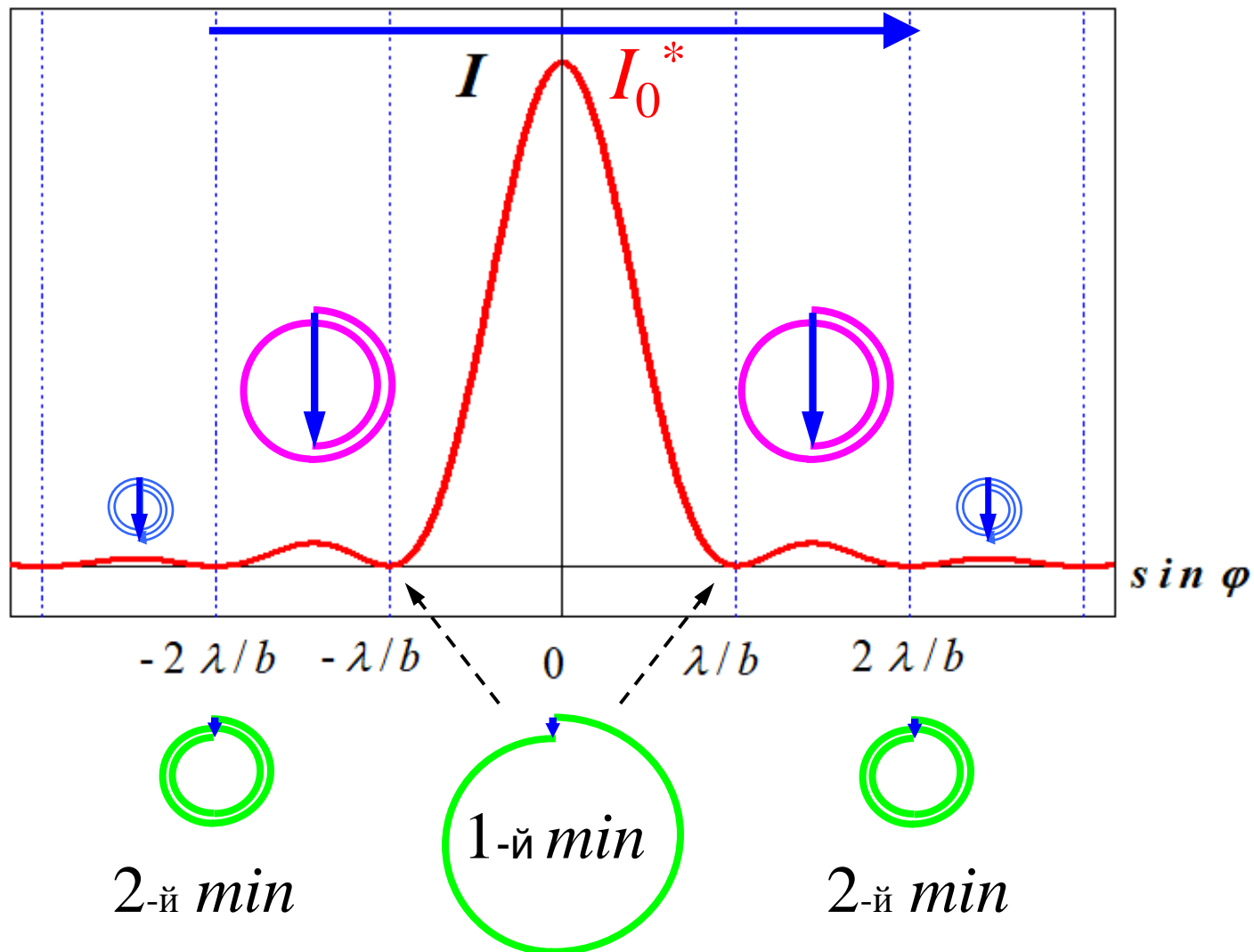
первый минимум

$$\underline{b \sin \varphi_1} = \pm \lambda$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot b \sin \varphi$$

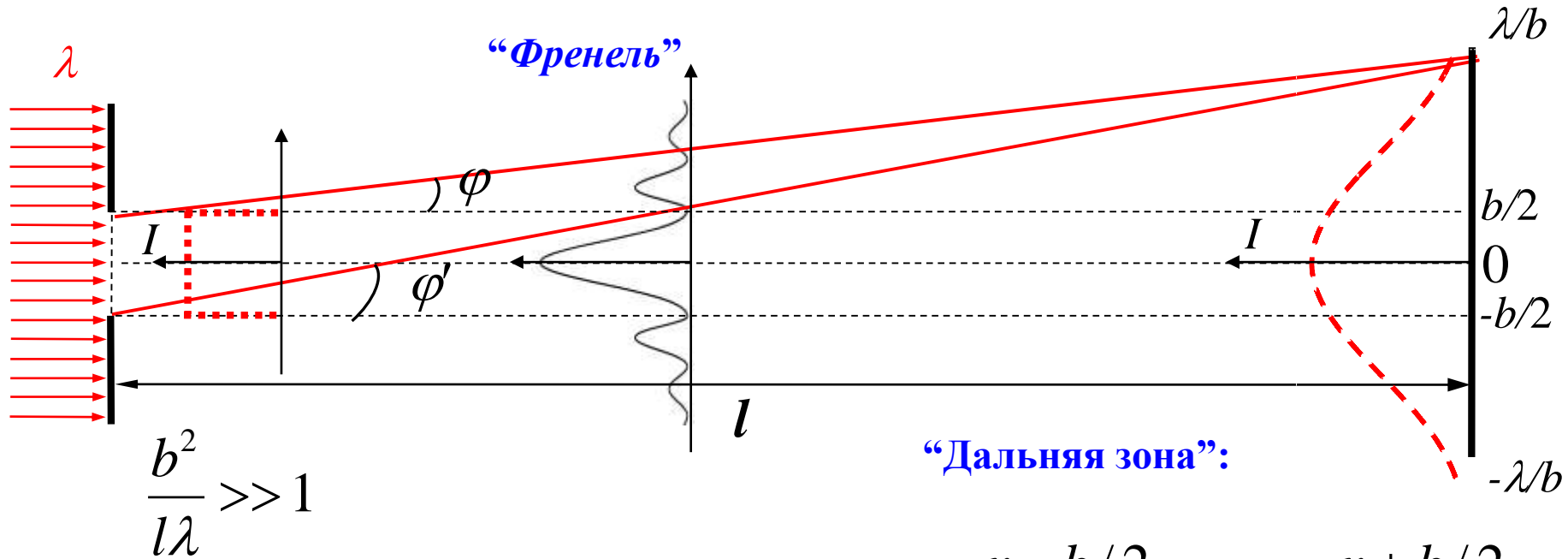
# Дифракция Фраунгофера на щели

центральный  
максимум





# “Классификация дифракционных явлений”

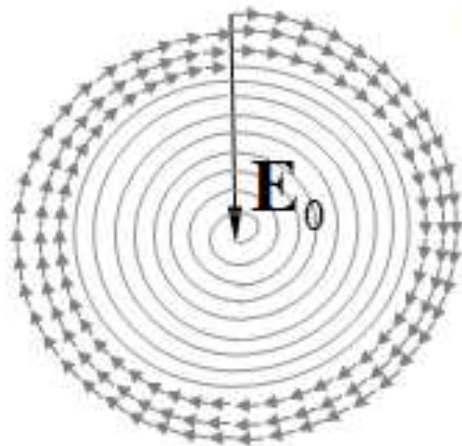
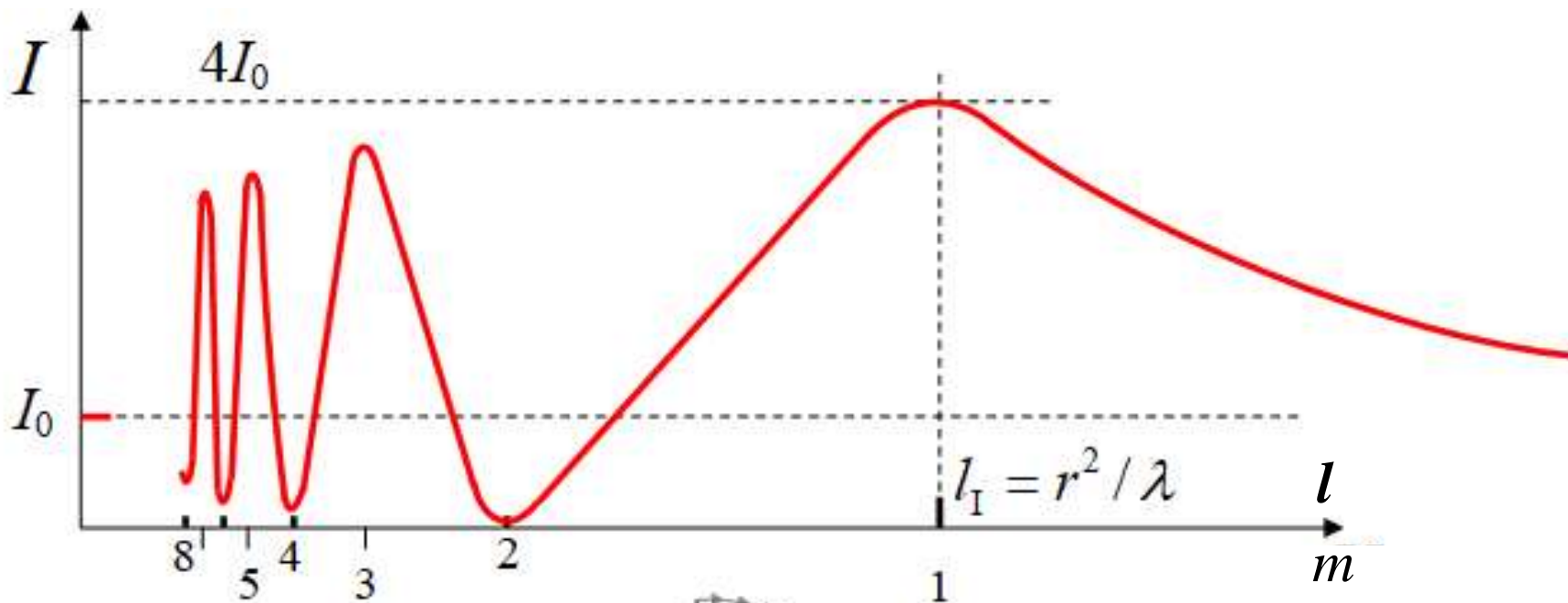


$$\varphi \cong \frac{x - b/2}{l}; \quad \varphi' \cong \frac{x + b/2}{l}$$

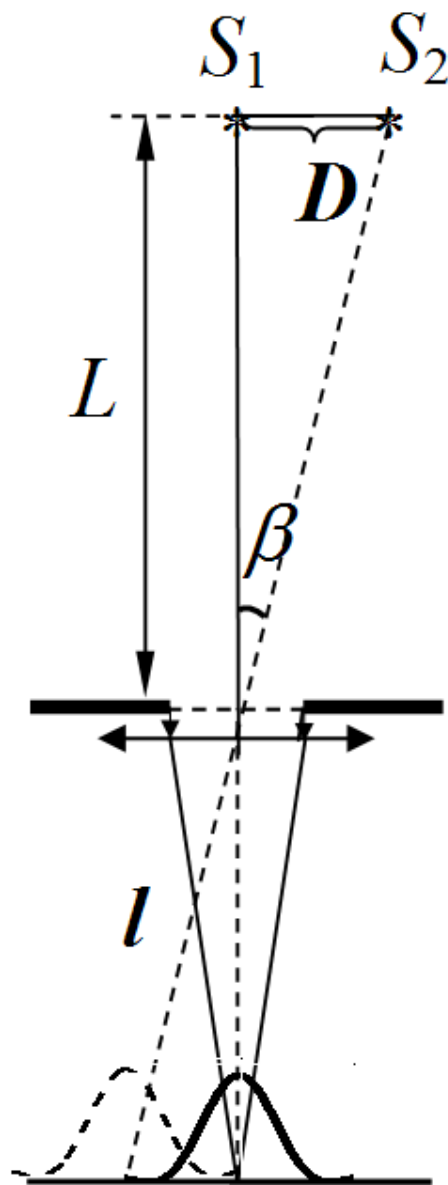
параллельны:  $\varphi \approx \varphi'$ , если  $b \ll x_1^{\min}$ :  $b \ll l \cdot \frac{\lambda}{b}$

$$\frac{b^2}{l\lambda} \ll 1$$

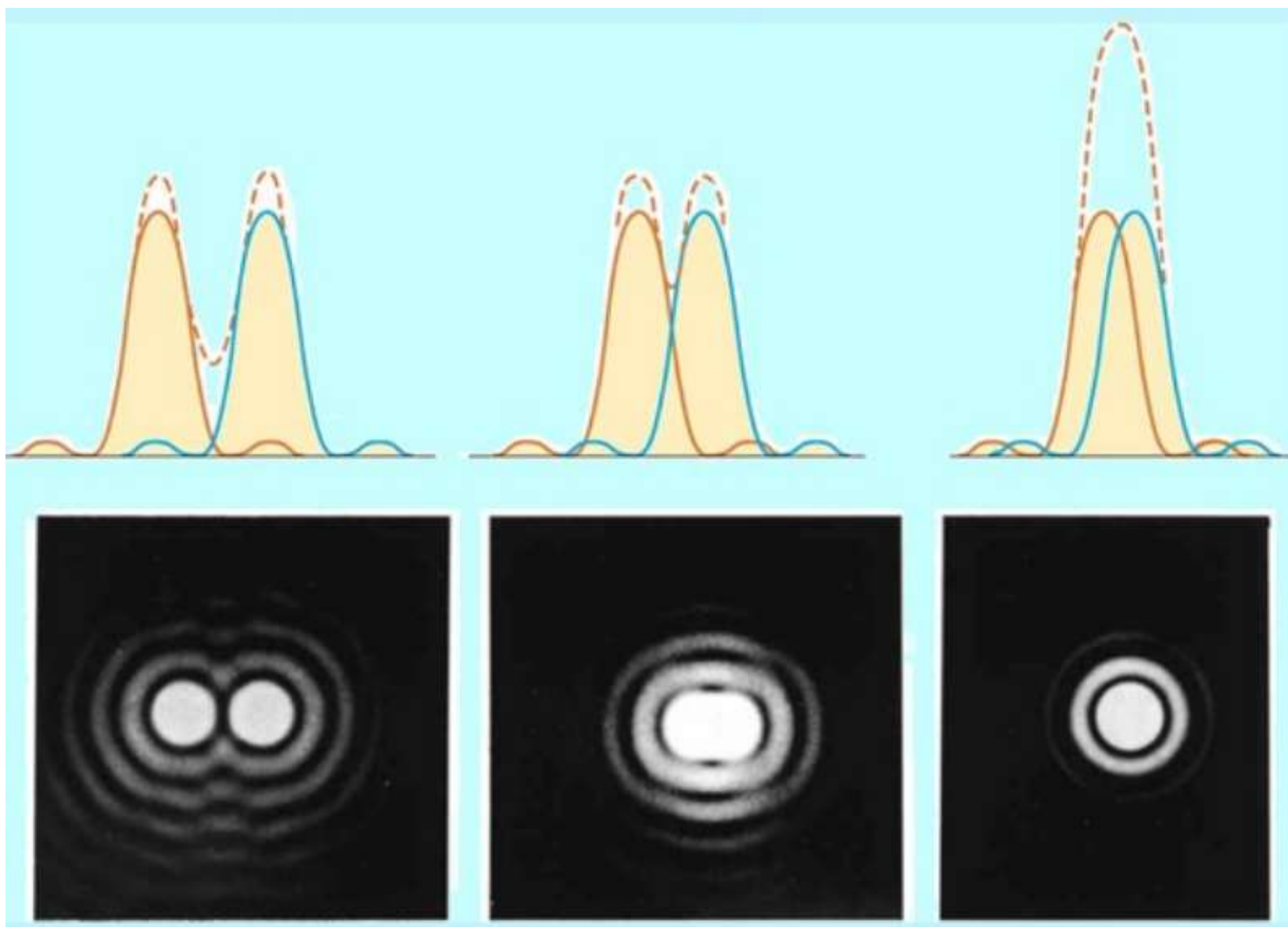
# Интенсивность в центре дифракционной картины



# К объяснению предельного разрешения



# Предел разрешения оптических приборов. Критерий Рэля

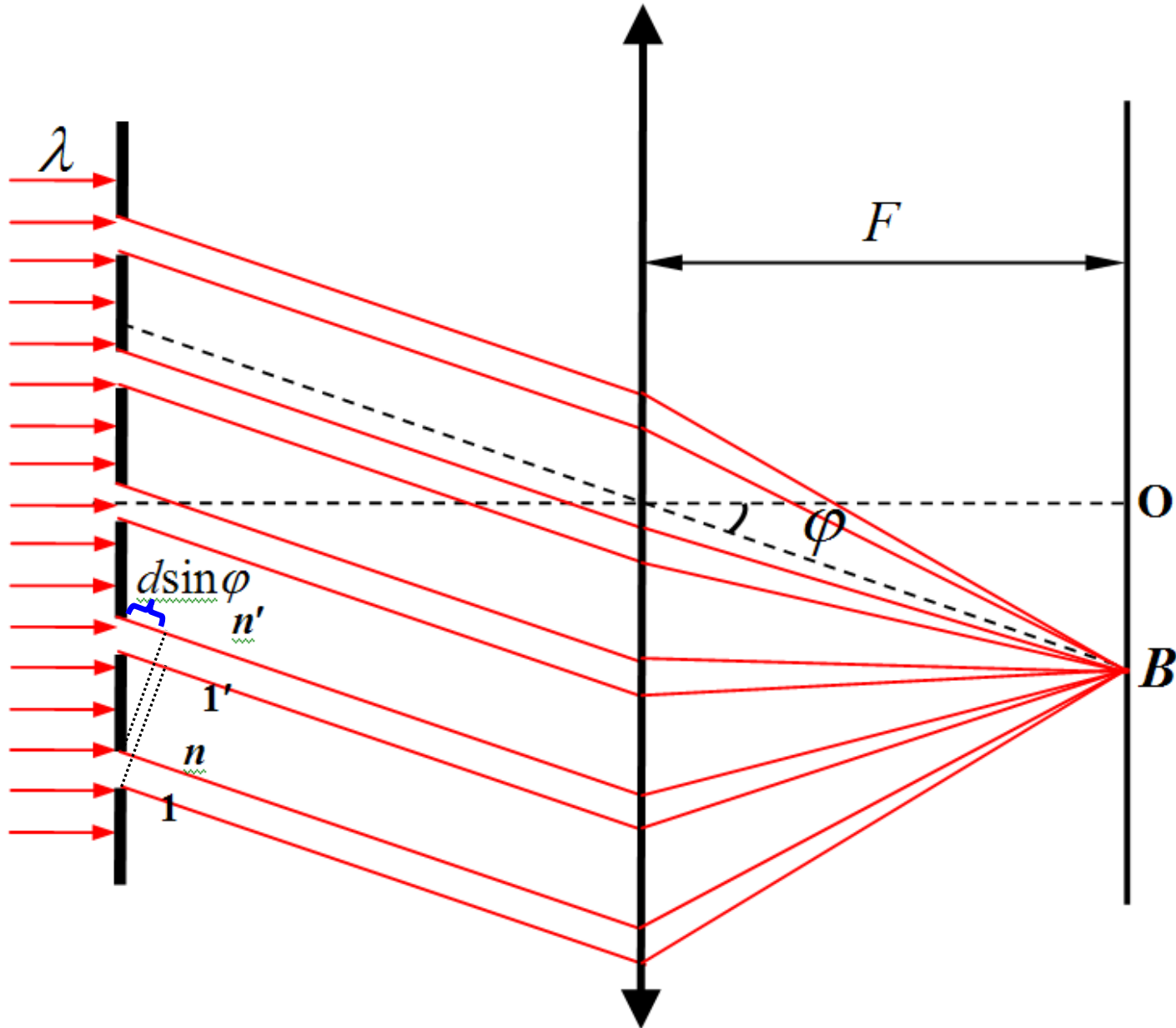




# *Лекция 12. Дифракционная решётка. Поляризация света*

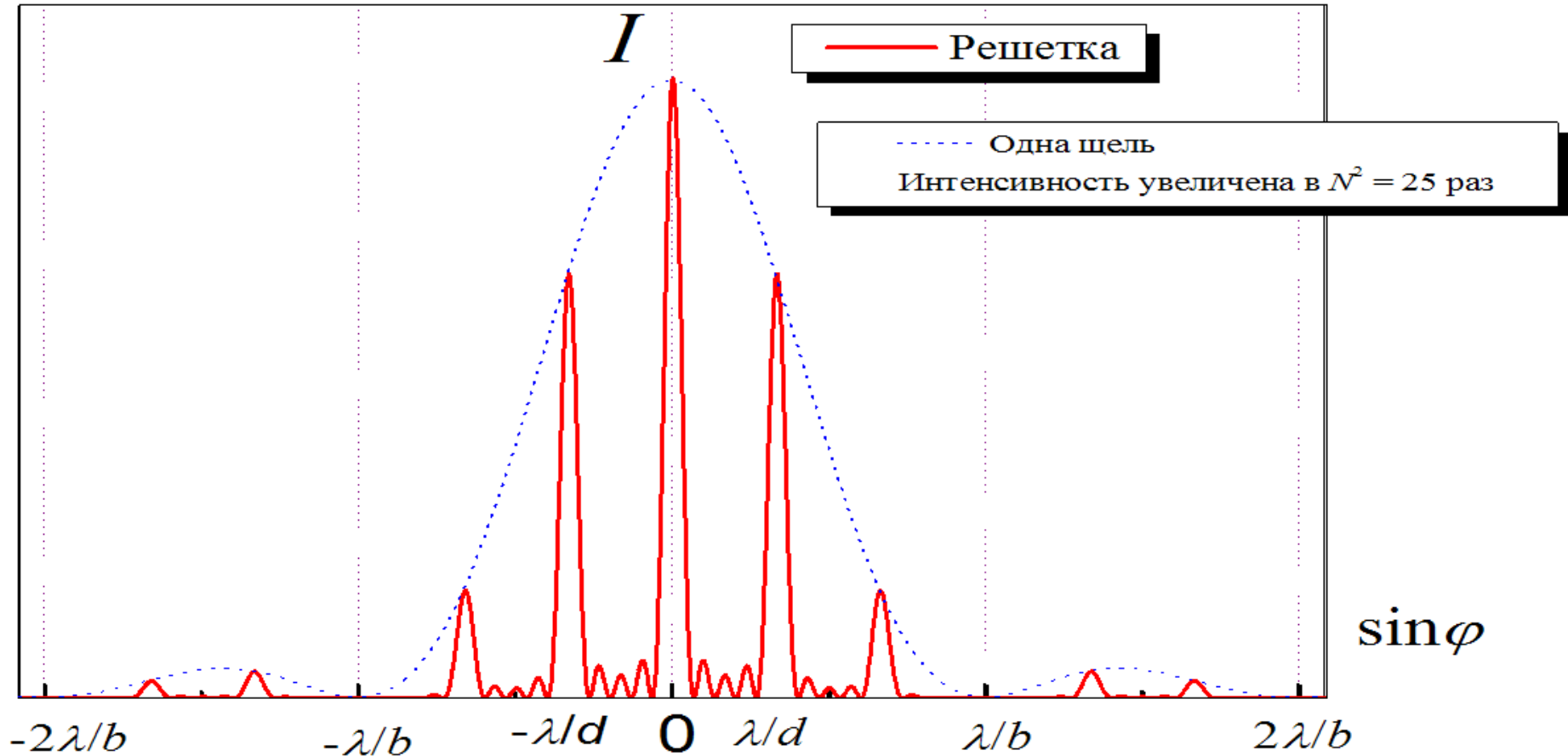


# Дифракция на решётке



# Дифракционная картина от решётки

5 щелей,  $d = 3b$



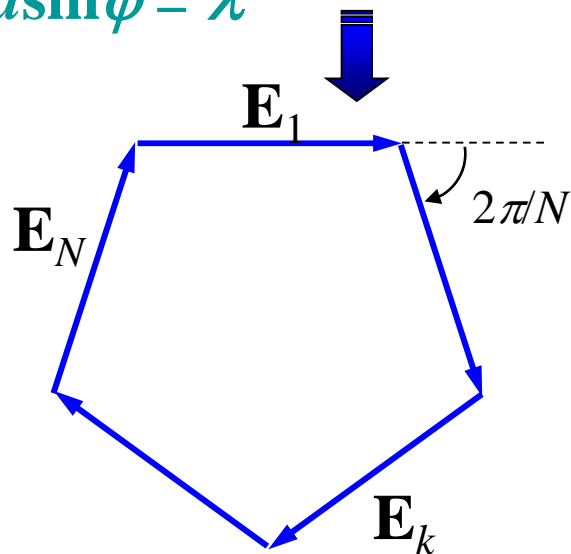
Главные максимумы :  $d \sin \varphi = \pm m \lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots$

