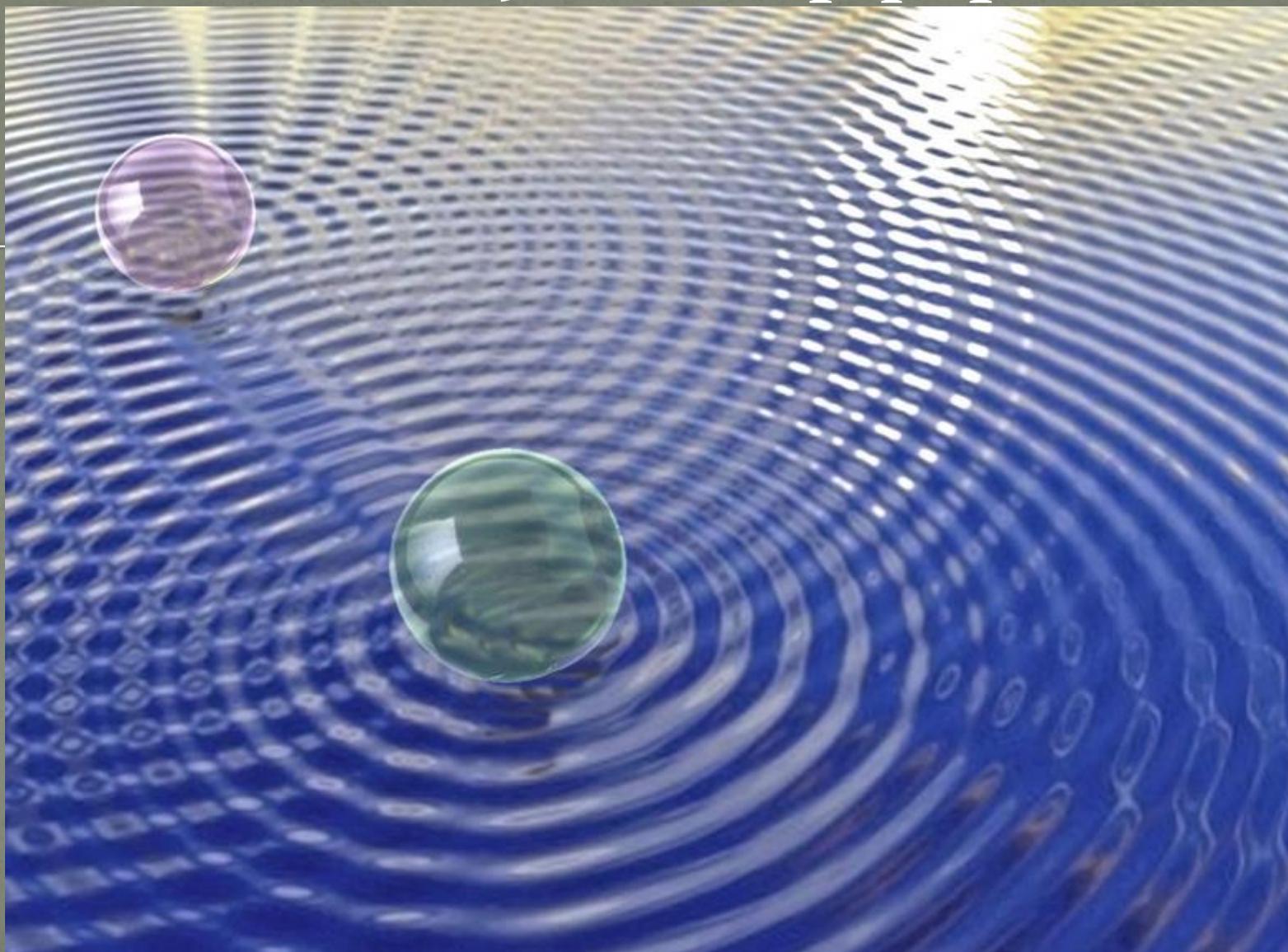
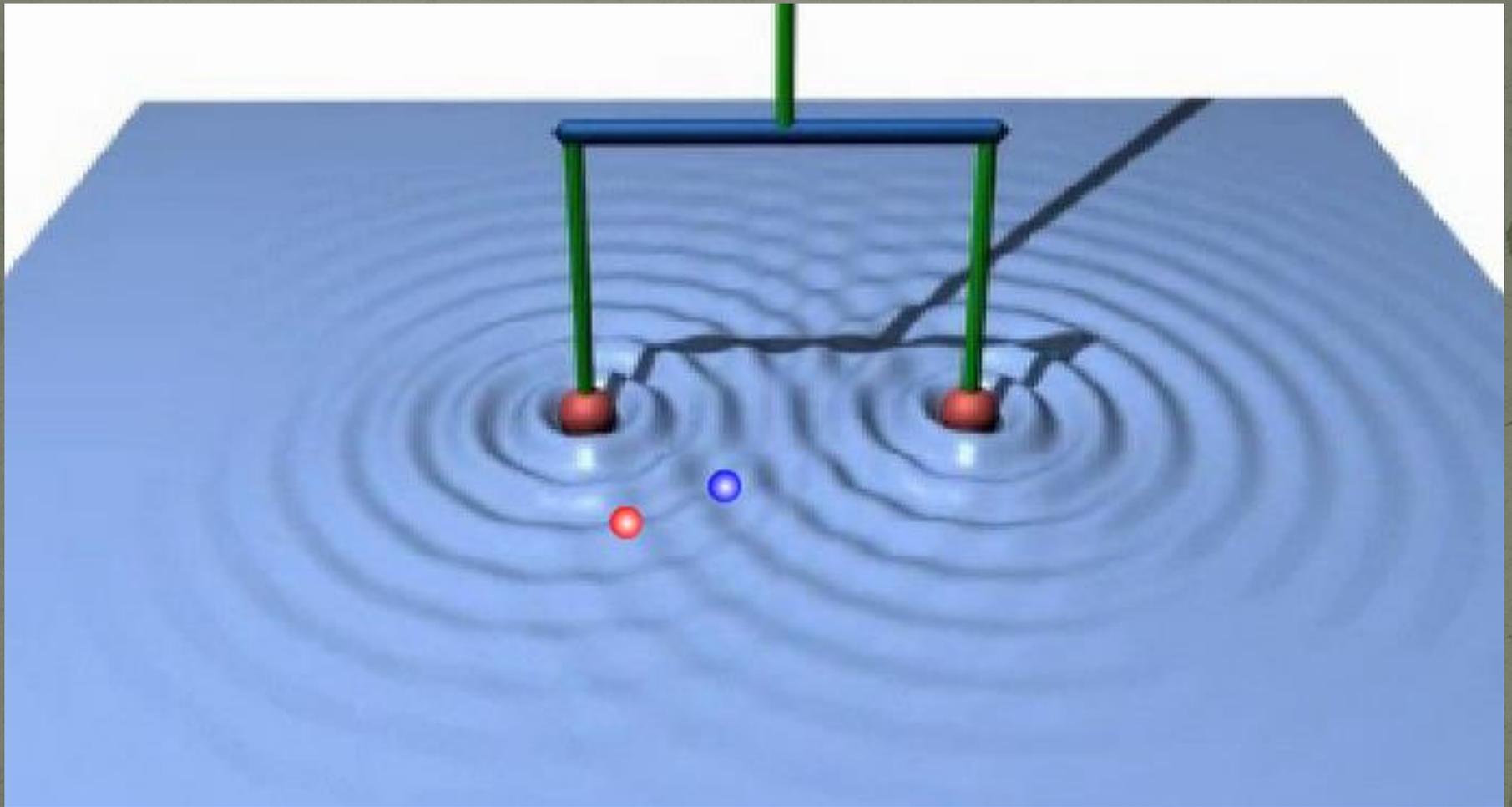