# К формированию дополнительных минимумов

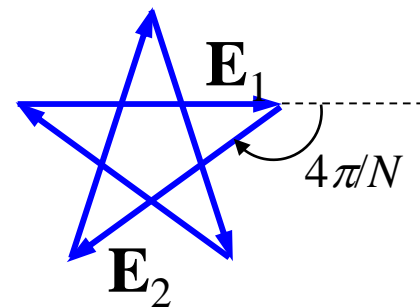
$$Nd \sin \varphi = \pm m_1 \lambda$$

Пример: число щелей  $N = 5$

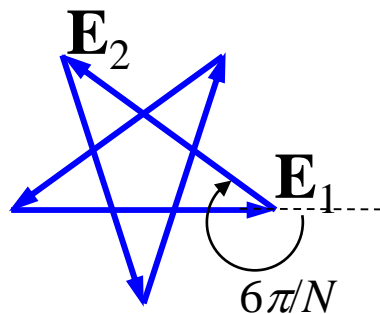
$$Nd \sin \varphi = \lambda$$



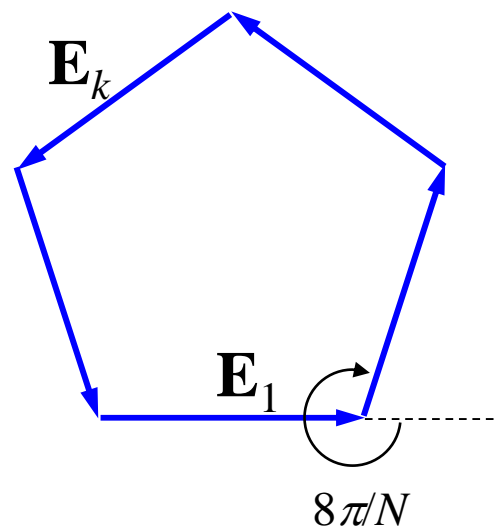
$$Nd \sin \varphi = 2\lambda$$



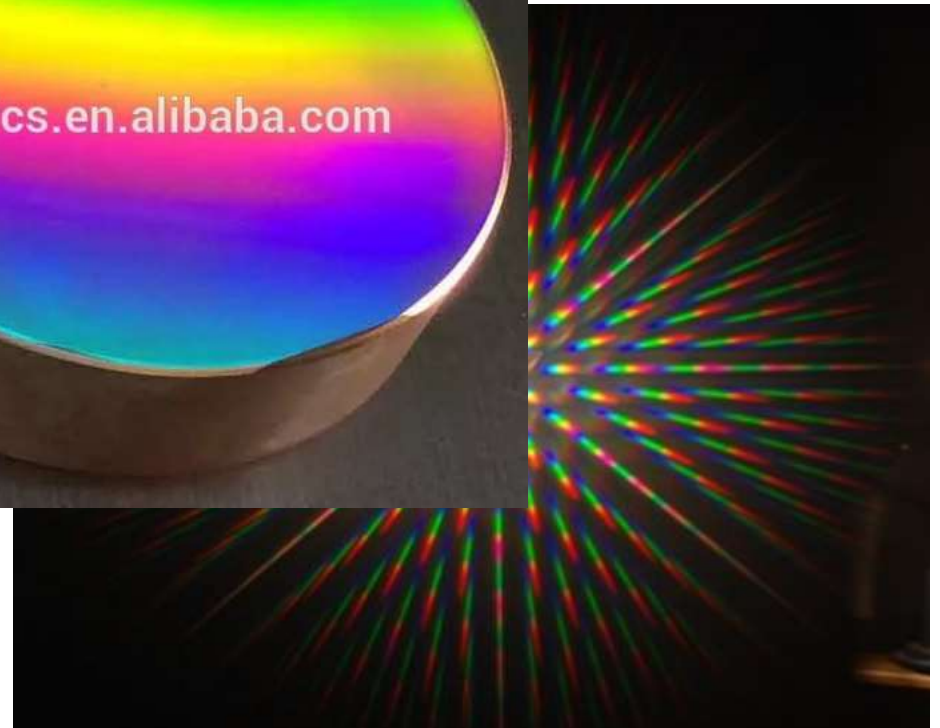
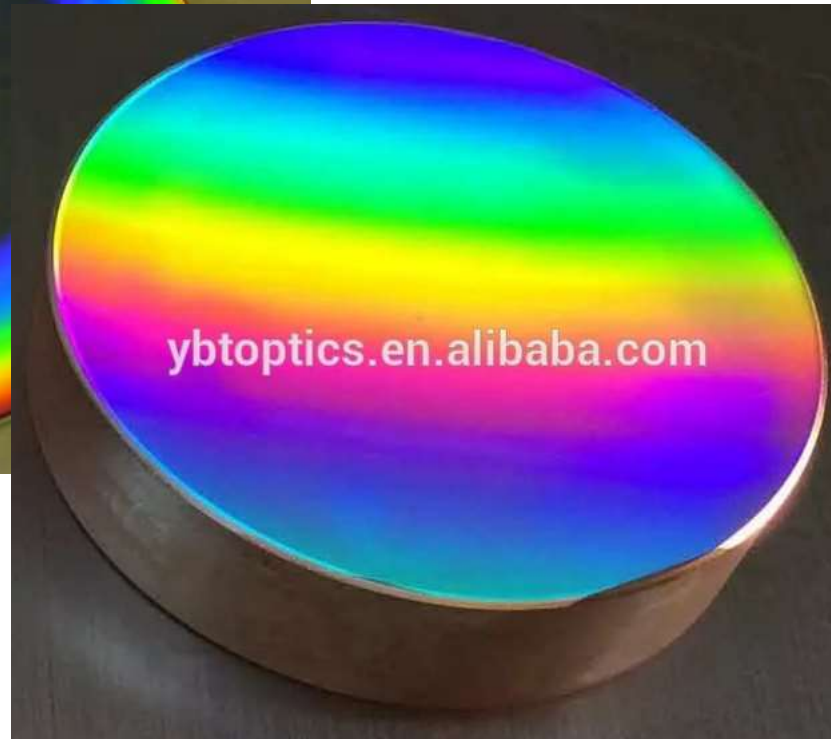
$$Nd \sin \varphi = 3\lambda$$



$$Nd \sin \varphi = 4\lambda$$

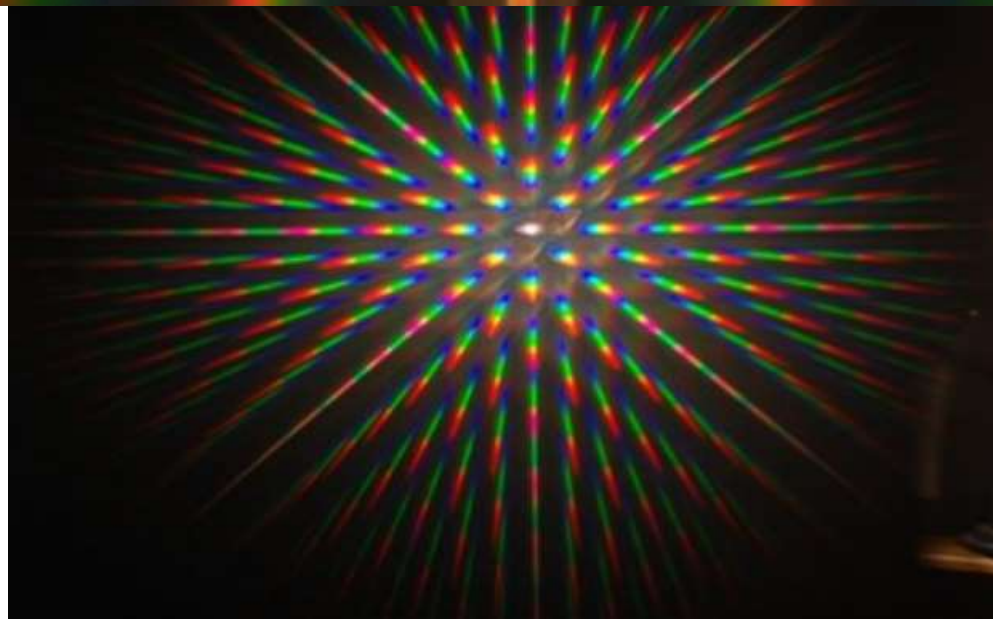


# Дифракционное разложение света в спектр





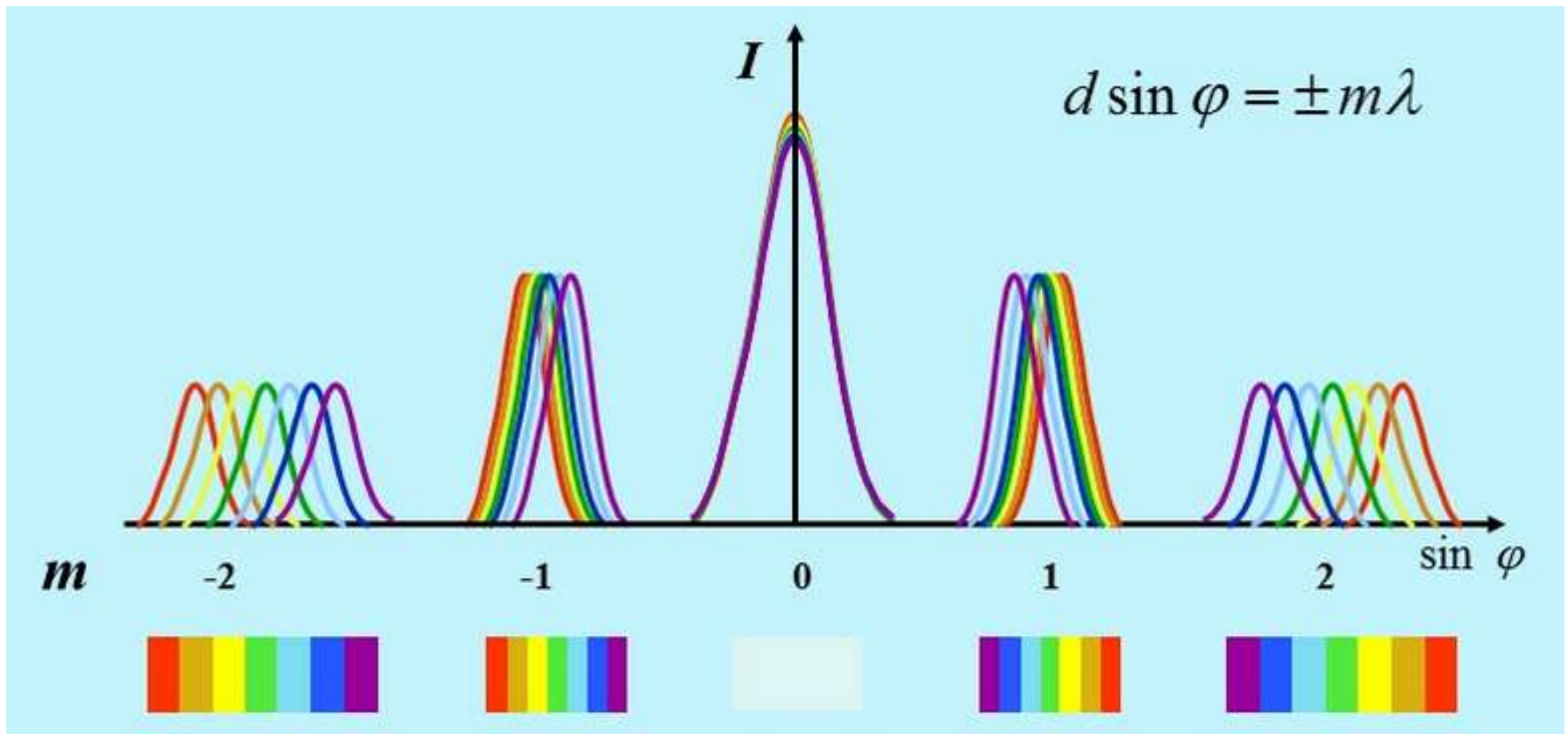
# *Дифракция белого света*



# Дифракция белого света

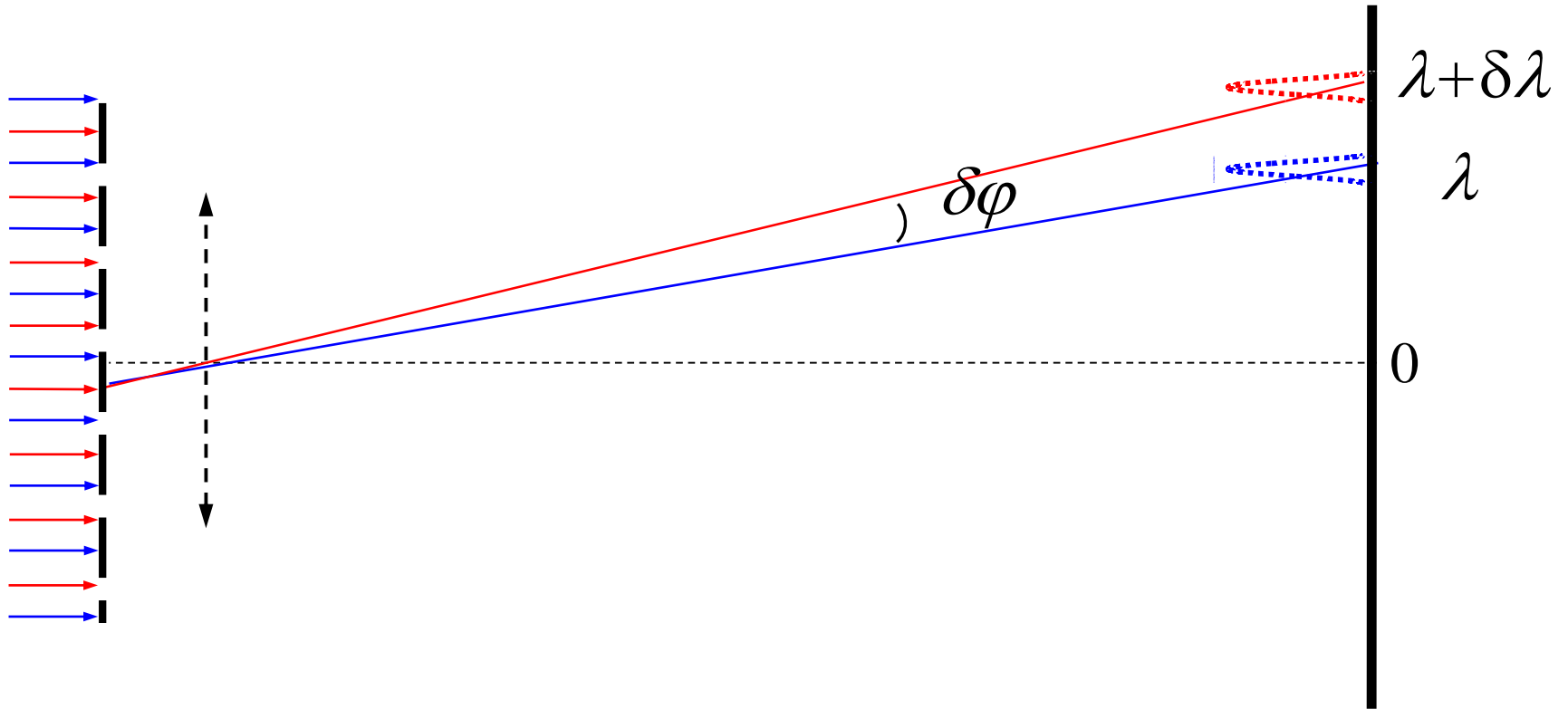


# Дифракционная решётка - спектральный аппарат

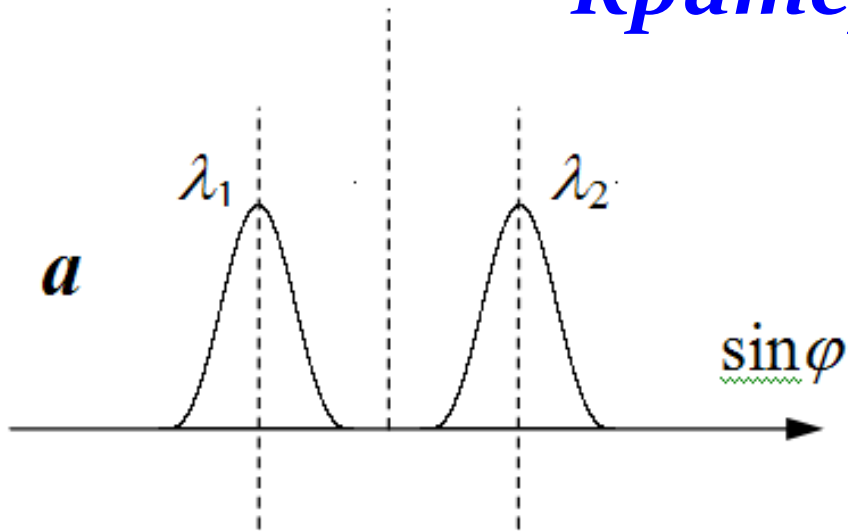


# Угловая дисперсия

$$D_{\varphi} = \frac{\delta\varphi}{\delta\lambda}$$



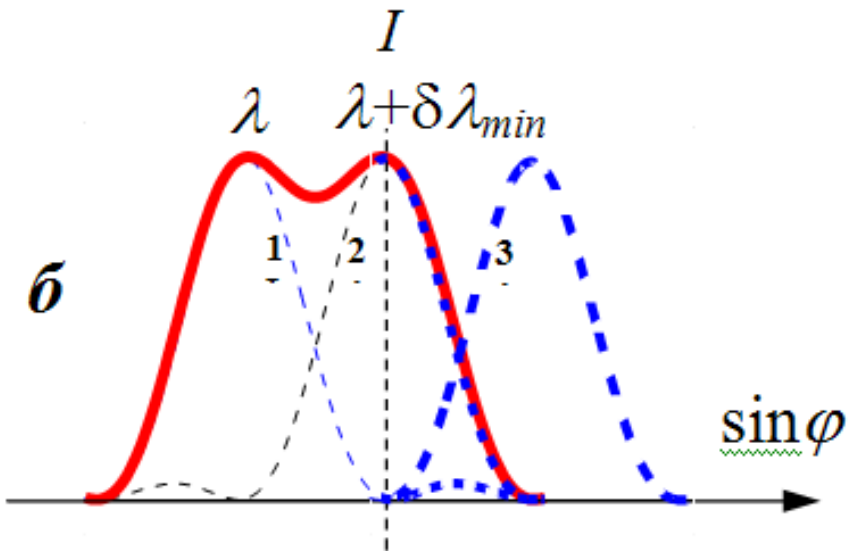
# Разрешающая способность. Критерий Рэля



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

**Решётка:**

$$\left. \begin{array}{l} d \sin \varphi = m\lambda + \lambda / N \\ d \sin \varphi = m(\lambda + \delta\lambda_{\min}) \end{array} \right\} \Rightarrow \delta\lambda_{\min} = \frac{\lambda}{mN}$$



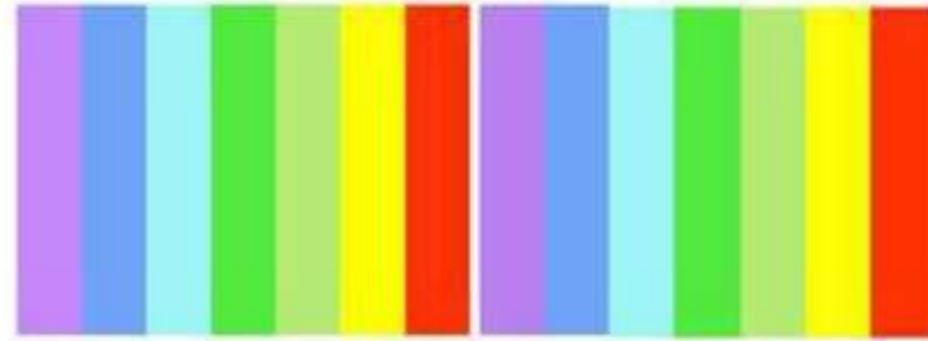
$$R = mN$$



# Свободная спектральная область

$$m(\lambda + \Delta\lambda) < (m+1)\lambda \Rightarrow$$

$$\Delta\lambda_{св} < \frac{\lambda}{m}$$



$\lambda$

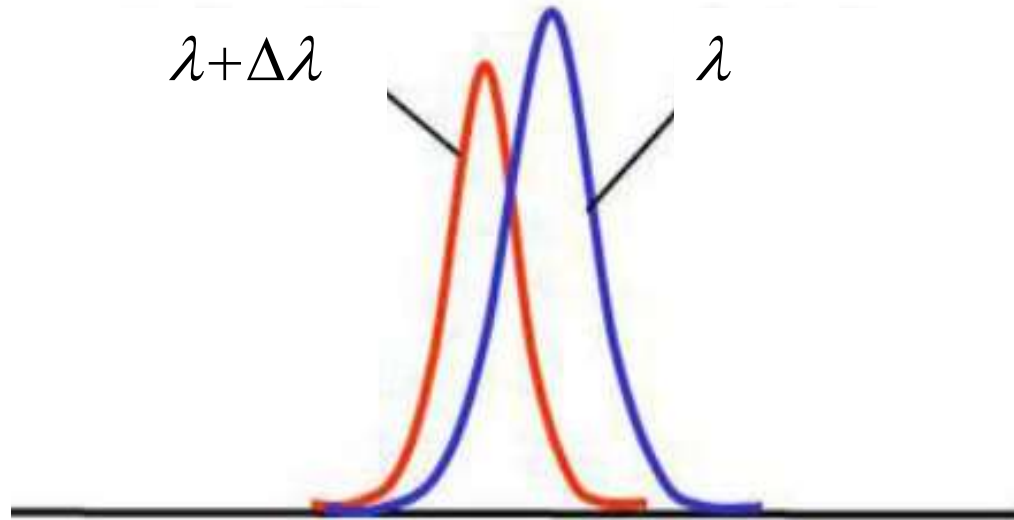
$\lambda + \Delta\lambda$

порядок "m"

порядок "m+1"

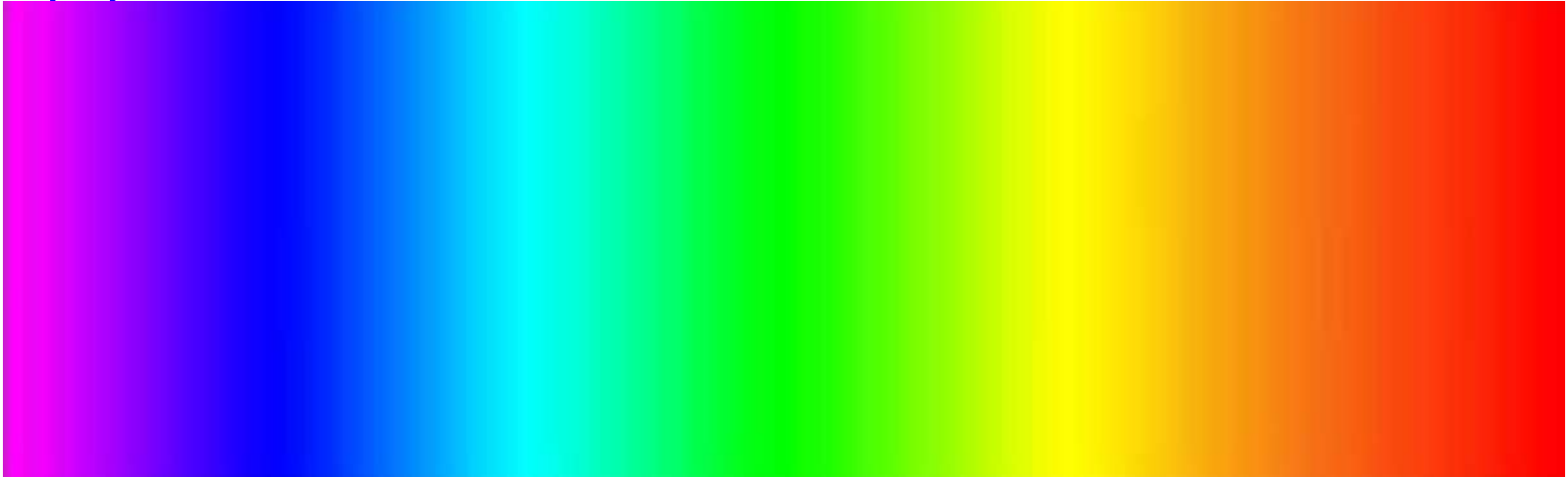
$\lambda + \Delta\lambda$

$\lambda$



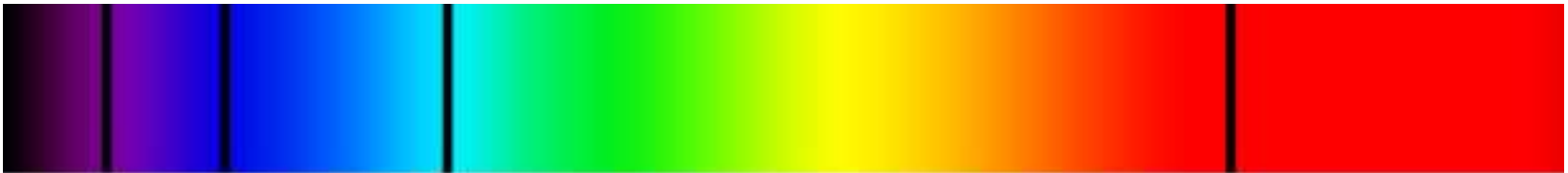
# Спектры

Непрерывный



Линейчатый

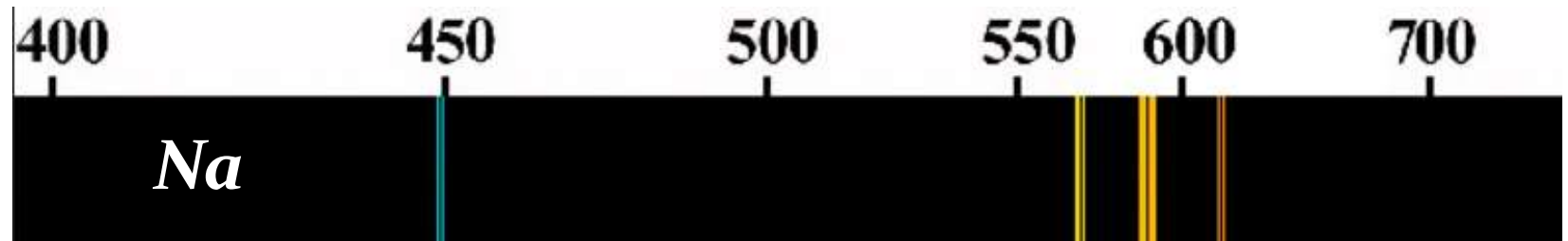
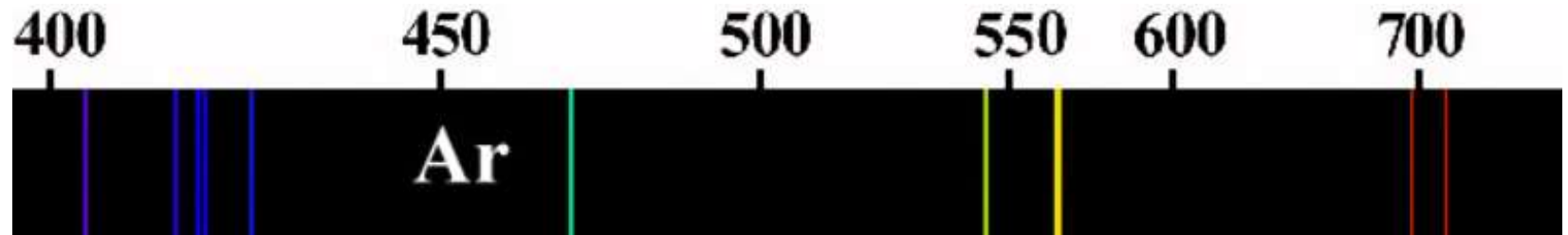
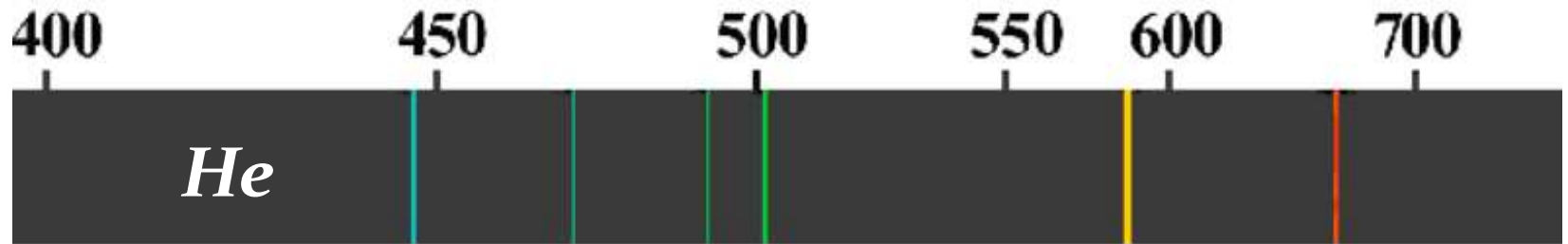
Водород