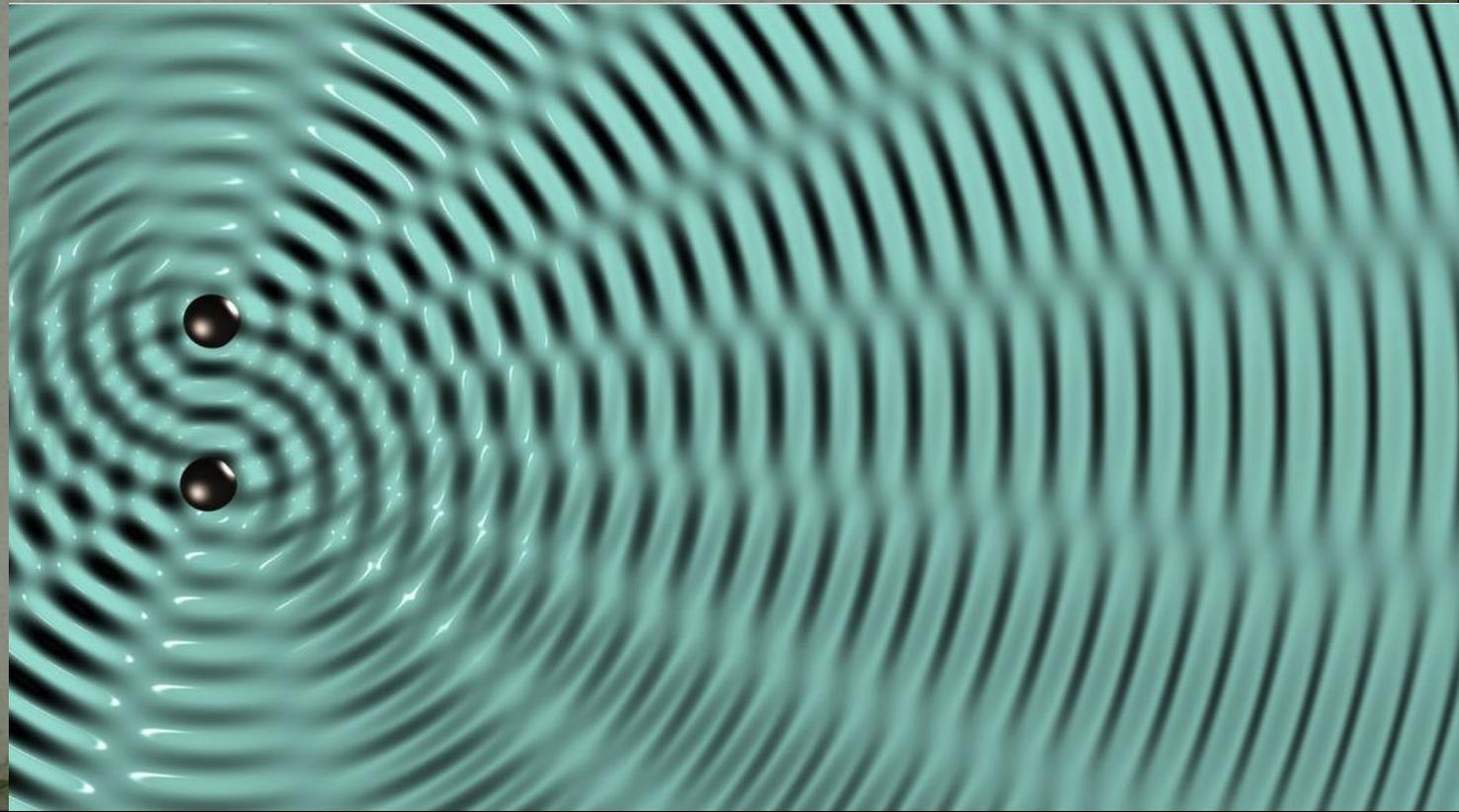


Лекции 8-9. Интерференция