400 nm

700 nm

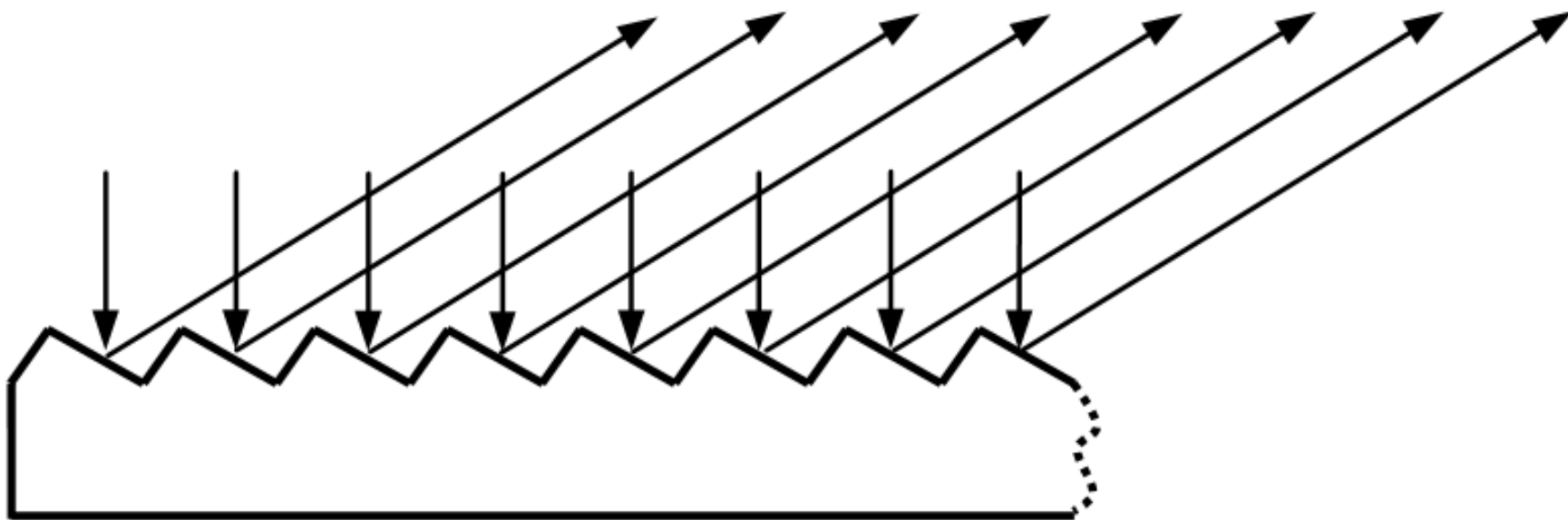
# Линейчатые спектры



# Спектры атомарных газов



# Отражательная дифракционная решётка “Эшелет”

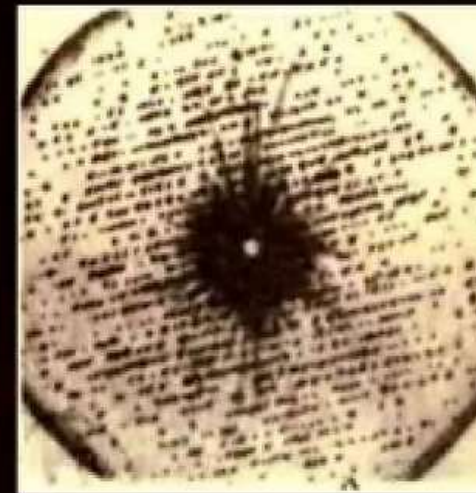
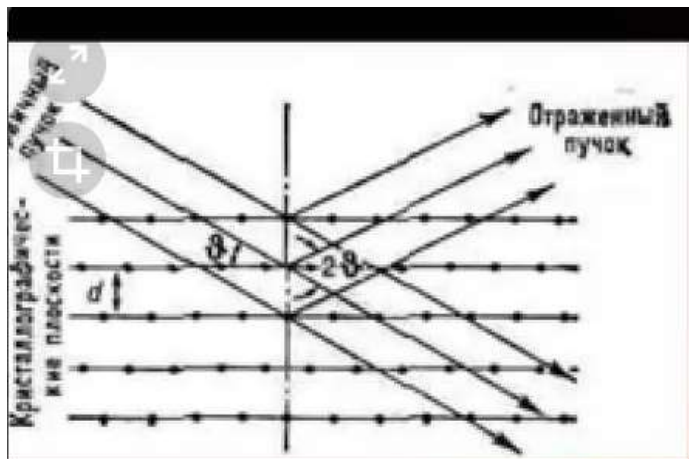


# УСТРОЙСТВО КОМПАКТ-ДИСКА

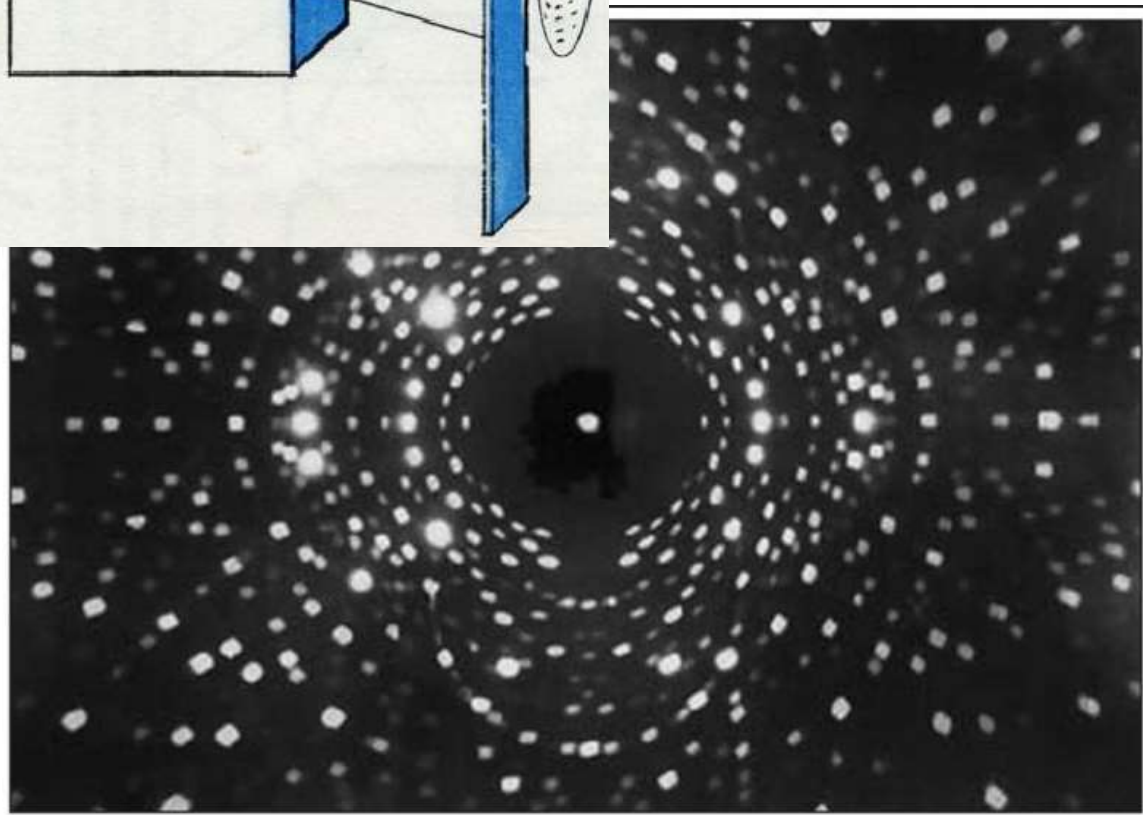
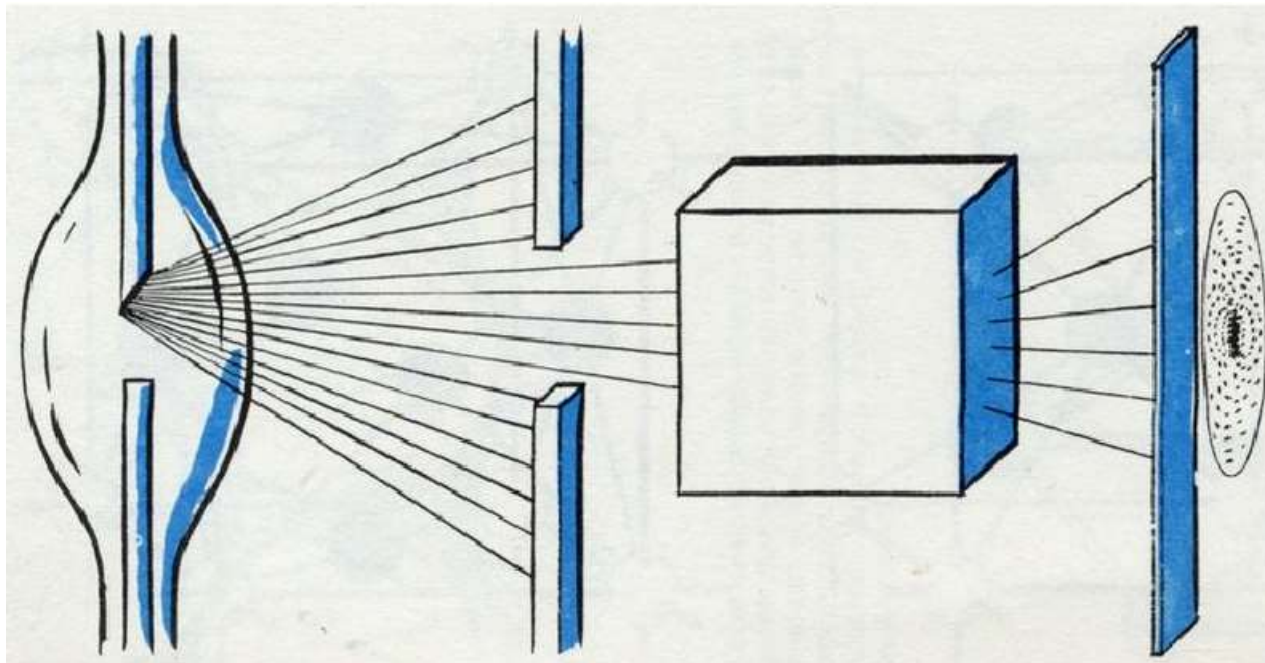




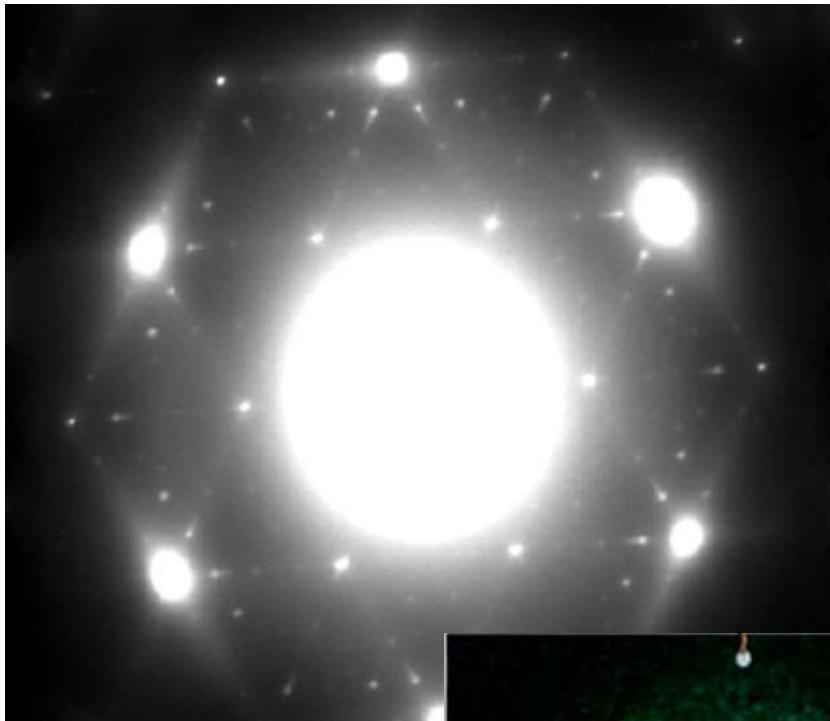
# Интенсивность в центре дифракционной картины



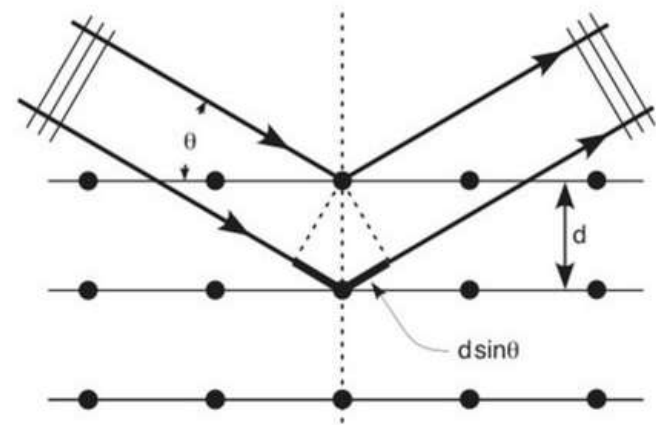
# Дифракция на кристалле



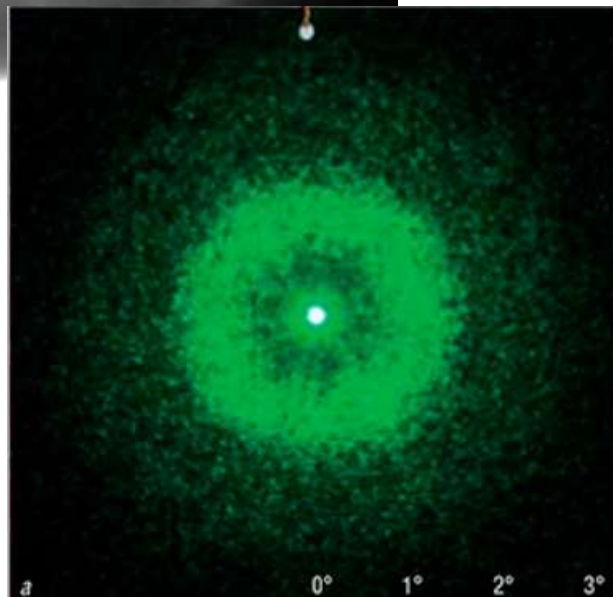
# Формула Вульфа – Брэгга



Лауэ, 1912

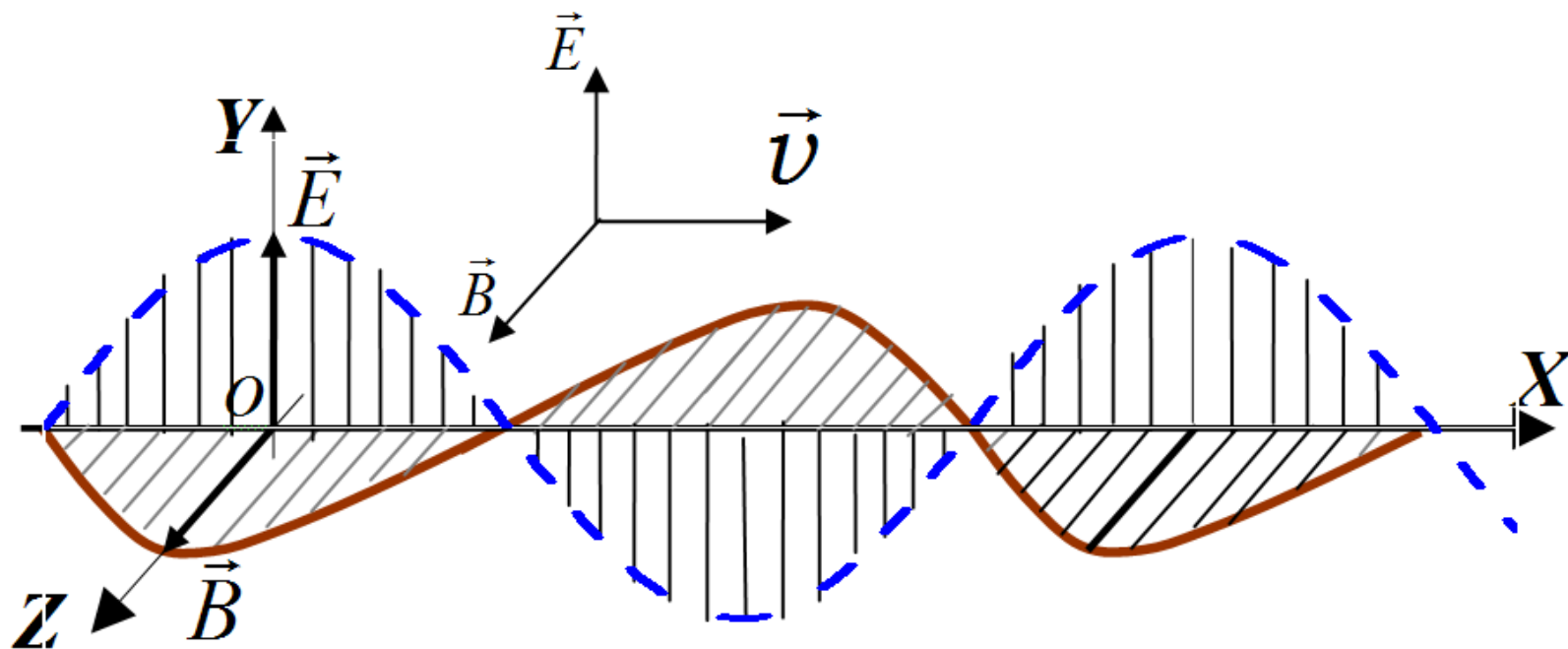


$$2d \sin \theta = n\lambda$$

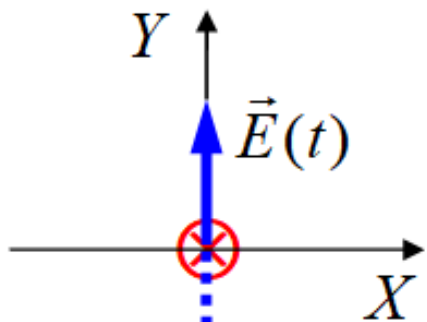


Аморфное галло

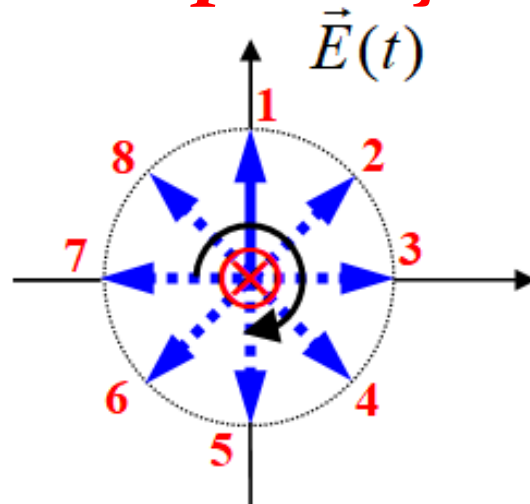
# Плоскополяризованная электромагнитная волна



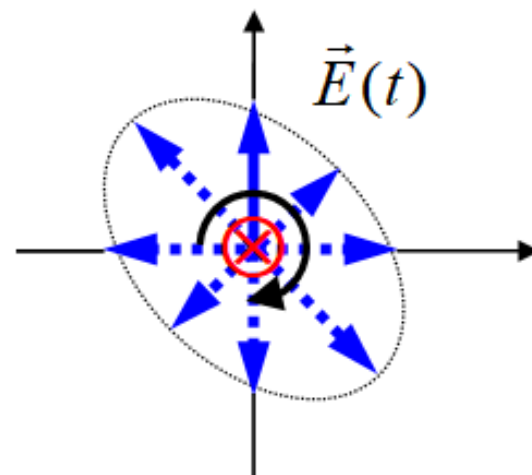
# Типы поляризации света



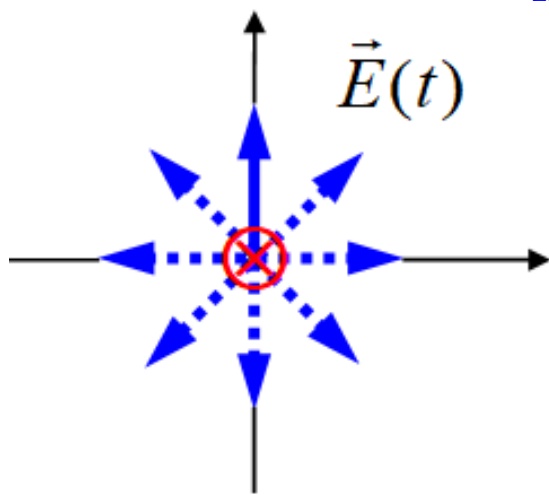
Плоско  
поляризованный  
свет



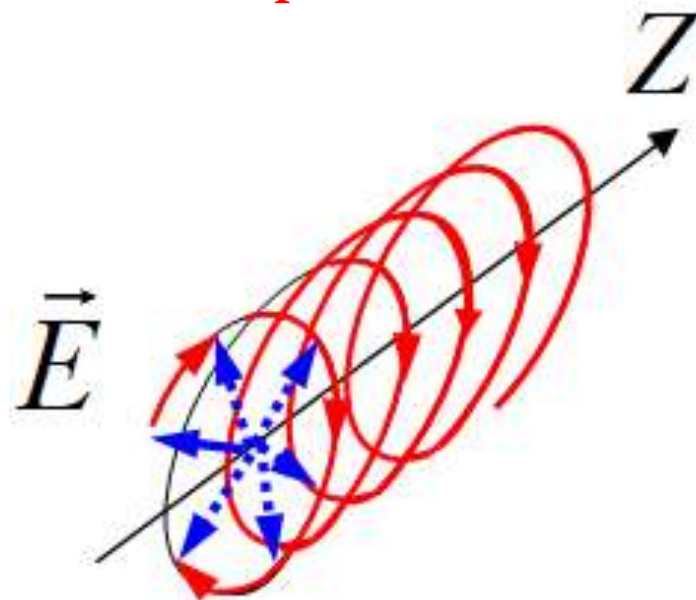
Циркулярно  
поляризованный свет



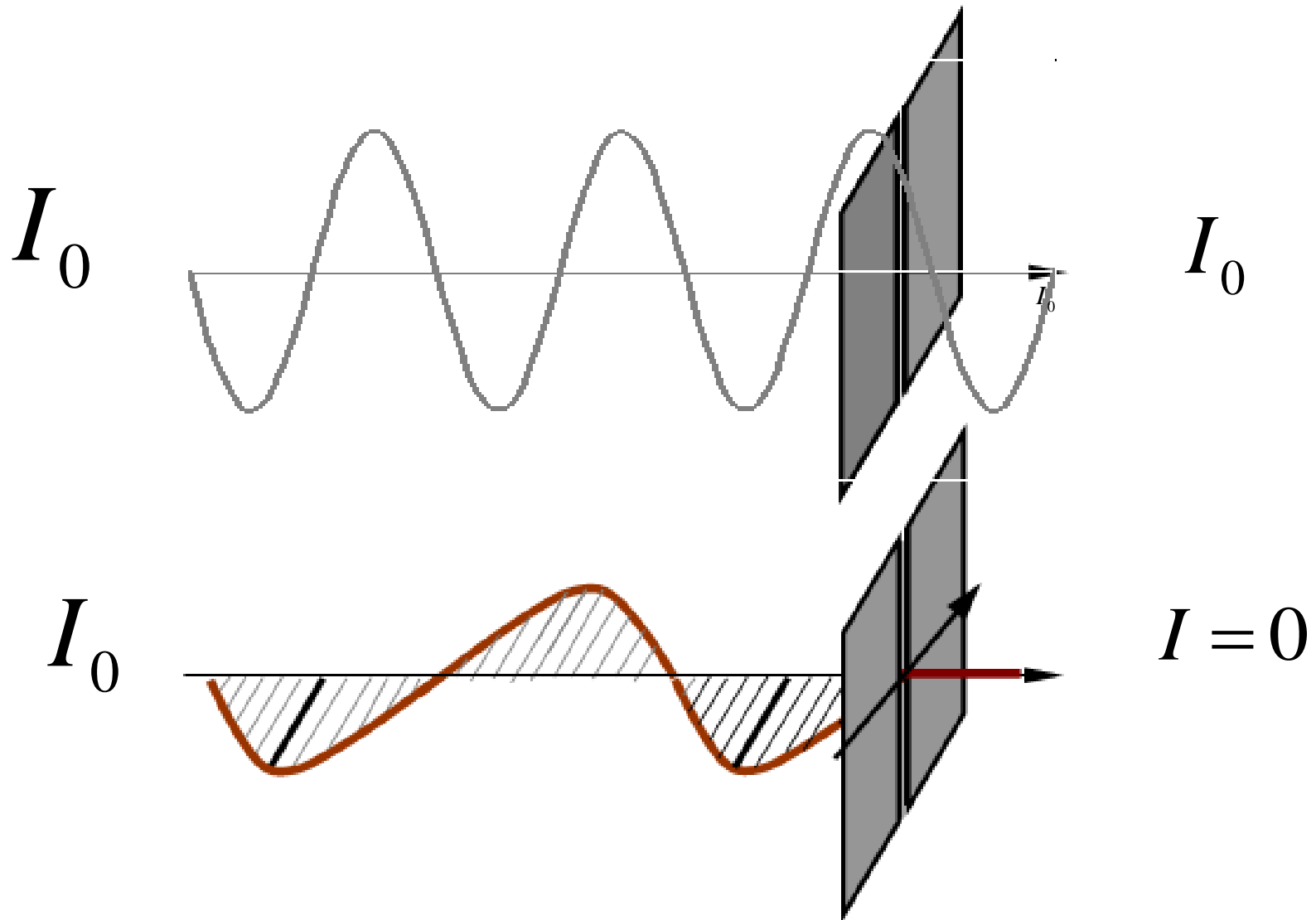
Эллиптически  
поляризованный свет



Естественный  $\equiv$   
неполяризованный свет



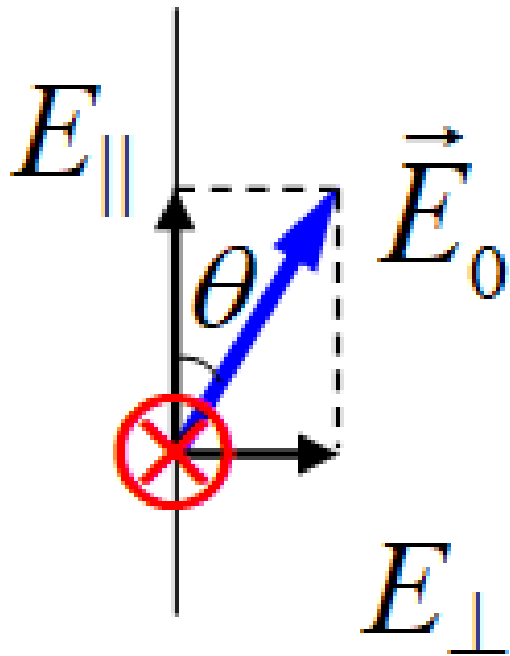
# Идеальный поляризатор





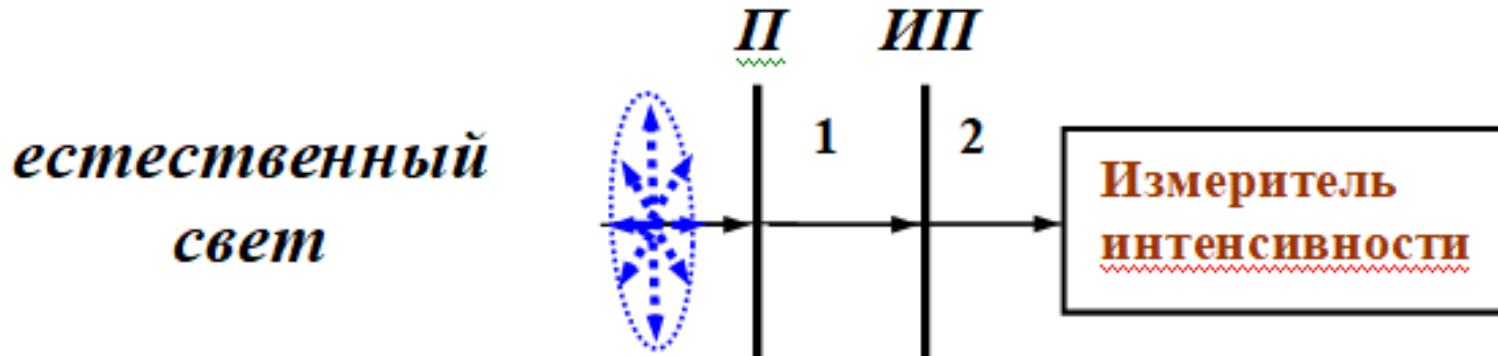
# Закон Малюса

*главная  
плоскость  
поляризатора*

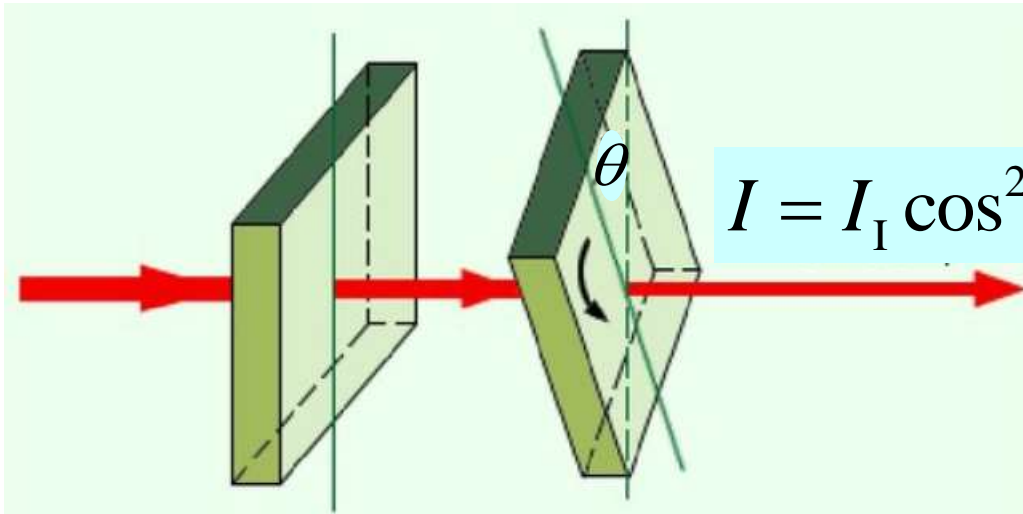


$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

# Степень поляризации

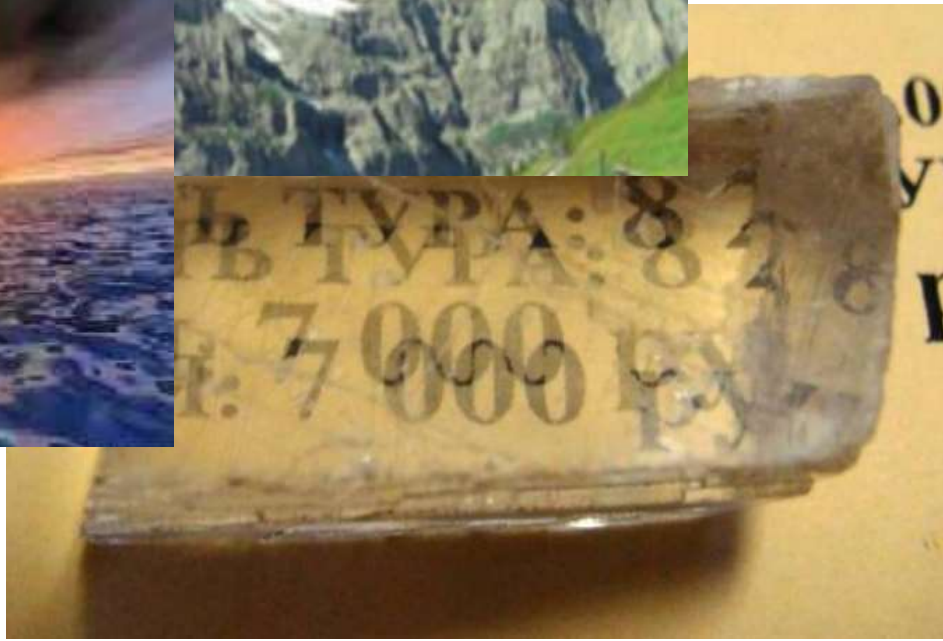


$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

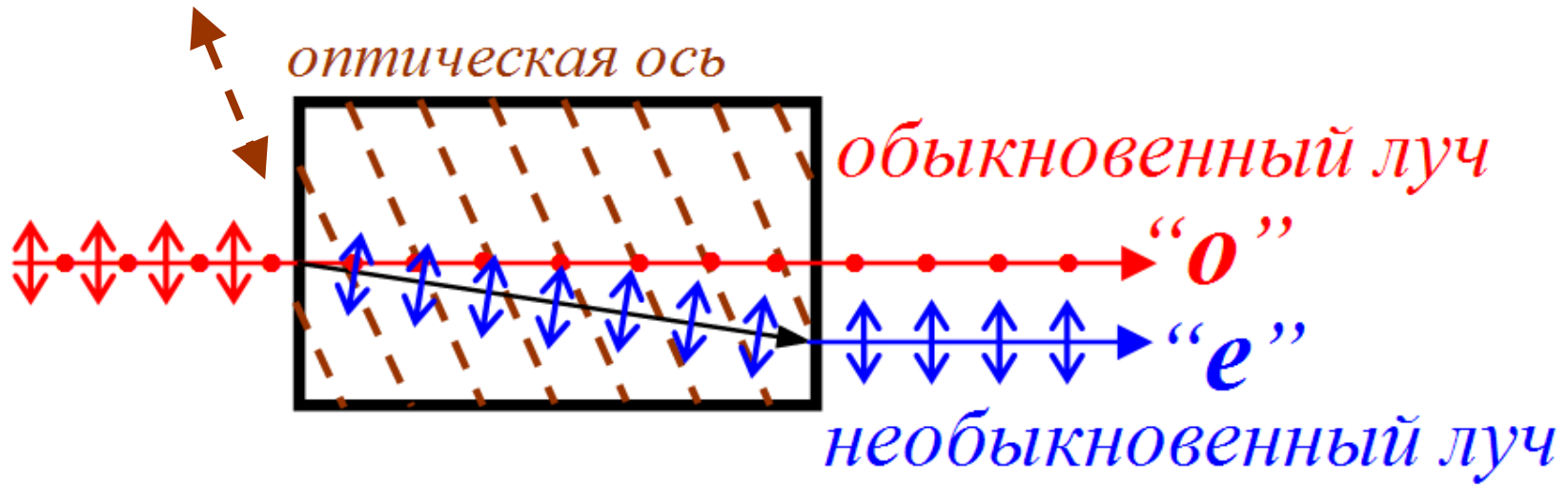


$$I = I_1 \cos^2 \theta + I_* / 2$$

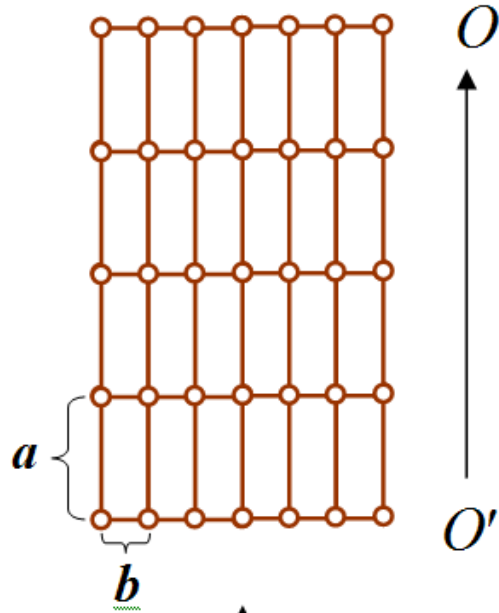
# Лекция 13. Поляризация света



# Двулучепреломление



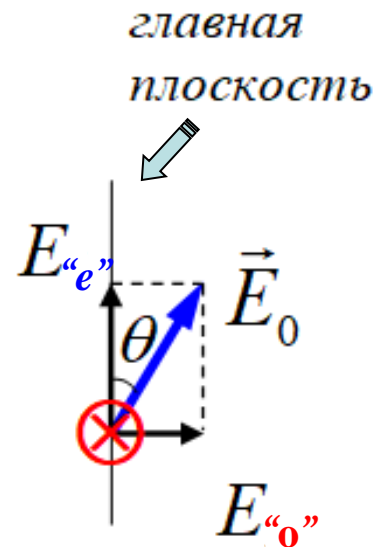
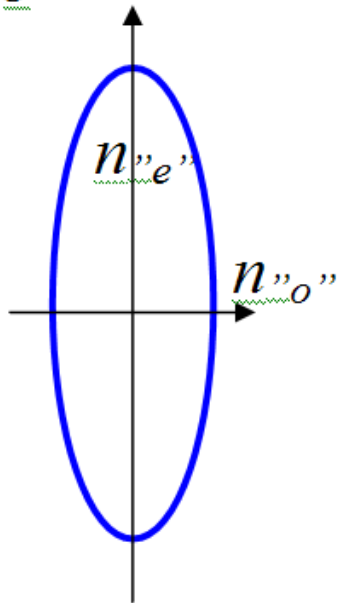
# Природа двулучепреломления



В этом направлении больше  
поляризуемость среды  $\Rightarrow \epsilon$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0}}$$

$$v_{"o"} \geq v_{"e"}$$

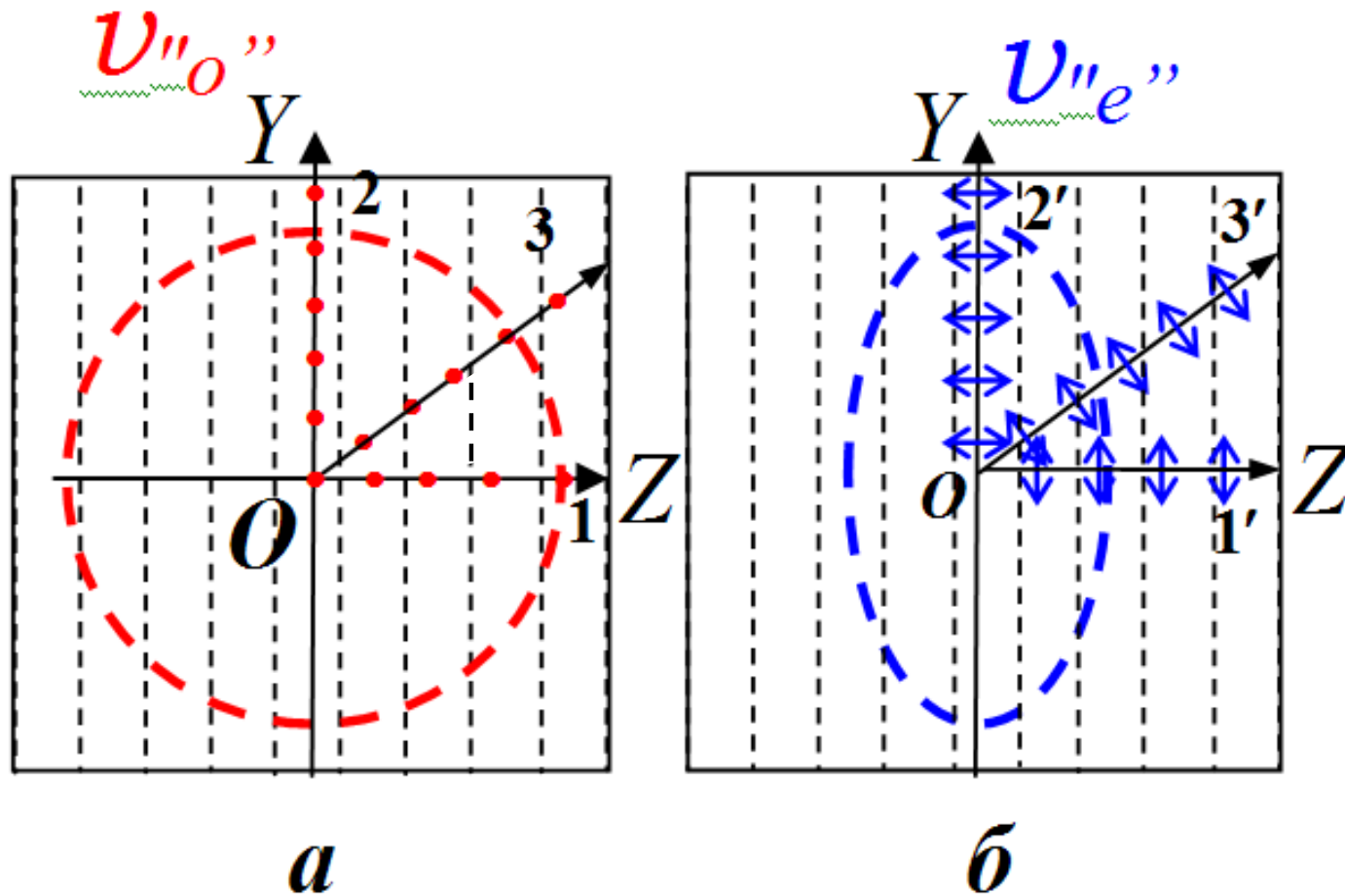


$$E_0^{"o"} = E_0 \sin \theta$$

$$E_0^{"e"} = E_0 \cos \theta$$

# Природа двулучепреломления

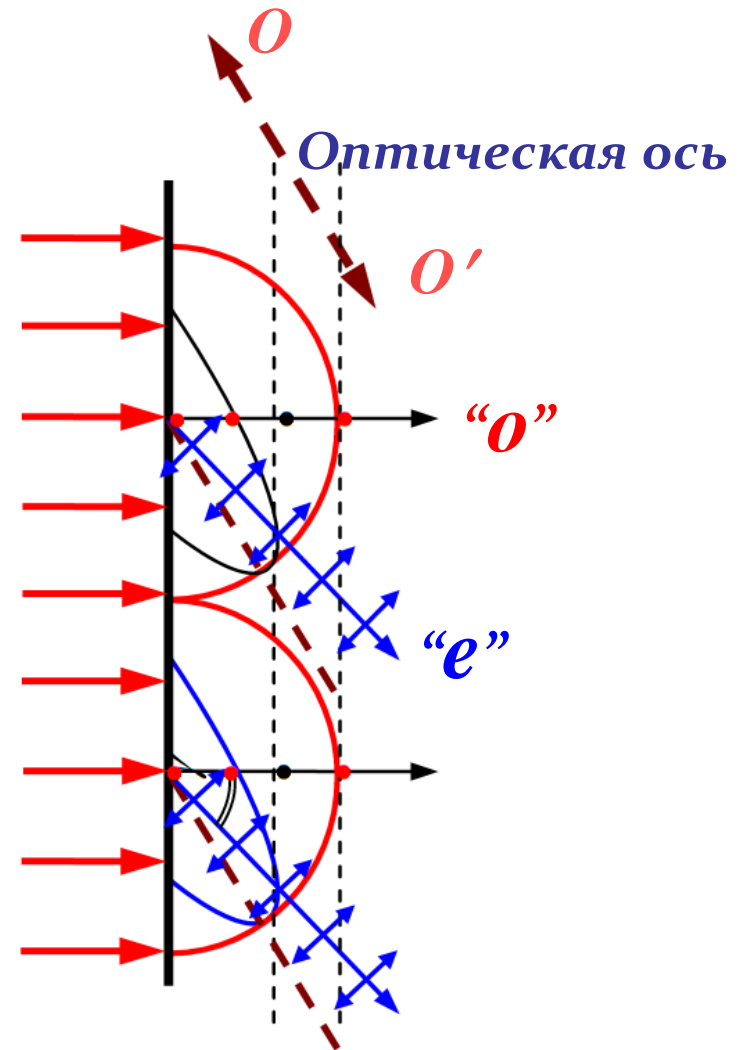
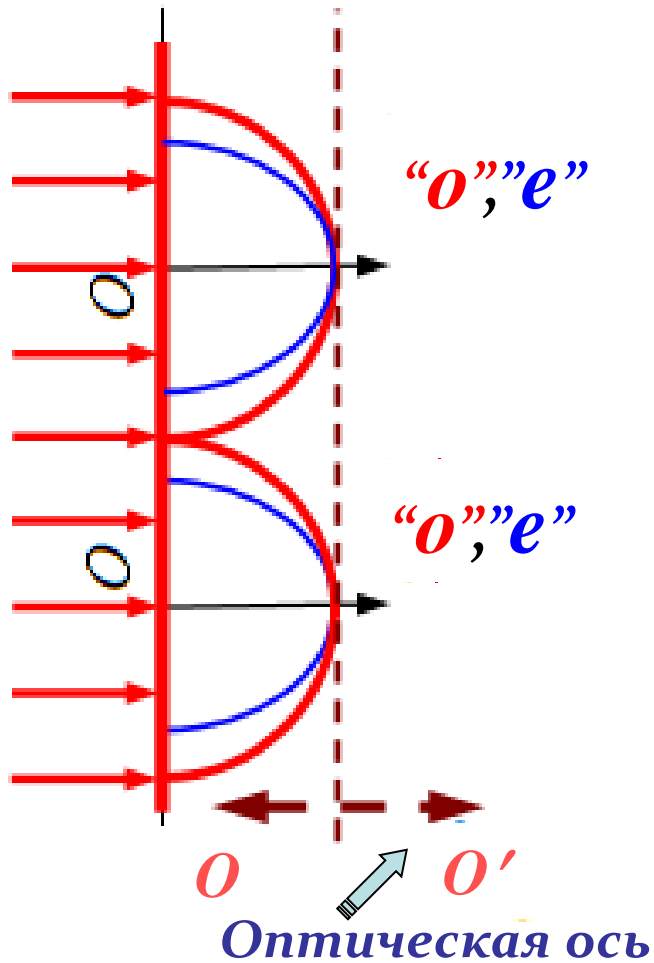
Распространение поляризованных волн в анизотропной среде



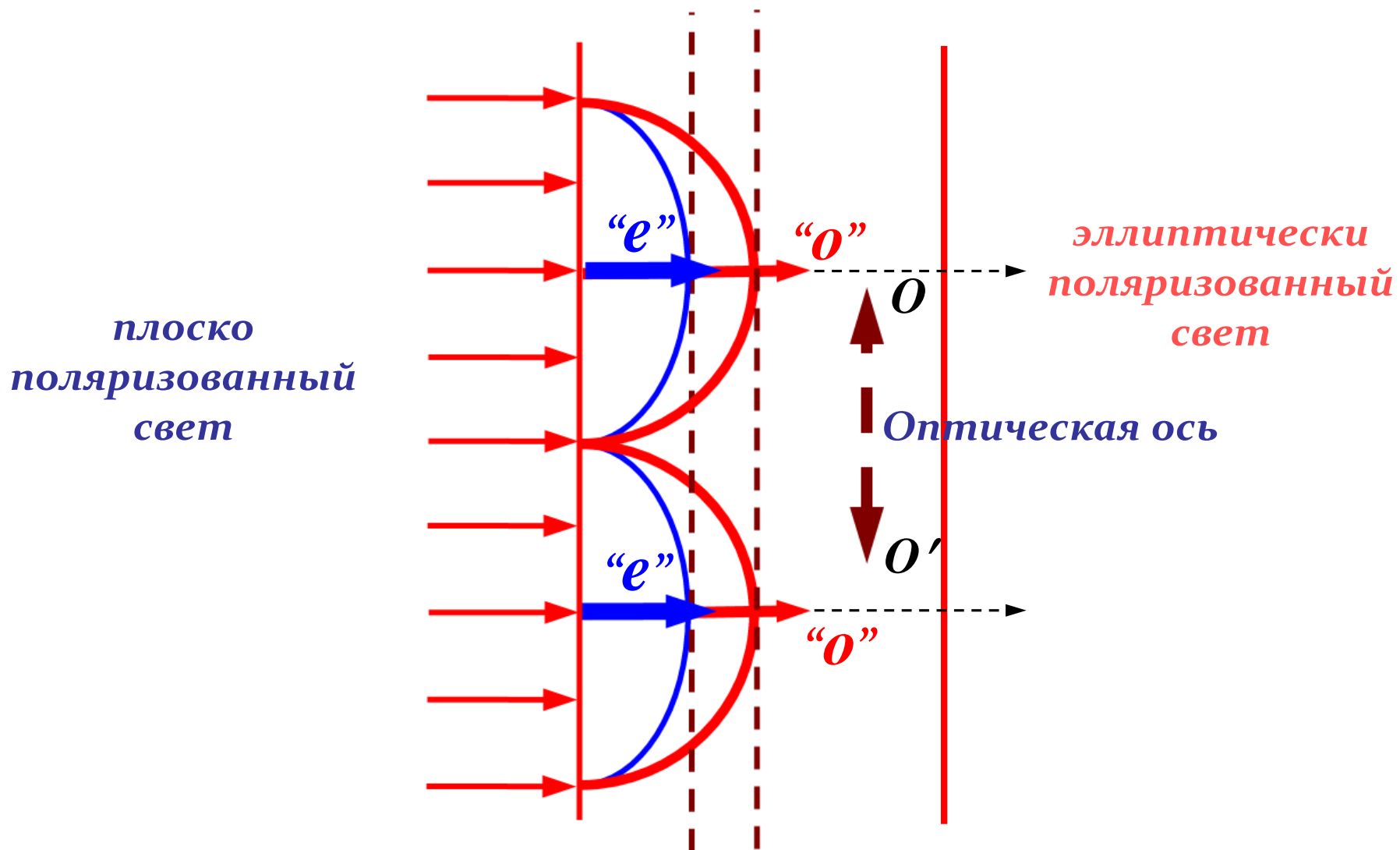


# Возникновение двух лучей

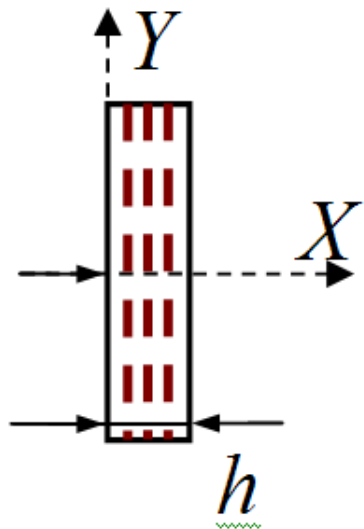
Нет разделения лучей



# Кристаллические пластинки $\lambda/4$ , $\lambda/2$ , ...



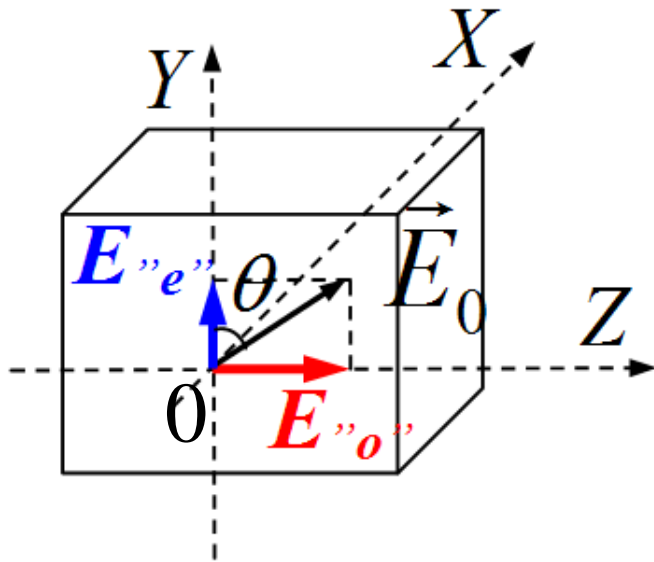
# Кристаллические пластинки $\lambda/4$ , $\lambda/2$ , ...



$$E''_o''(h) = E_{z0} \cdot \cos \omega t'$$

$$E''_e''(h) = E_{y0} \cdot \cos(\omega t' - \delta)$$

$$\delta = 2\pi\Delta/\lambda, \quad \Delta = (n_e - n_o) \cdot h$$



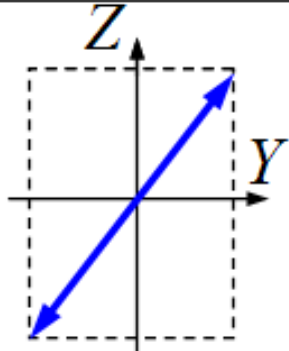
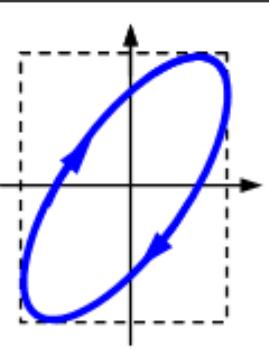
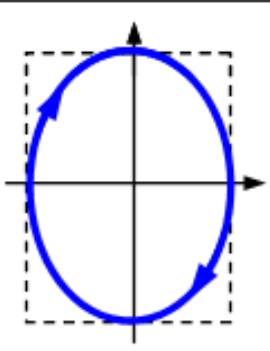
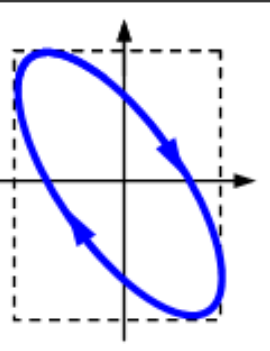
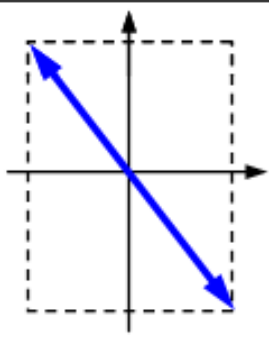
$$\Delta = \lambda/4 \Rightarrow \delta = \pi/2$$

$$\Delta = \lambda/2 \Rightarrow \delta = \pi$$

# Кристаллические пластинки $\lambda/4$ , $\lambda/2$ , ...

Уравнения  
Эллипса:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{\text{„o}}(h) = E_{z0} \cdot \cos \omega t' \\ E_{\text{„e}}(h) = E_{z0} \cdot \cos(\omega t' - \delta) \end{array} \right.$$

$\Delta$	0	$\lambda_0/8$	$\lambda_0/4$	$3\lambda_0/8$	$\lambda_0/2$
$\delta$	0	$\pi/4$	$\pi/2$	$3\pi/4$	$\pi$
					

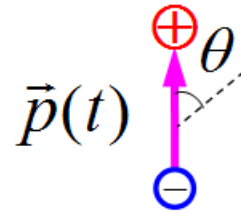
# Излучение диполя

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{J \delta l \sin \theta}{r^2};$$

“сила тока”:

$$J \rightarrow \dot{\xi}$$

$$\xi = A \cos(\Omega t - \alpha) \Rightarrow \dot{\xi} \sim \Omega$$

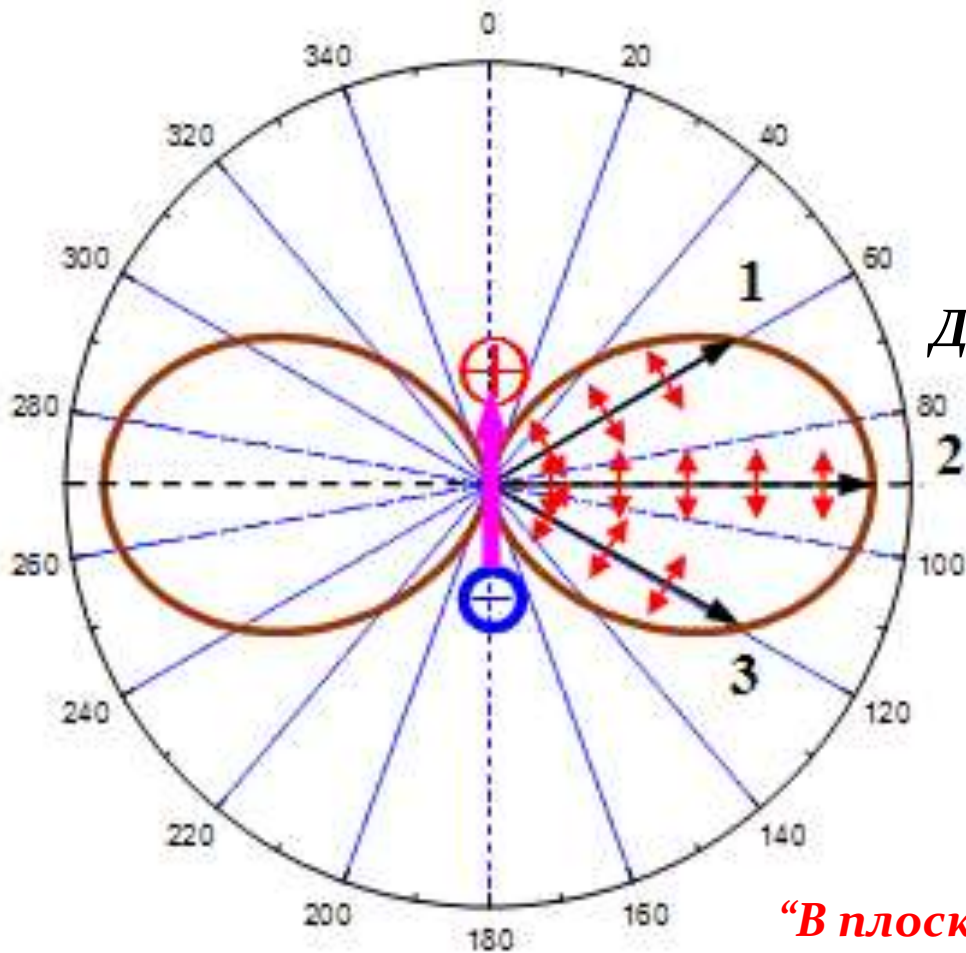


$$E \sim \frac{\partial B}{\partial t} \Rightarrow E \sim \ddot{\xi} \sim \Omega^2 \sin \theta$$

Интенсивность излучения:

$$\Rightarrow E \sim \ddot{\xi} \sim \Omega^2 \sin \theta \Rightarrow I \sim \Omega^4 \sin^2 \theta$$

# Диаграмма направленности излучения диполя



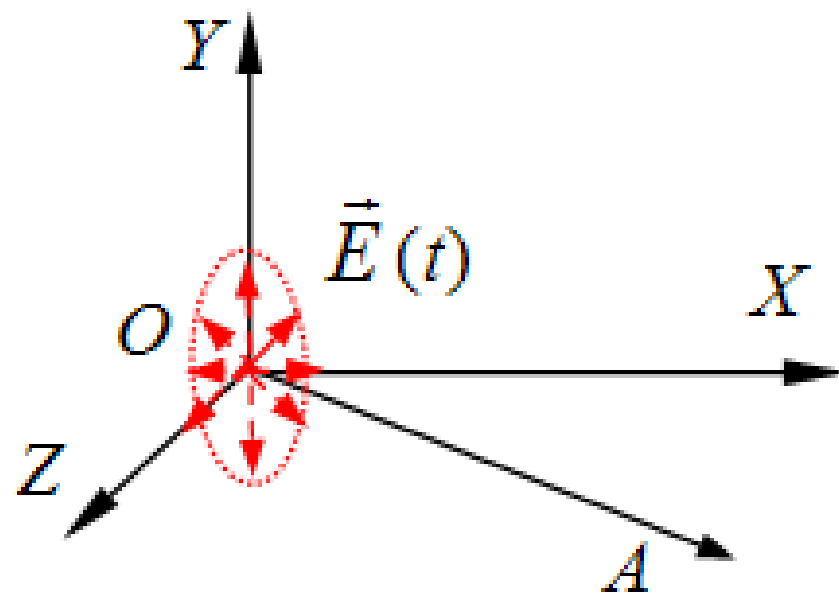
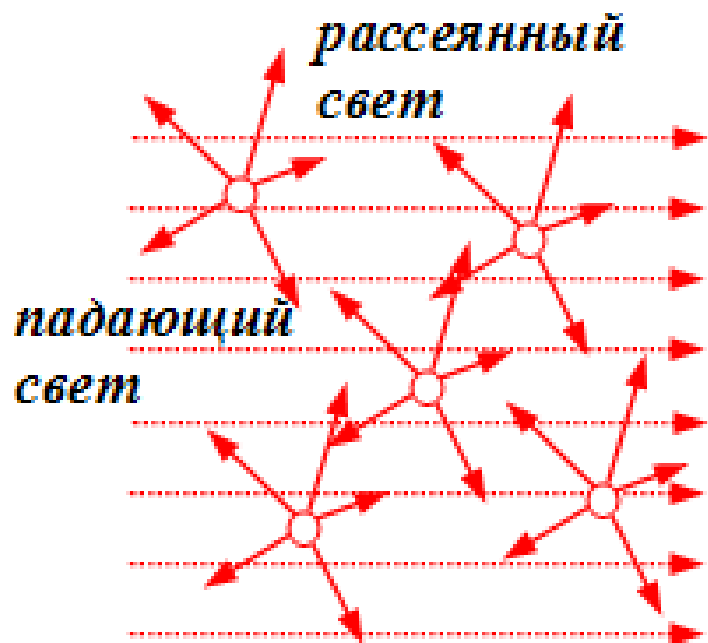
*Длина стрелки = интенсивности*

*“В плоскости диполя”*

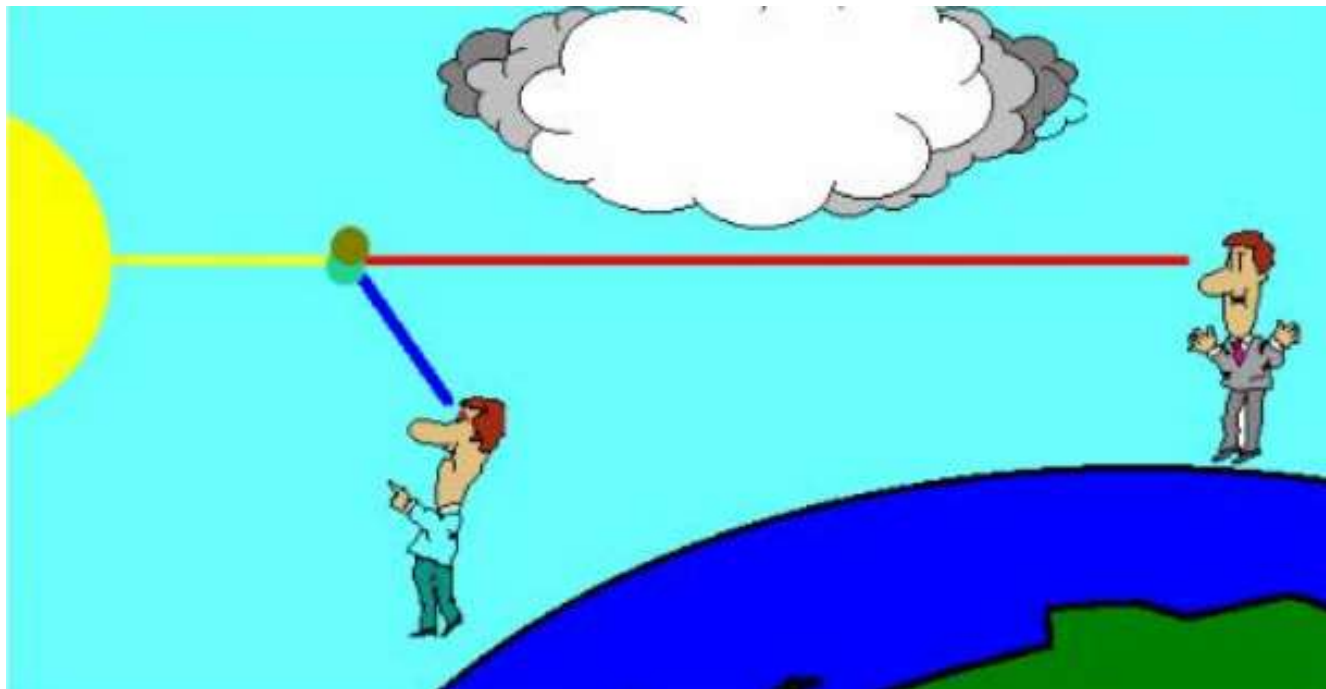
*Зависимость интенсивности излучения от направления*



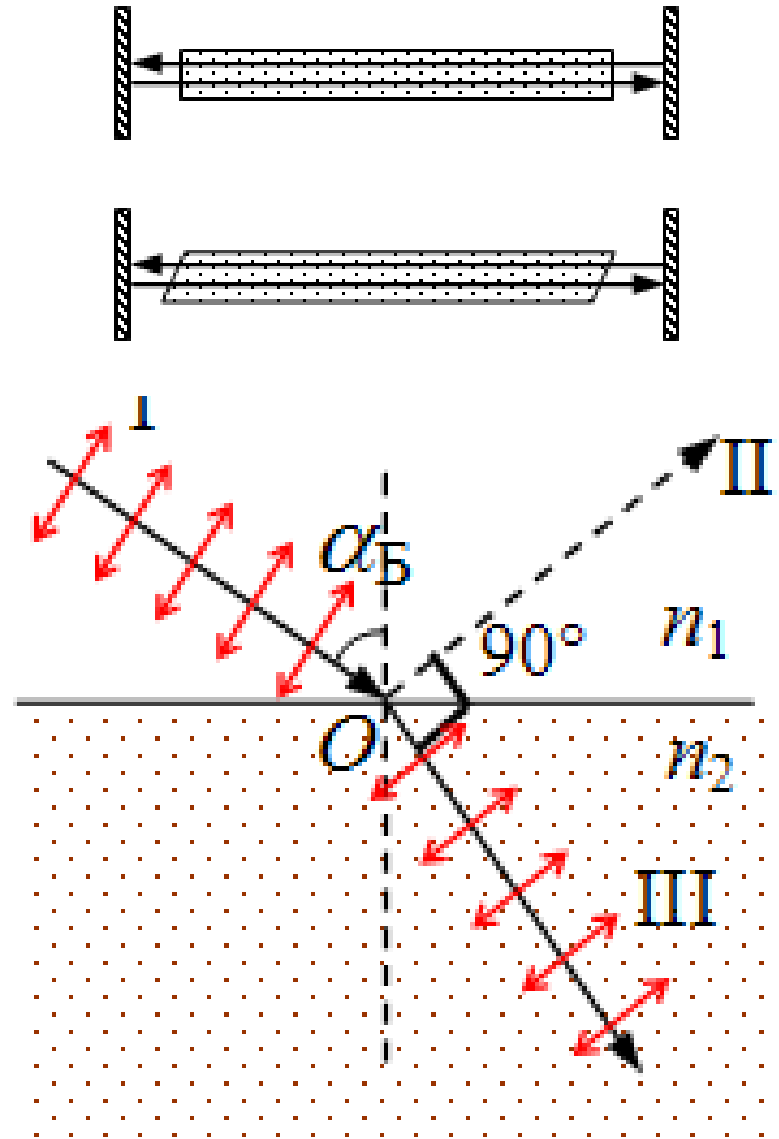
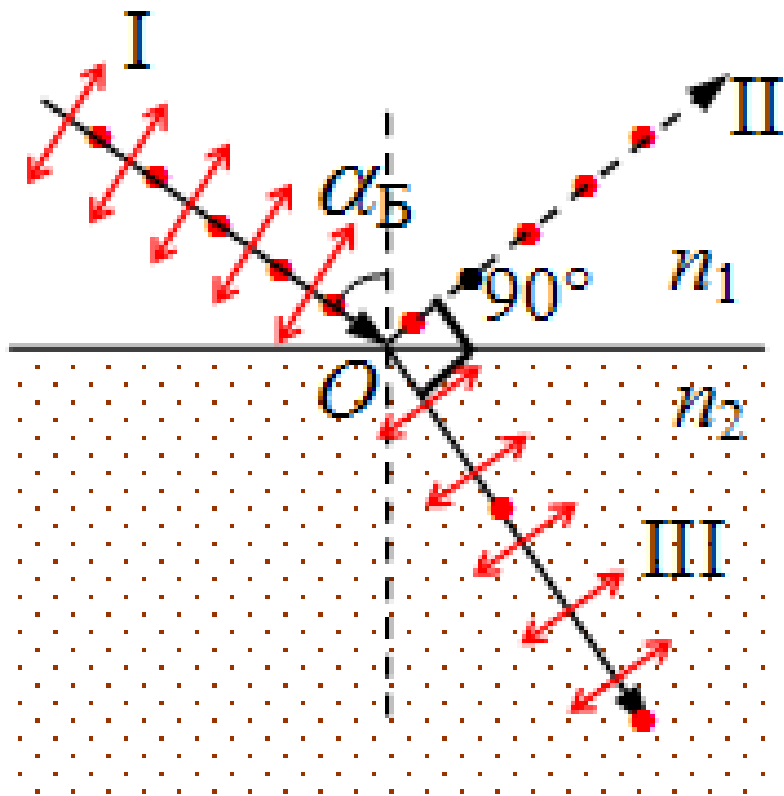
# Поляризация при рассеянии света



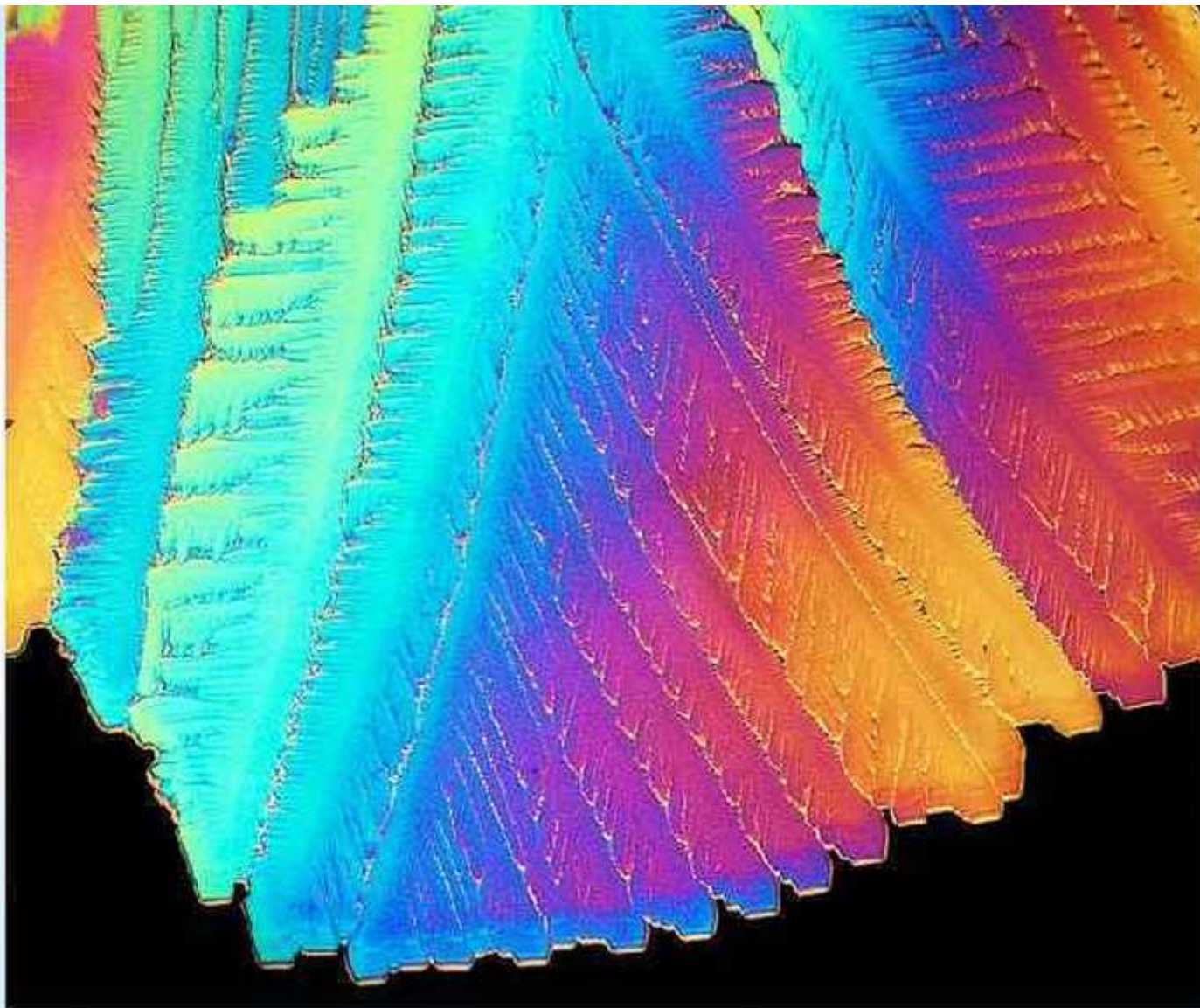
# Рассеяние Рэля и рассеяние Ми (G. Mie)



# Поляризация при отражении и преломлении света



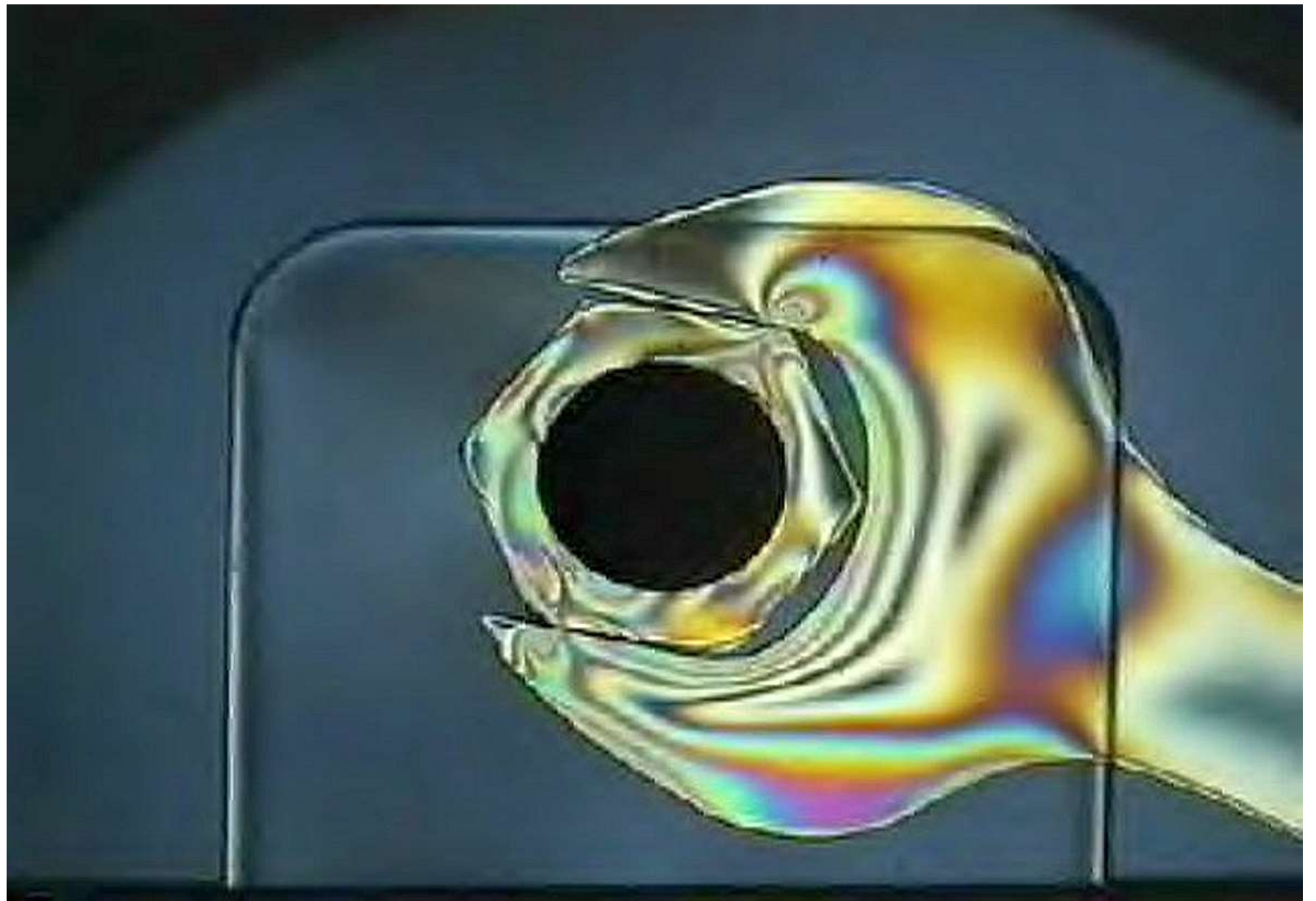
# Лекция 14. Искусственная анизотропия и Оптическая активность



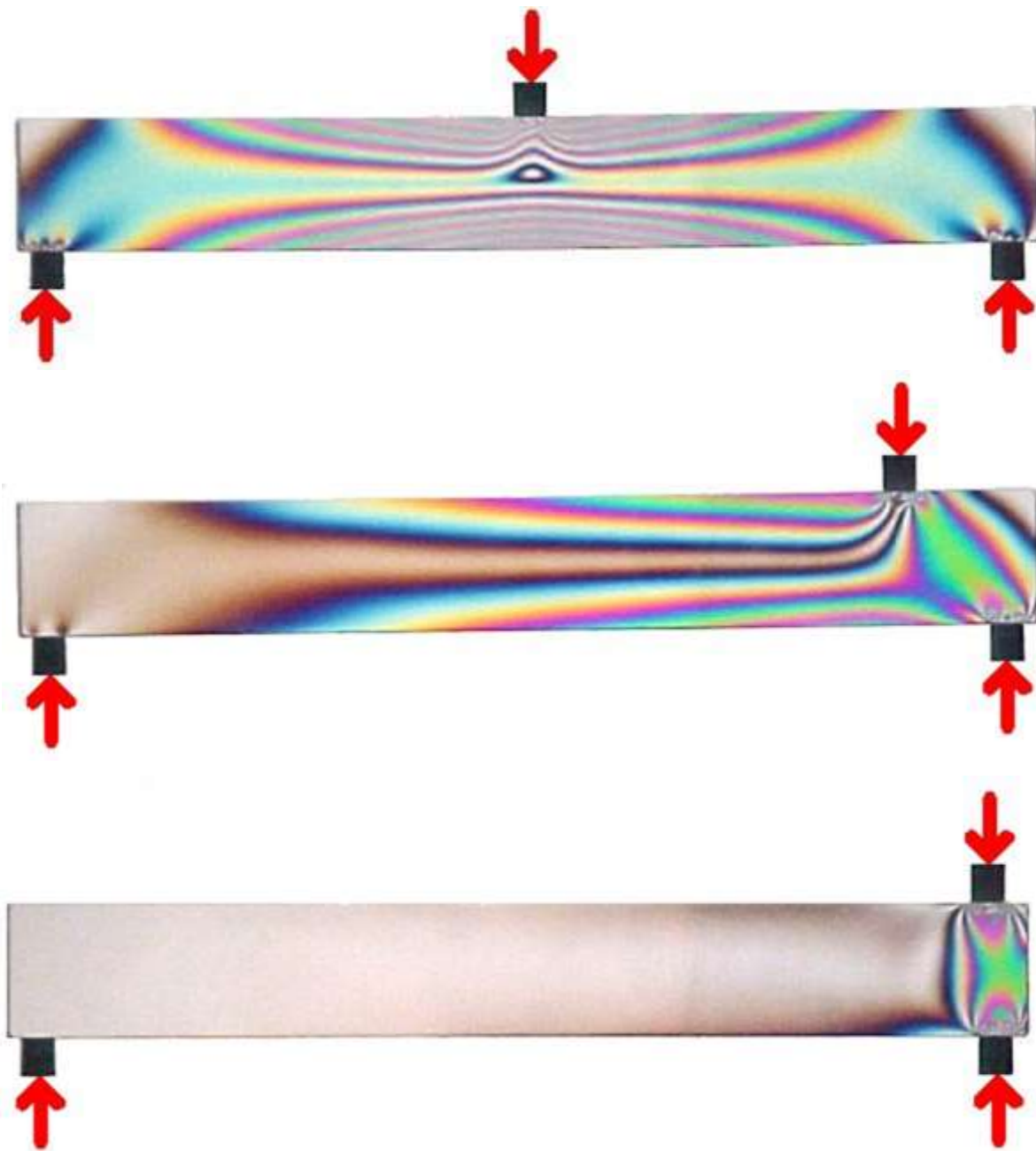
Анизотропный кристалл лимонной кислоты (увеличение 200×).

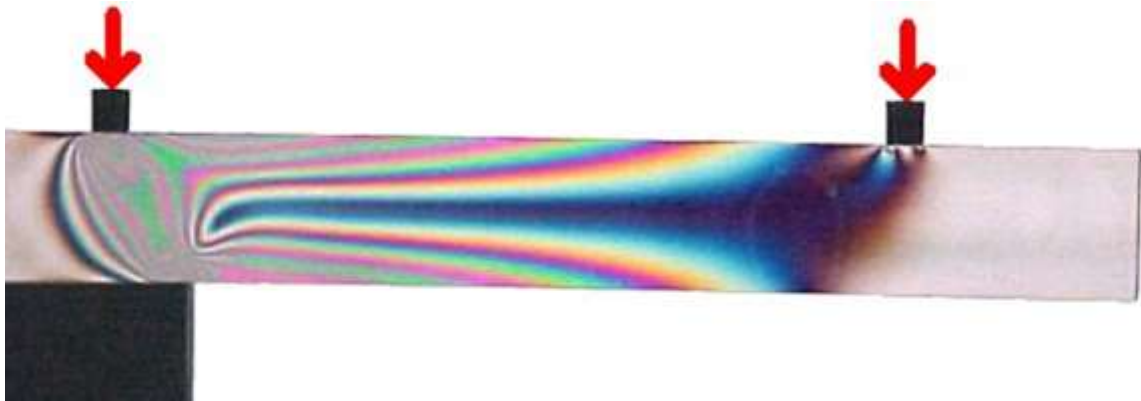
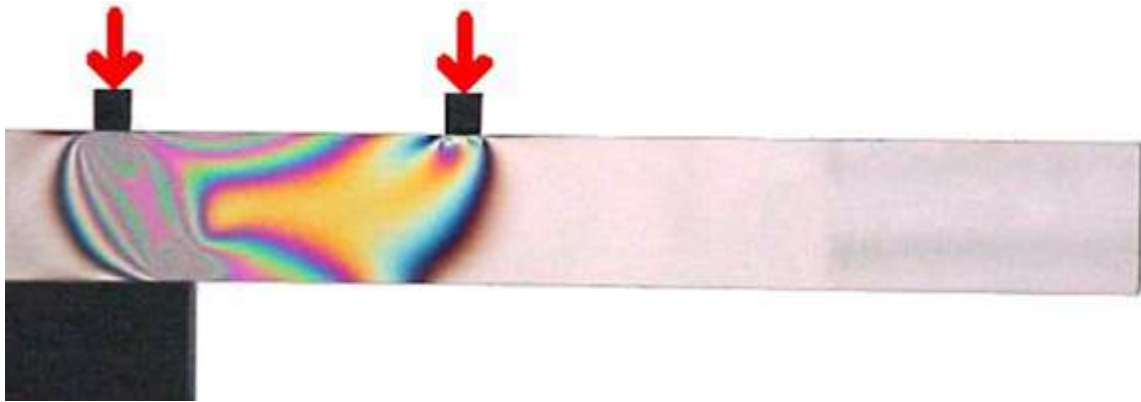
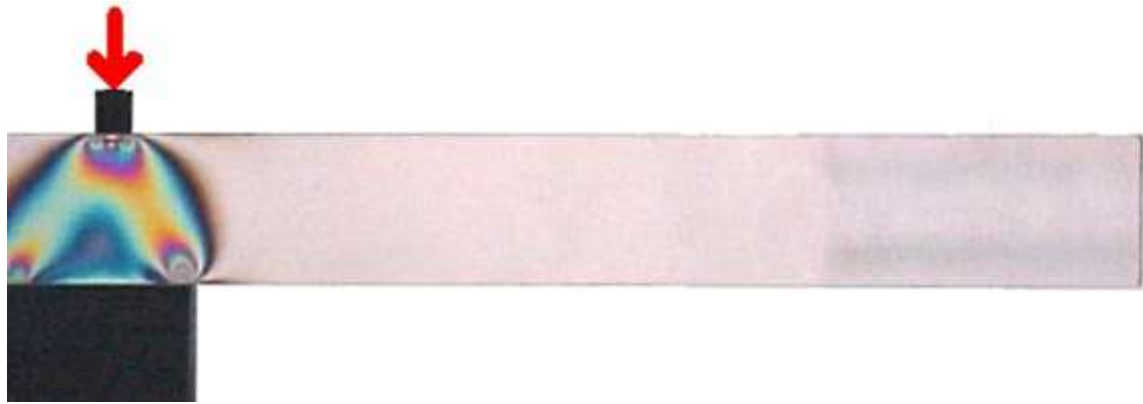






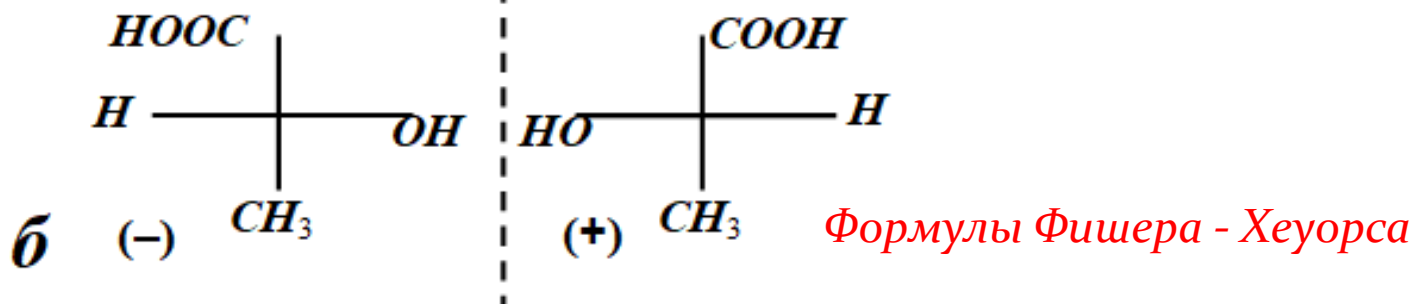
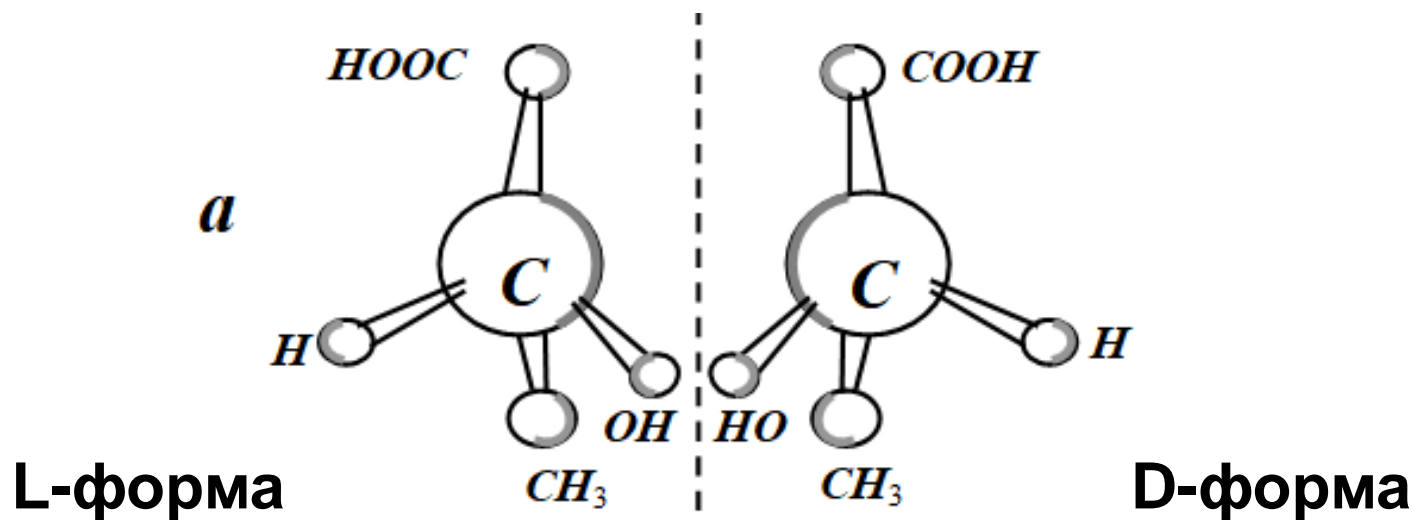






# Оптическая активность

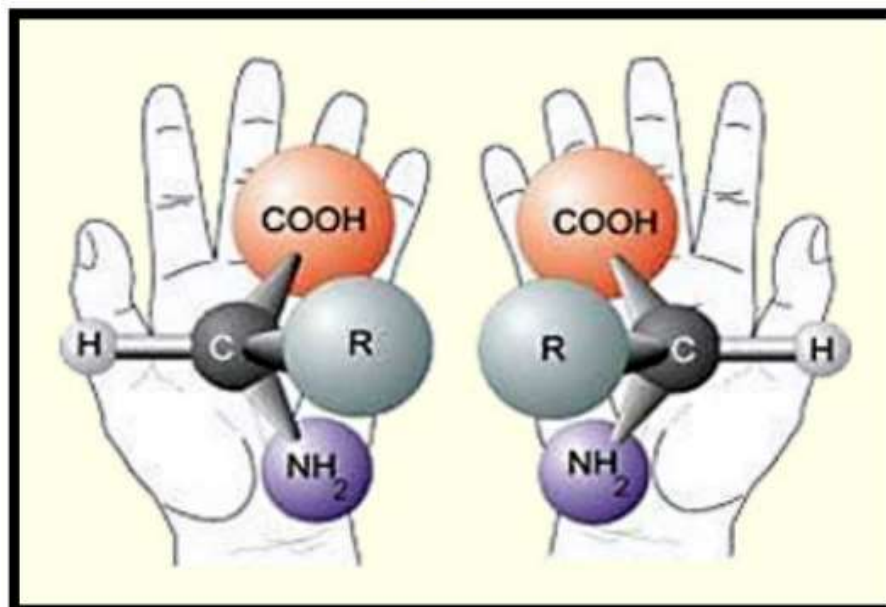
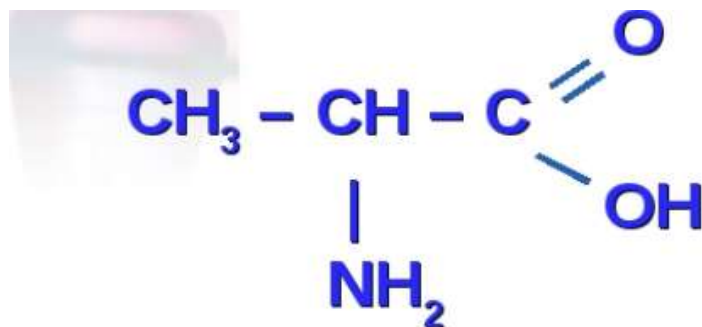
Молочная кислота:  $\text{CH}_3 - \text{CHOH} - \text{COOH}$



Оптические изомеры

# Оптическая активность

$\alpha$ -Аминопропионовая кислота – аланин



L - Аланин

D - Аланин

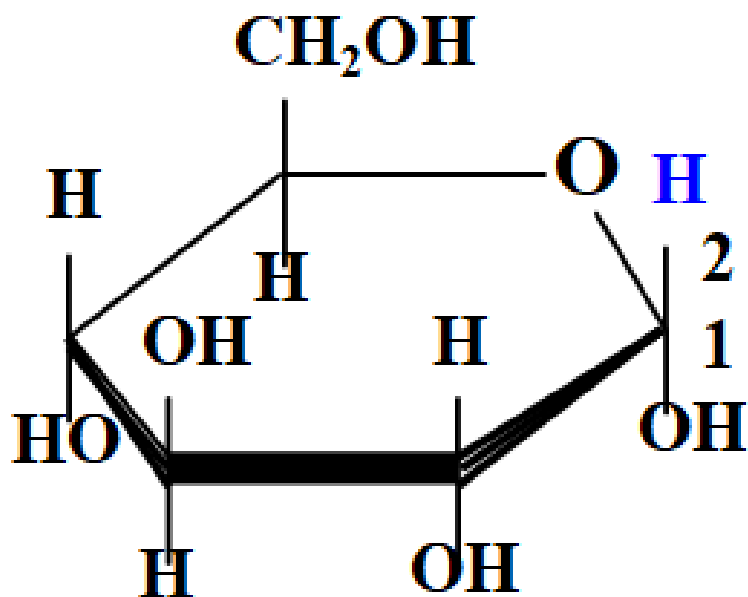
# Оптическая активность

$$\theta = [\alpha] \cdot C \cdot l \quad \text{Закон Био}$$

$[\alpha]$  – удельная оптическая активность

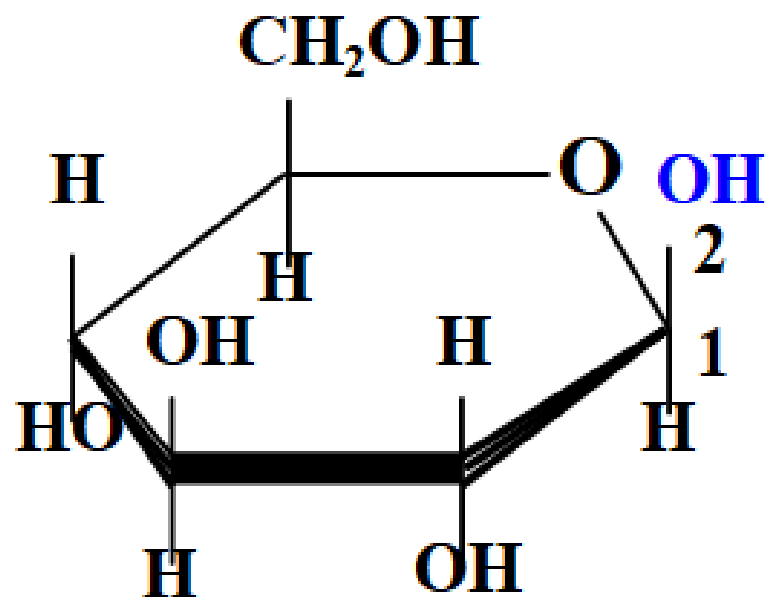
Вещество	Удельное вращение $[\alpha]^D$
Молочная кислота	$\pm 3,82^\circ$
Сахар тростниковый $C_{12}H_{22}O_{11}$	$+66,4^\circ$
Сахар виноградный $C_6H_{12}O_6$	$+52,6^\circ$
Сахар фруктовый $C_6H_{12}O_6$	$-91,9^\circ$

# Поляриметрия, стереохимия, ...



***α* - глюкоза**

$$[\alpha]_D = +112^\circ$$



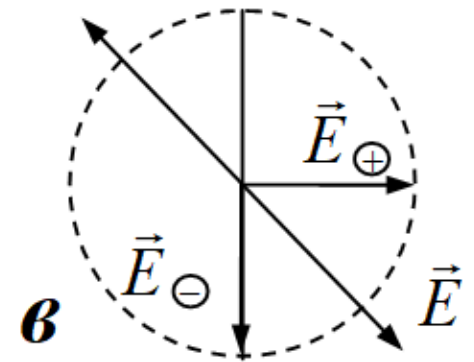
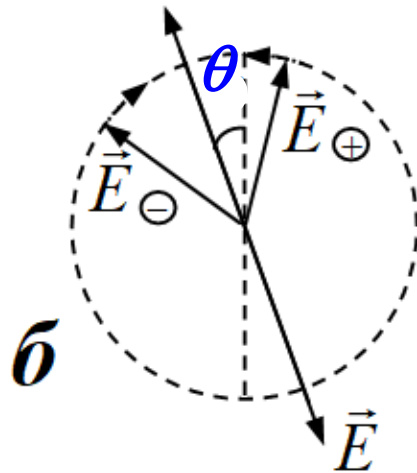
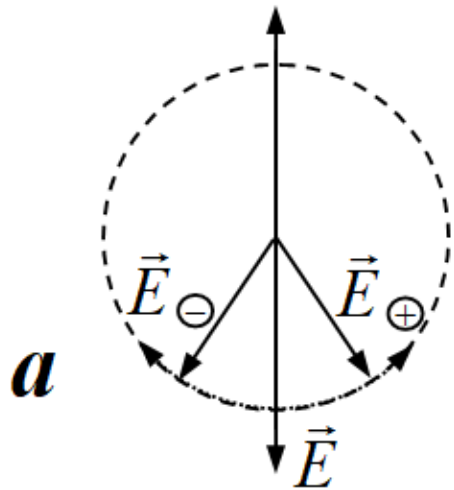
***β* - глюкоза**

$$[\alpha]_D = +18,7^\circ$$

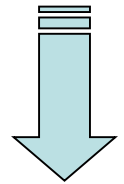
**Удельное вращение**



# Объяснение оптической активности – гипотеза Френеля



$$\Delta = \lambda/4$$

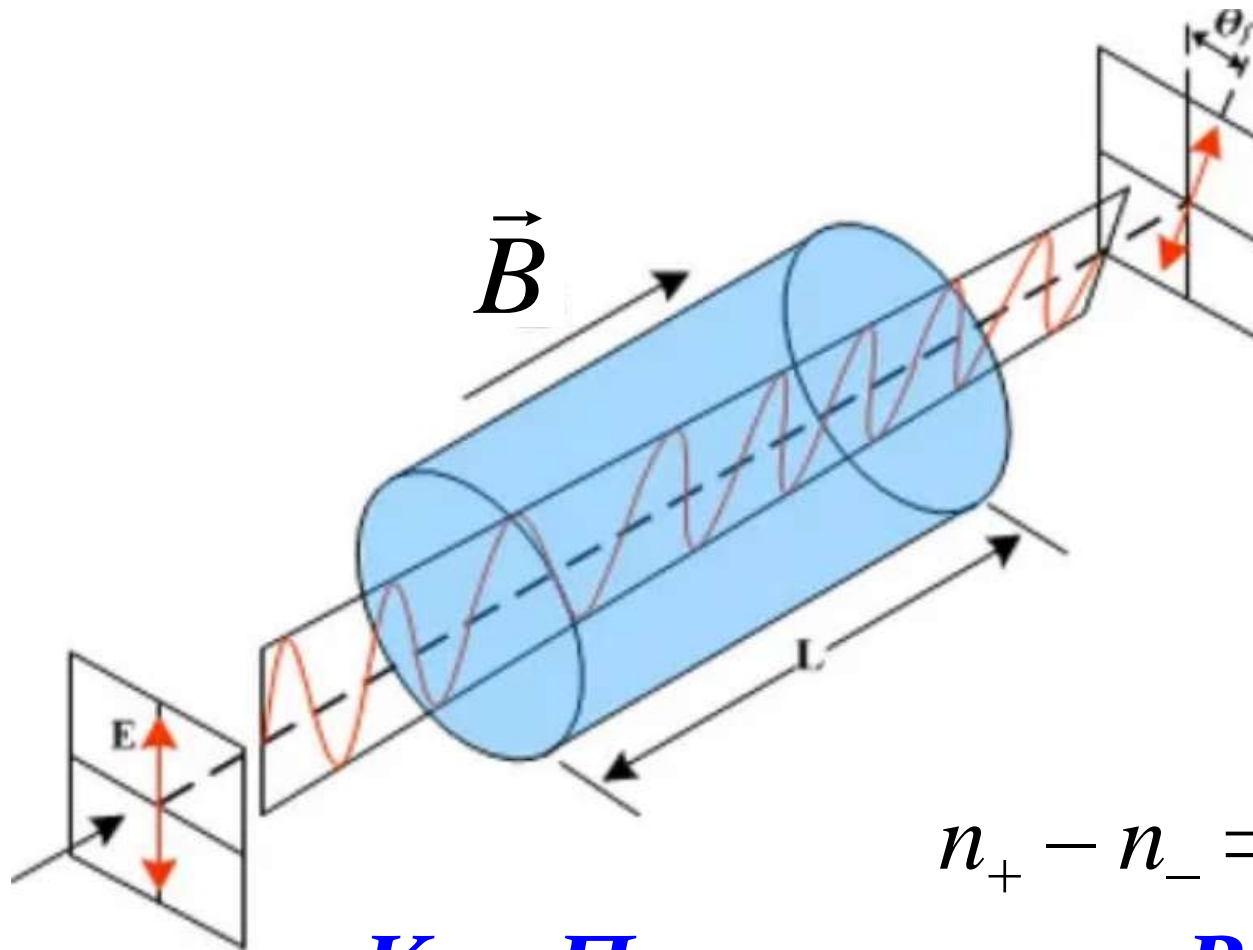


$$\theta = \pi/4$$

$$\Delta = (n_+ - n_-) \cdot l$$

$$\theta = \frac{\Delta}{\lambda} \cdot \pi$$

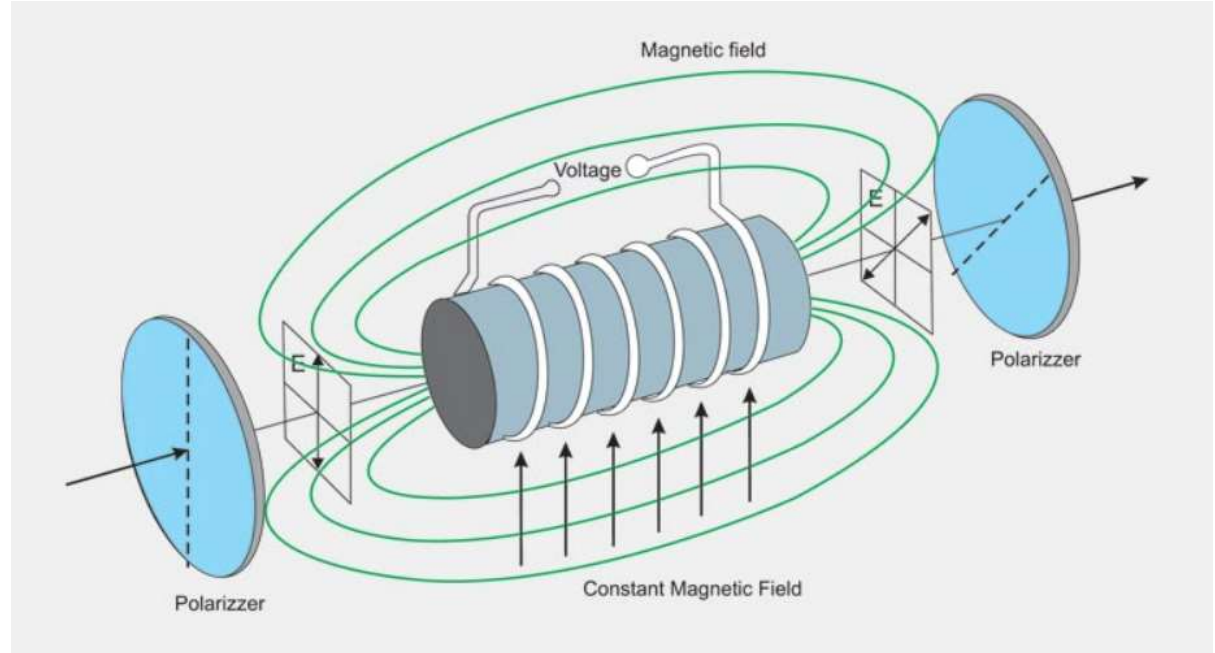
# Наведённая оптическая активность - Эффект Фарадея



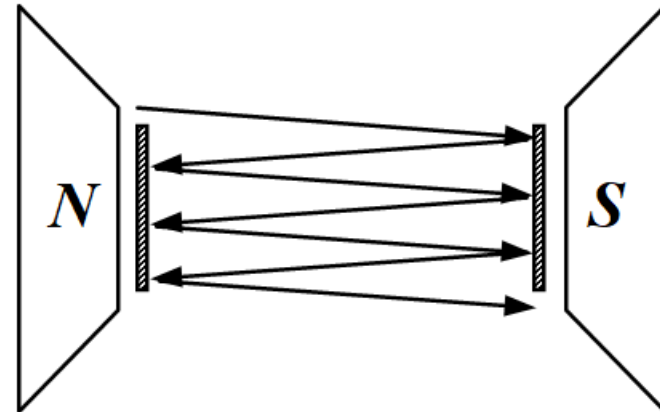
$$n_+ - n_- = K_5 \cdot B l$$

$K_5$  - Постоянная Верде

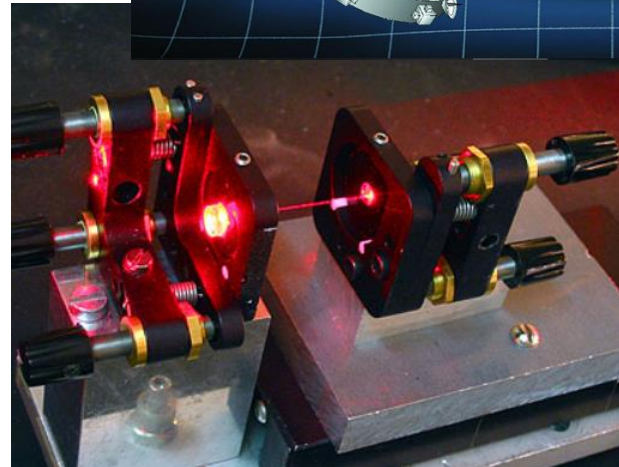
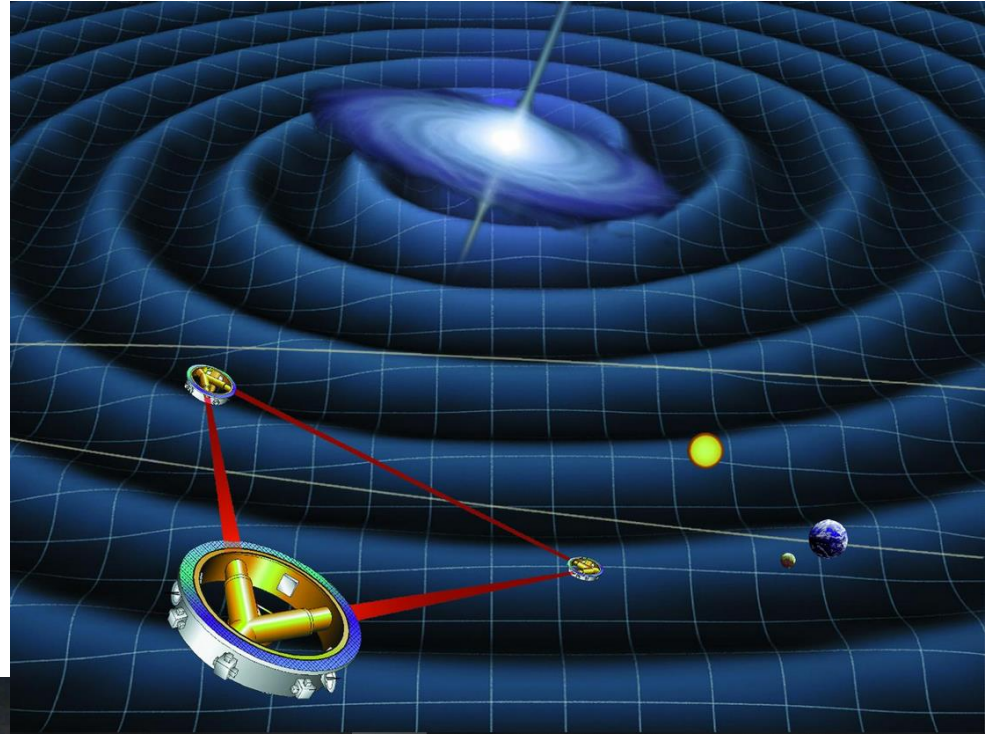
# Наведённая оптическая активность Эффект Фарадея



Установка Фарадея



# Лекция 15. Интерференционные приборы и современная наука



# *Интерференционные приборы*

$$l_1 n_1 - l_2 n_2 = m \lambda$$

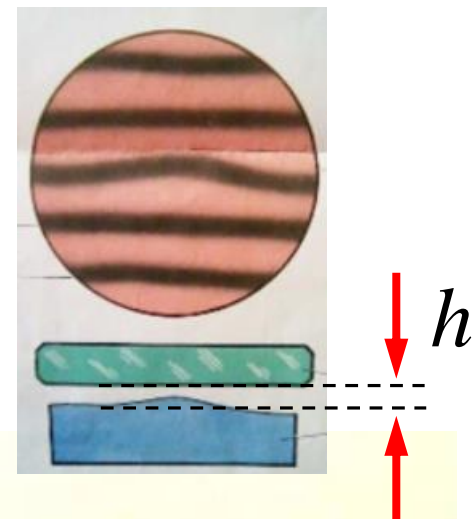
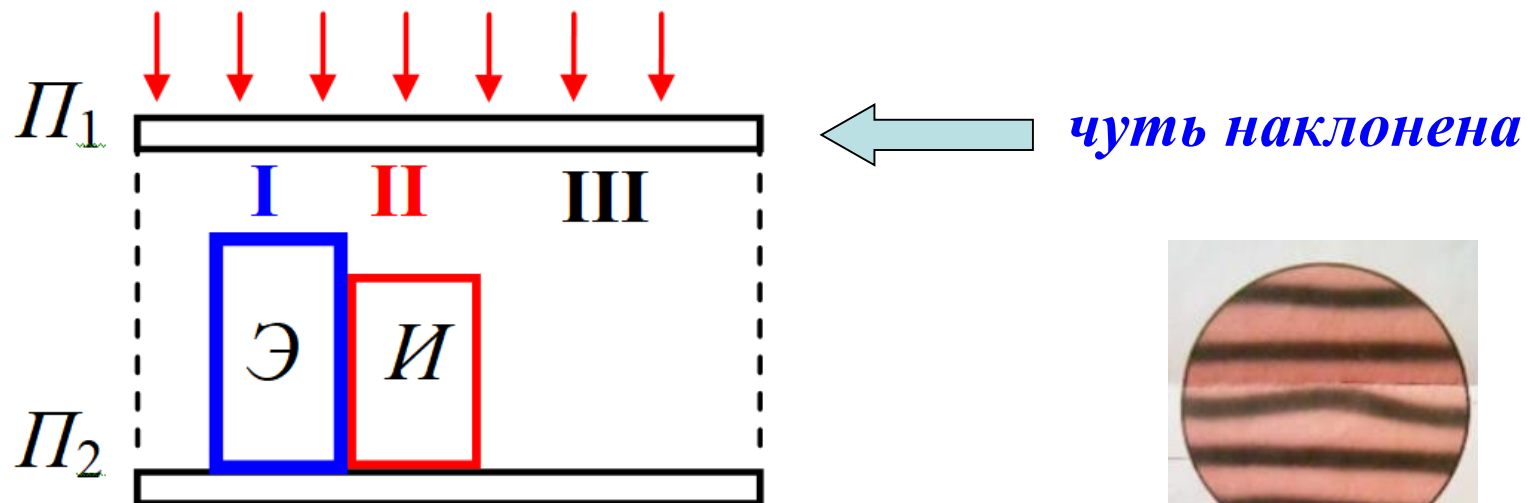
**Компараторы**  
 $\Delta h - ?$

**Рефрактометры**  
 $\Delta n - ?$

**Спектральные аппараты**  
 $\lambda - ?$



# Интерференционные компараторы

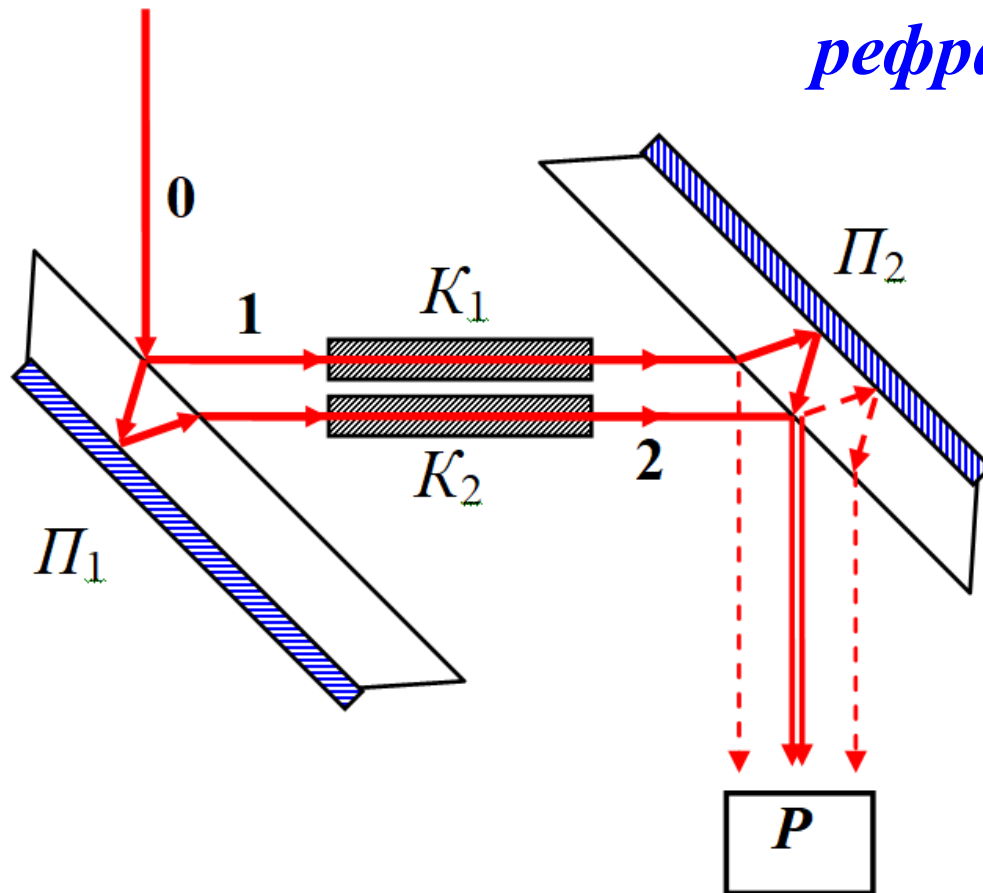


ПОВЕРКА КОНЦЕВЫХ МЕР

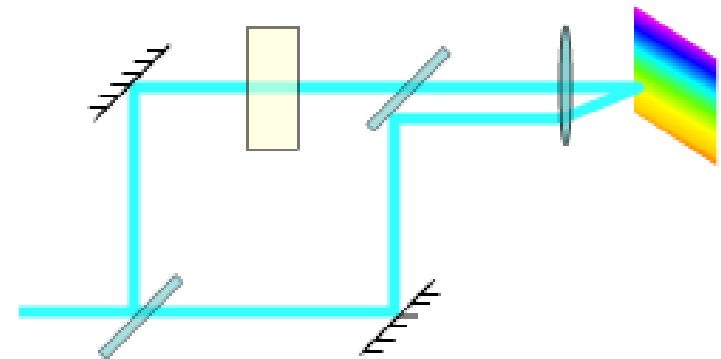




# Интерференционный рефрактометр Жамена

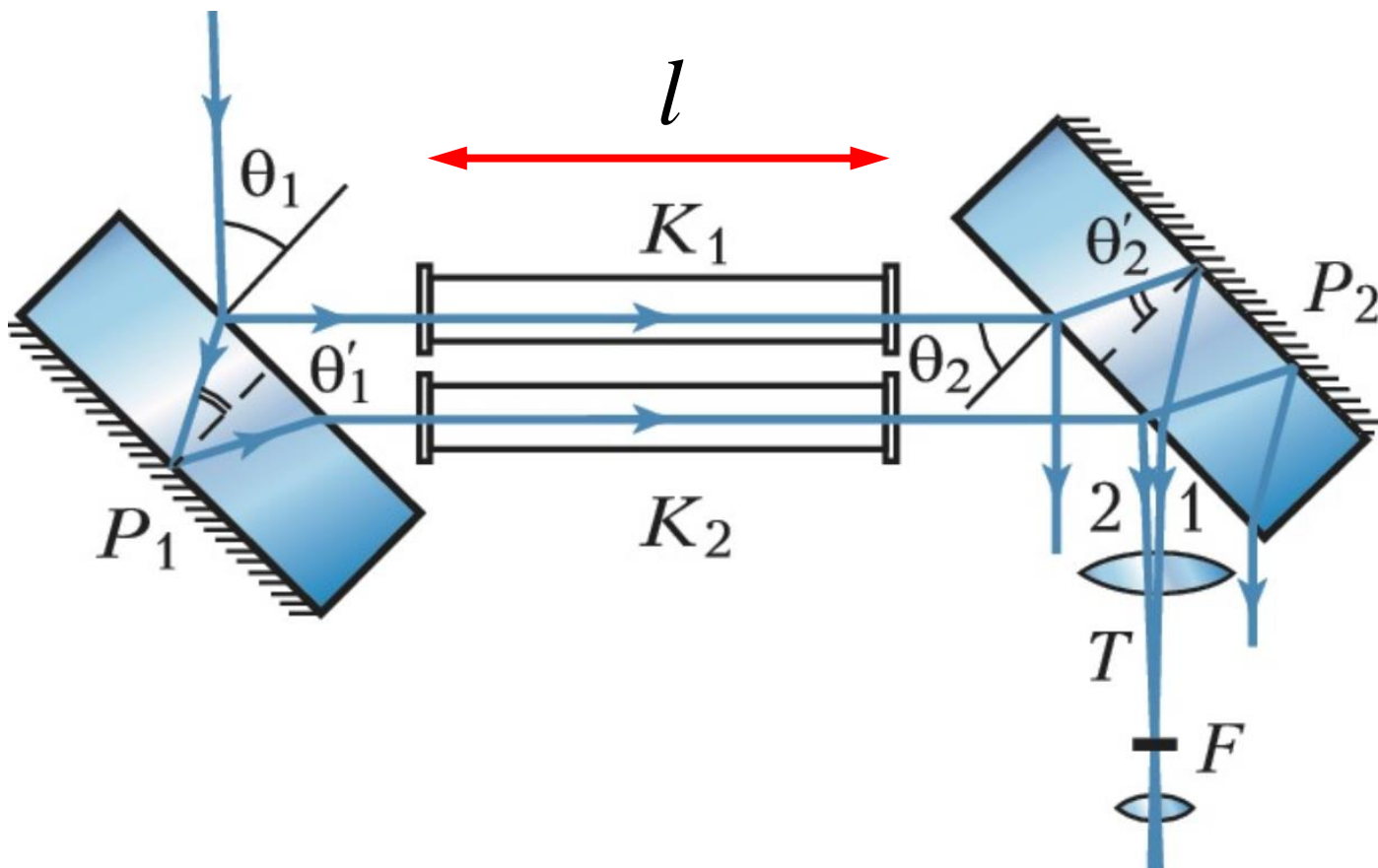


*рефрактометр  
Маха - Цандера*



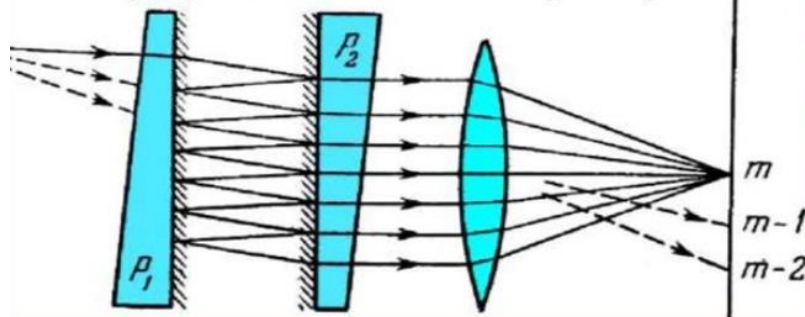
содержание сахарозы (по весу)	<b>0,000 %</b>	<b>1,000 %</b>	<b>2,000 %</b>	<b>3,000 %</b>
показатель преломления	<b>1,33299</b>	<b>1,33443</b>	<b>1,33588</b>	<b>1,33733</b>

# Интерферометр Жамена

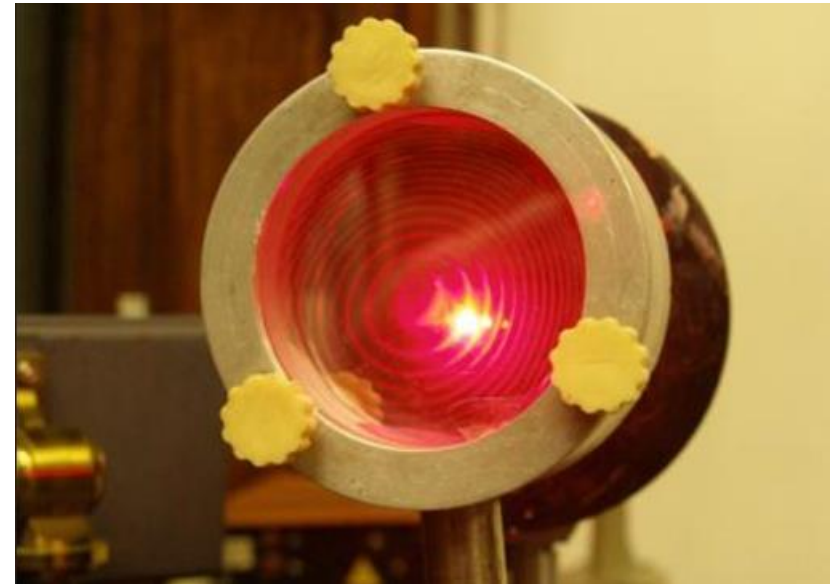


# Спектральный аппарат - интерферометр Фабри - Перо

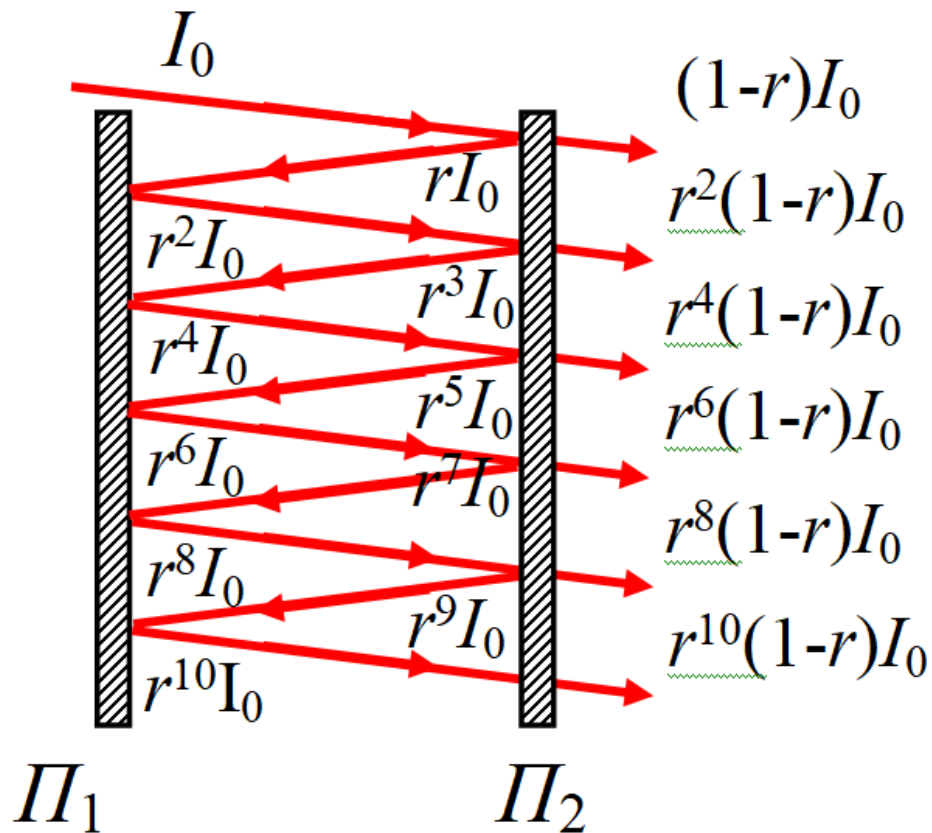
Интерференционный эталон Фабри - Перо



Отражение света от двух параллельных плоскостей приводит к образованию локализованных в бесконечности интерференционных полос равного наклона.



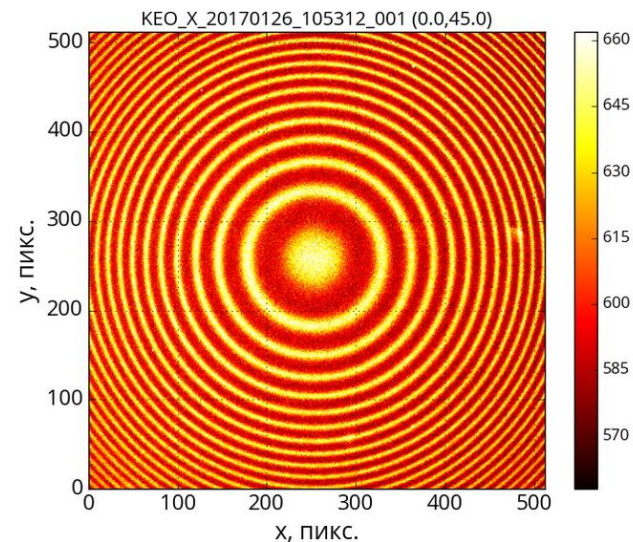
# Интерферометр (эталон, резонатор) Фабри - Перо



$$N \sim 10 \div 100$$

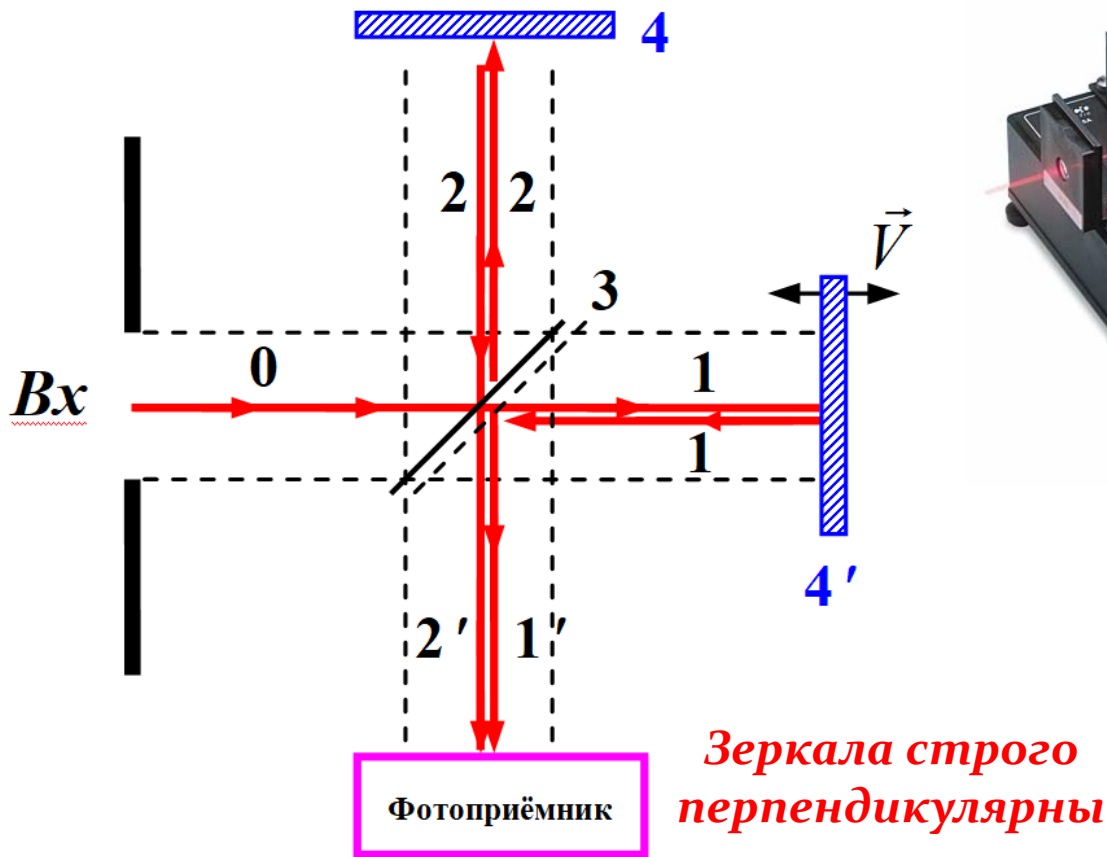
$$m = 2h/\lambda \sim 10^5$$

$$R = mN$$

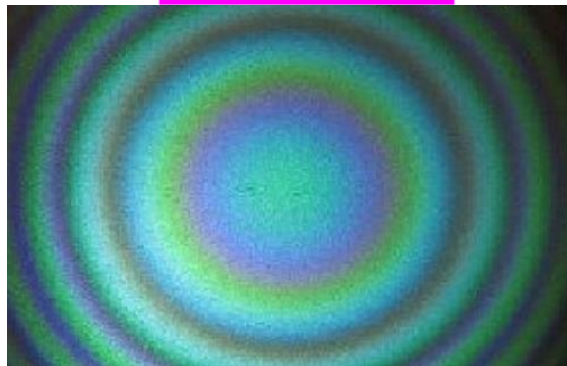




# Интерферометр Майкельсона



*Зеркала НЕ строго перпендикулярны*



*Зеркала строго перпендикулярны*

# Принципы Фурье-спектроскопии

Одна компонента в спектре ( $\omega_1$  и  $\omega_2$ ):

$$I(\omega) = I_0(\omega)(1 + \cos \Delta\varphi), \quad \text{где} \quad \Delta\varphi = k \cdot \Delta r = \frac{2V\omega}{c} t$$

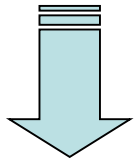
*переменная  
составляющая:*

$$\tilde{I}(\tau) = I_0(\omega) \cos \omega\tau, \quad \text{где} \quad \tau = \frac{2V}{c} t$$

Две компоненты в спектре ( $\omega_1$  и  $\omega_2$ ):

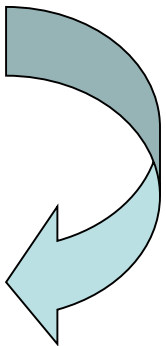
$$\tilde{I}(\tau) = I_1(\omega) \cos \omega_1\tau + I_2(\omega) \cos \omega_2\tau$$

”Интерферограмма”  $\rightarrow$  
$$F(\tau) = \int_0^{\infty} I(\omega) \cos \omega\tau d\omega$$



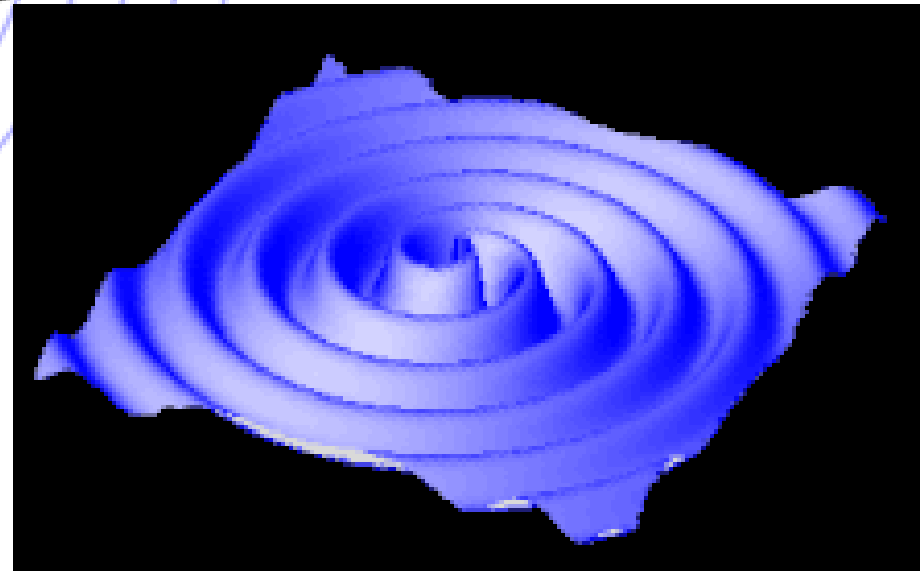
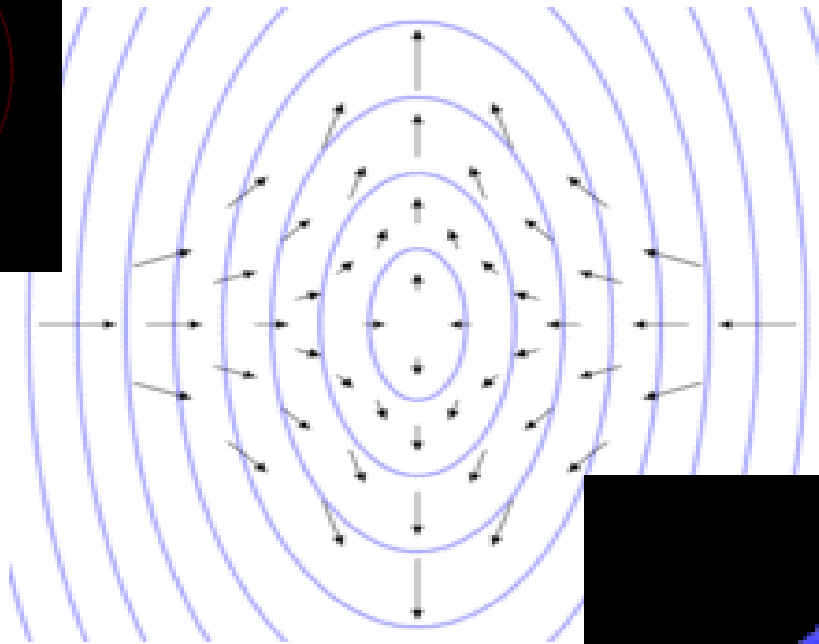
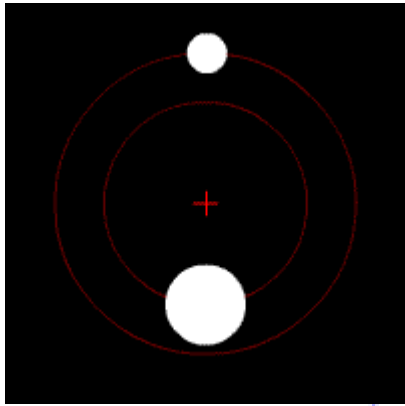
**Спектр:**

$$I(\omega) = (\pi)^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} F(\tau) \cos \omega\tau d\tau$$



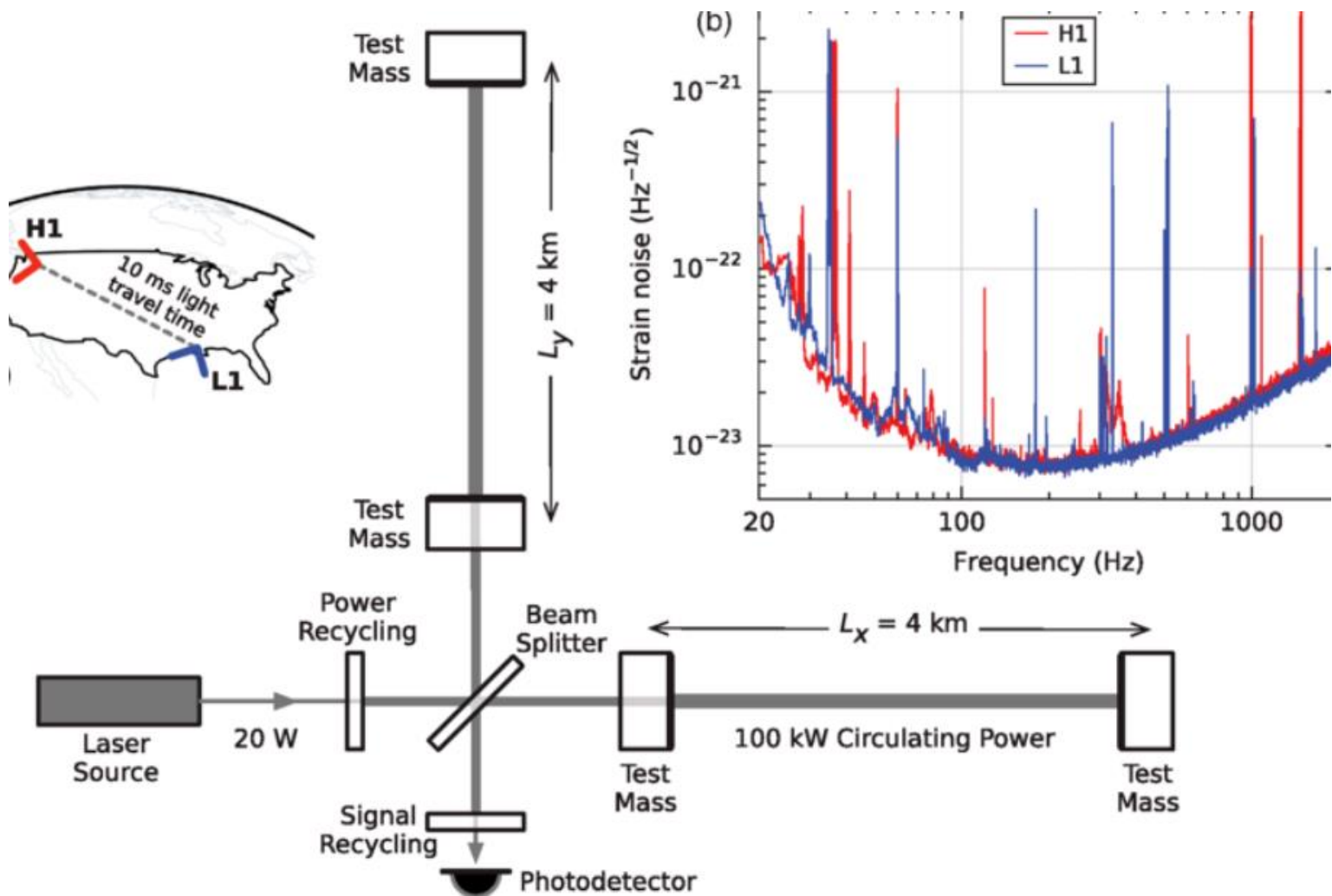


# Источники гравитационных волн во вселенной



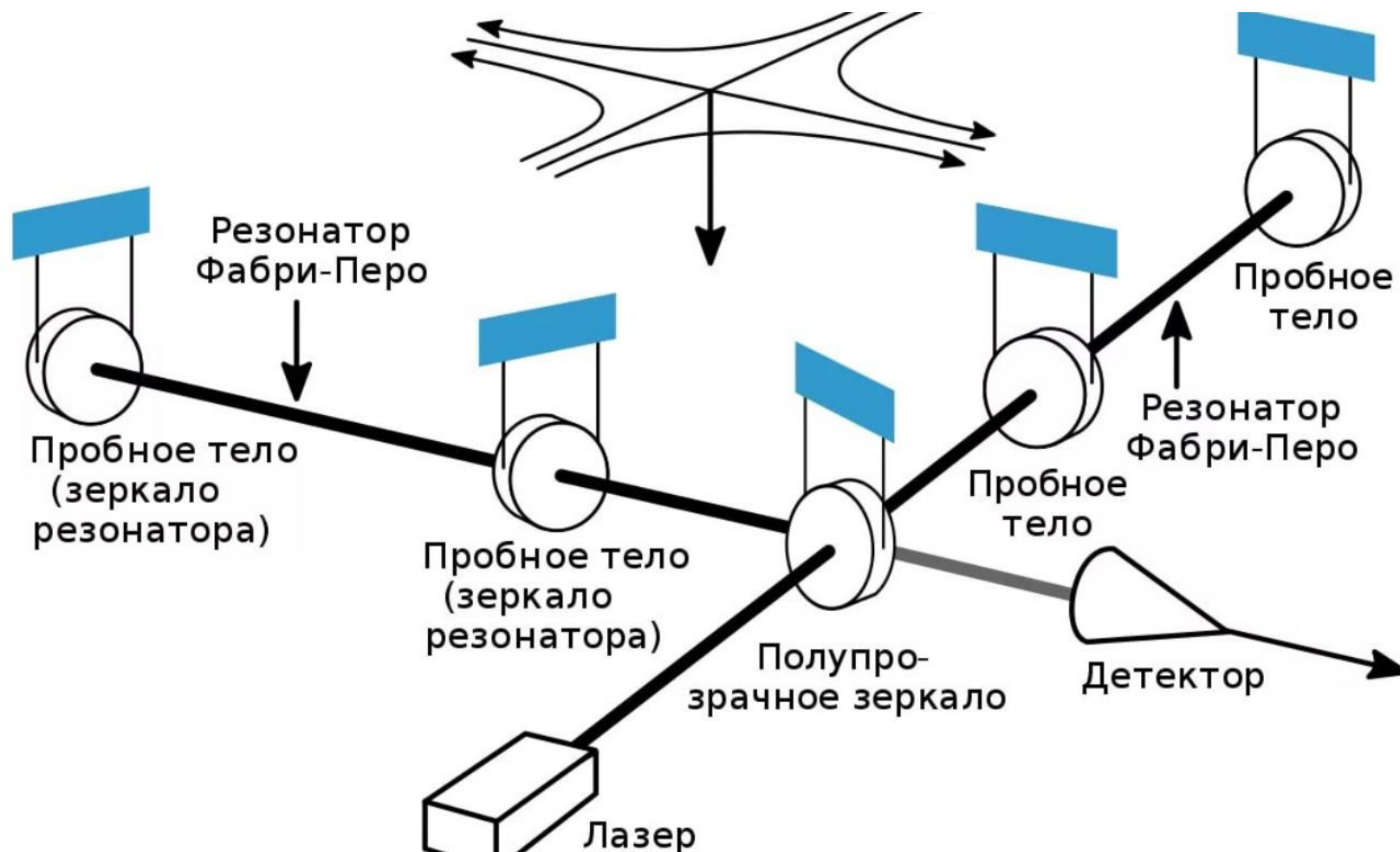
# Проект LIGO – “поймаем гравитационные волны” ☺

## Light Interferometer Gravitational-Wave Observatory



# Принцип устройства гравитационной антенны проекта LIGO

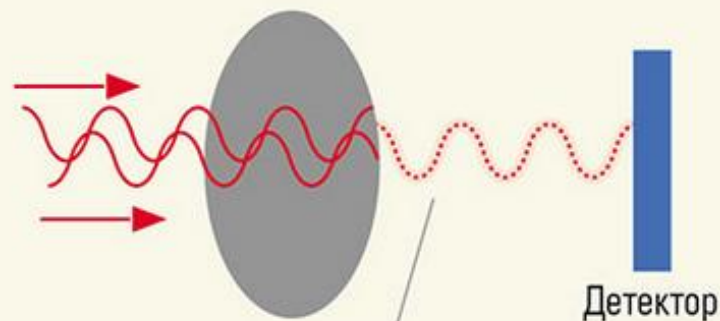
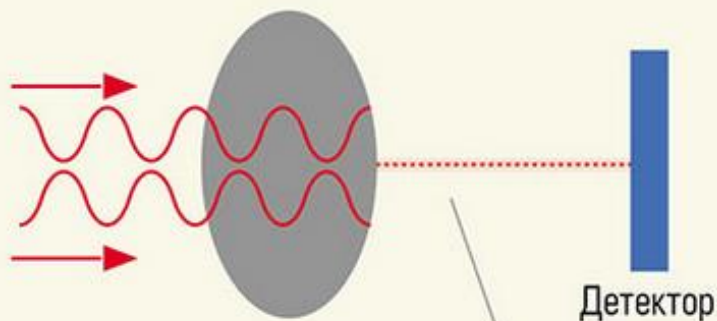
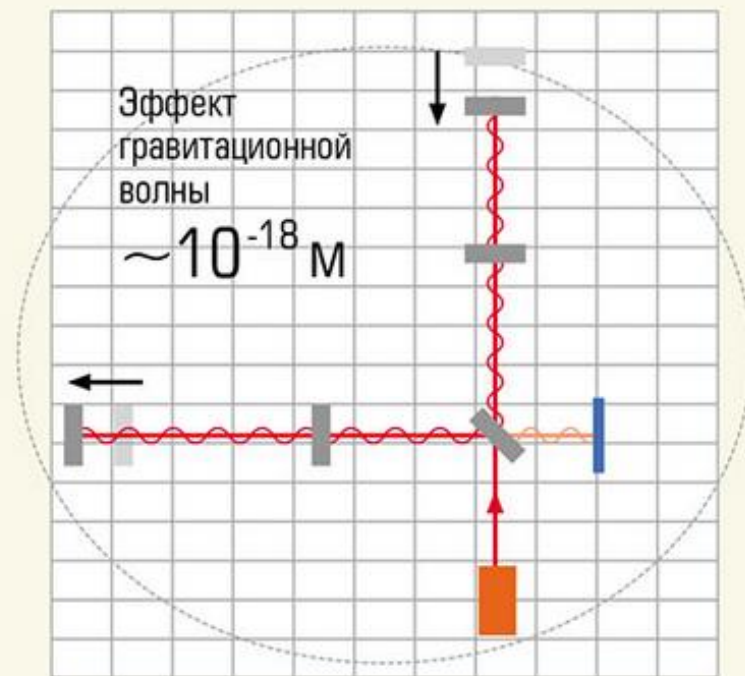
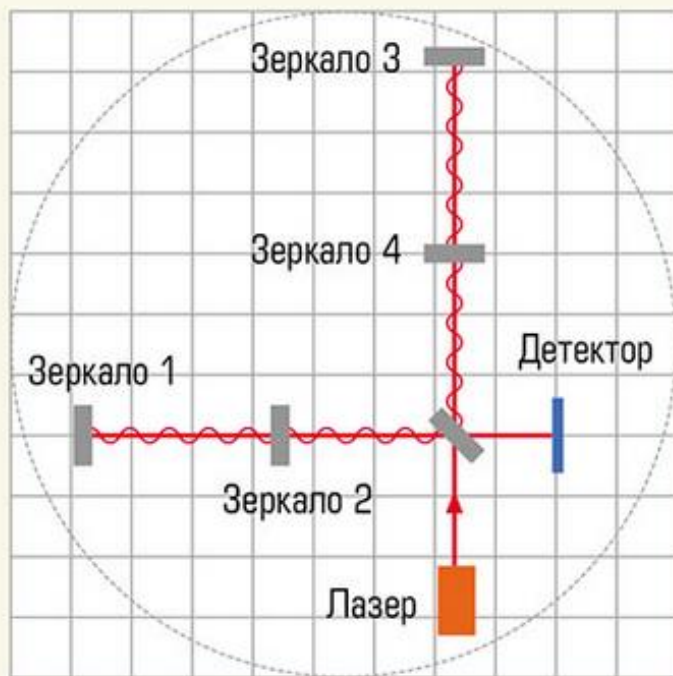
## LIGO Antenna



# Упрощённая оптическая схема антенны LIGO

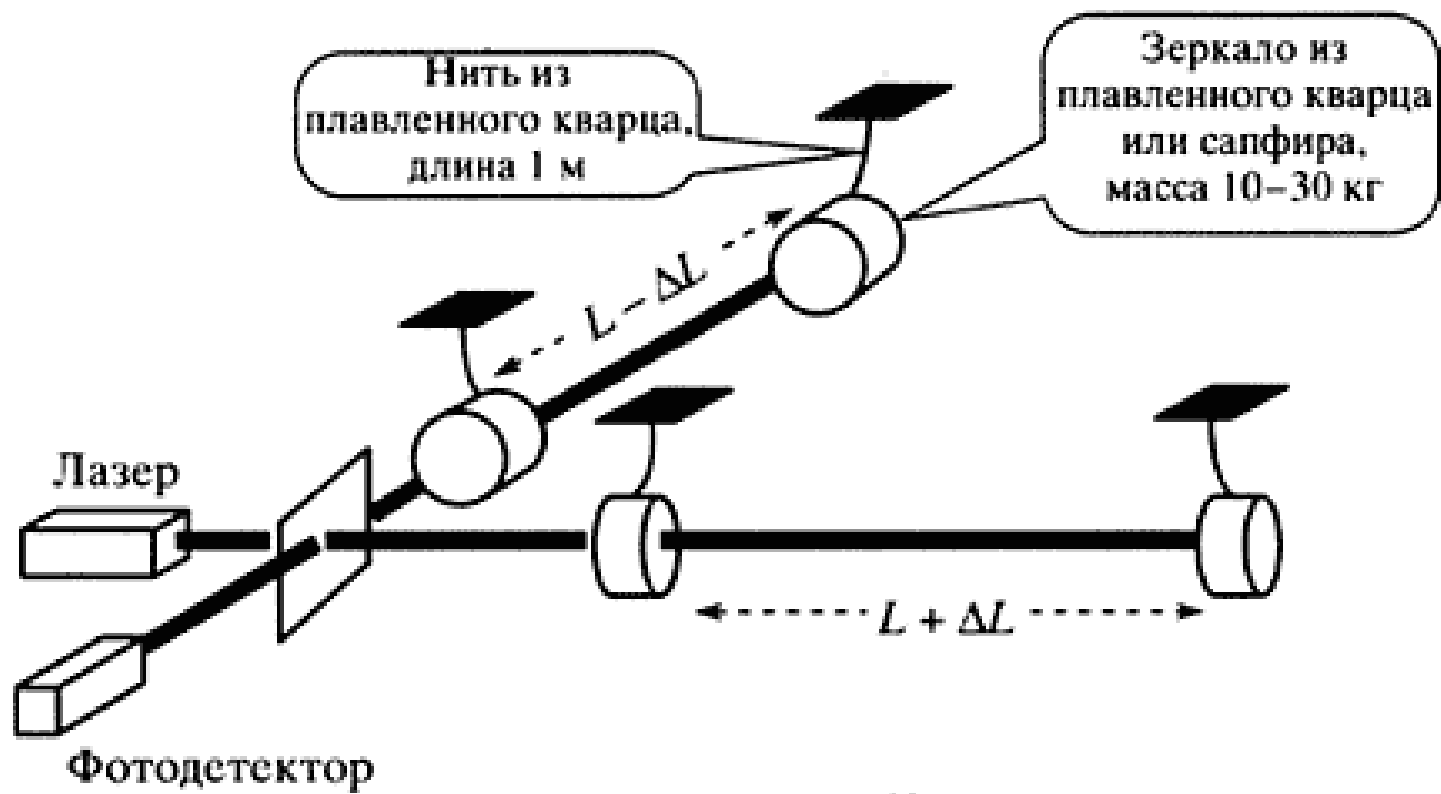
Влияние гравитационной волны на плечи интерферометра

Схема 2



Суммарный сигнал до и после воздействия гравитационной волны

# Упрощённая оптическая схема антенны LIGO



$$\Delta L = hL \approx 4 \times 10^{-16} \text{ см}$$

) (

$\approx 10^{-21}$     4 км



# *«Рукава» интерферометра LIGO*





# *Пробное тело антенны LIGO*



*Гравитационный коллапс за миллион световых лет от Земли – слияние чёрных дыр*





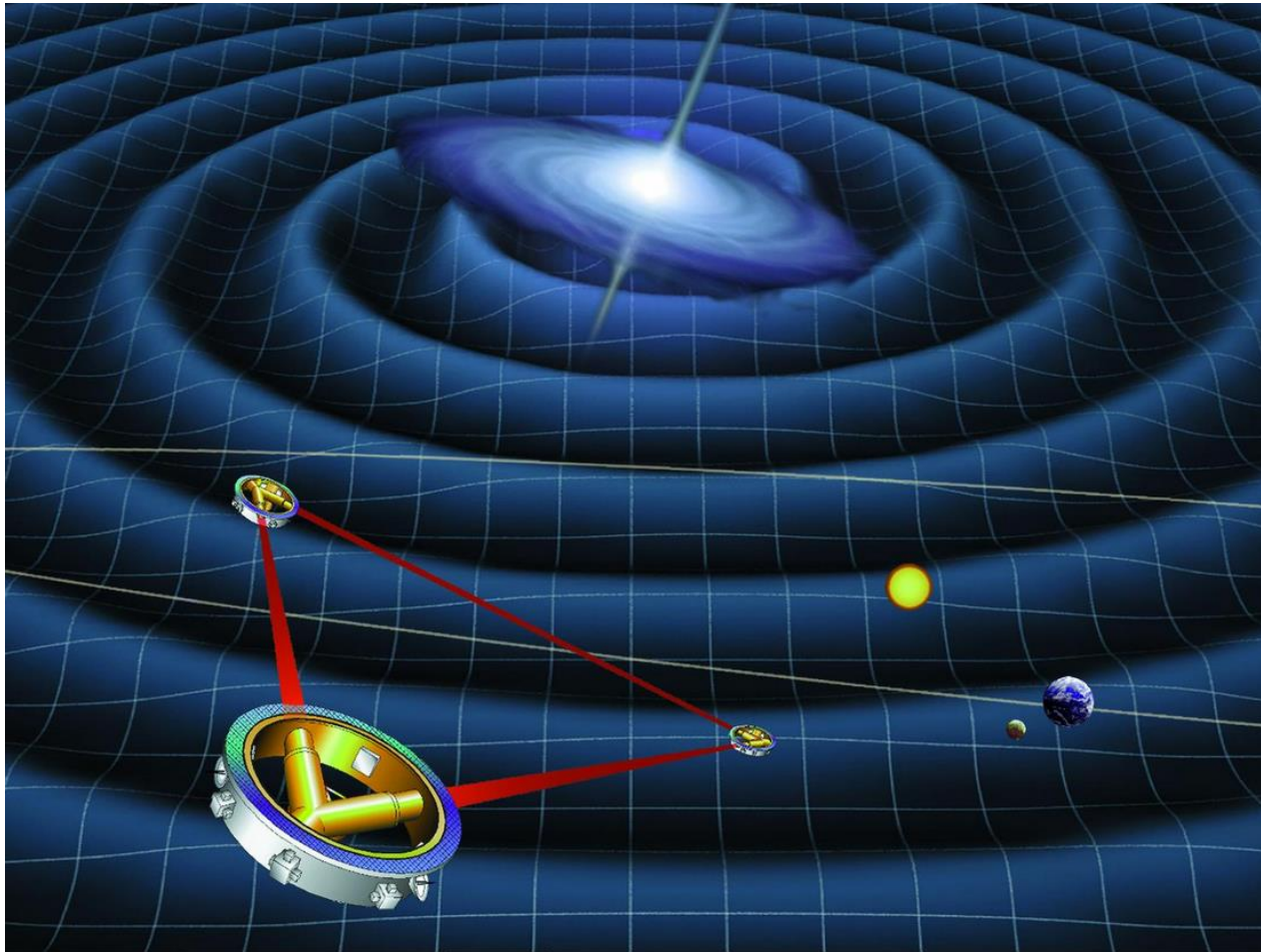
# Северный X-рукав интерферометра LIGO (Хэнфорд)



# Проект LISA

совместный проект [НАСА](#) и [ЕКА](#),  
который планируется объединить с LIGO  
в исследовании гравитационных волн

## *Laser Interferometer Space Antenna*





# Зарегистрированный сигнал 14 сентября 2015

Хэнфорд

Ливингстон