Упругие волны



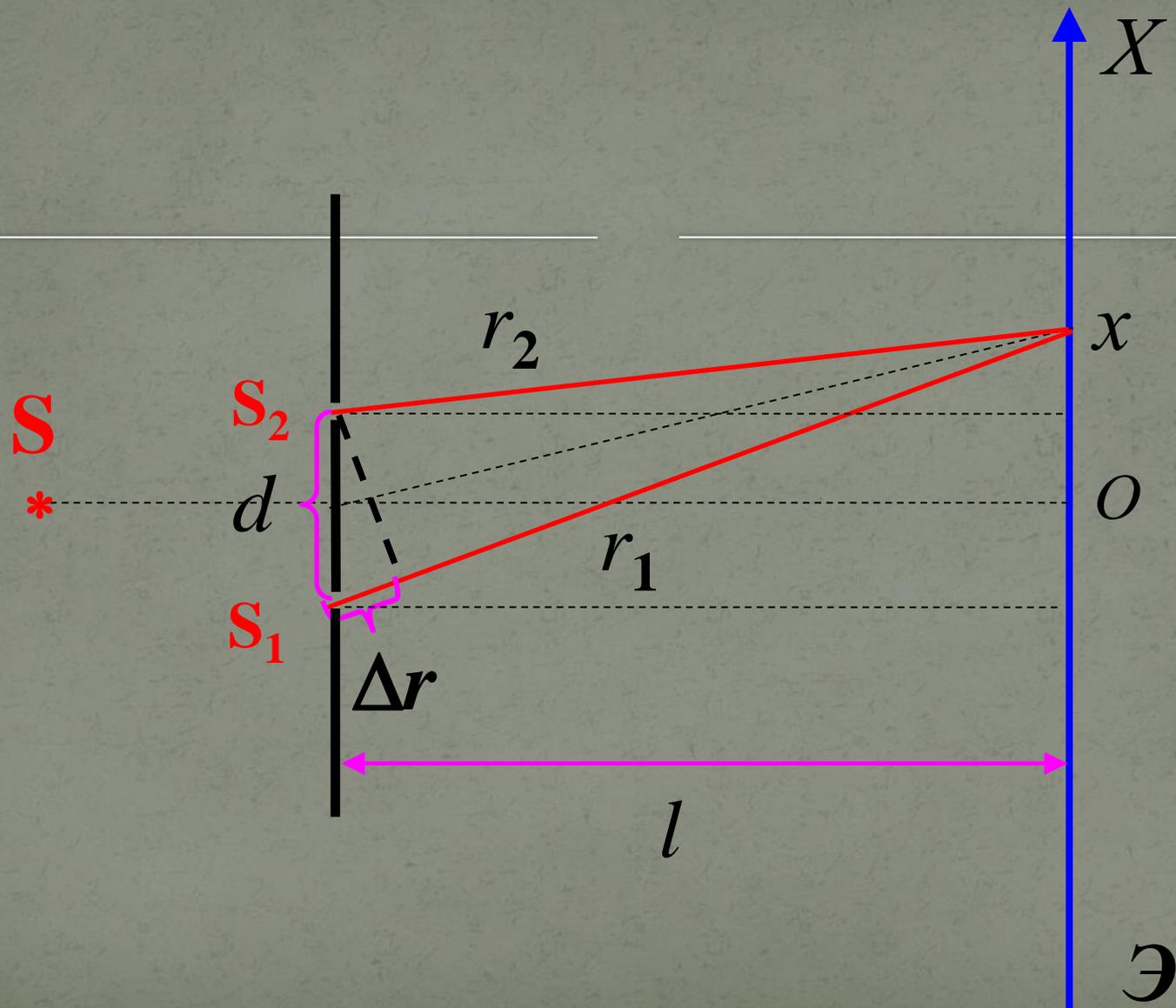


Интерференция света

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

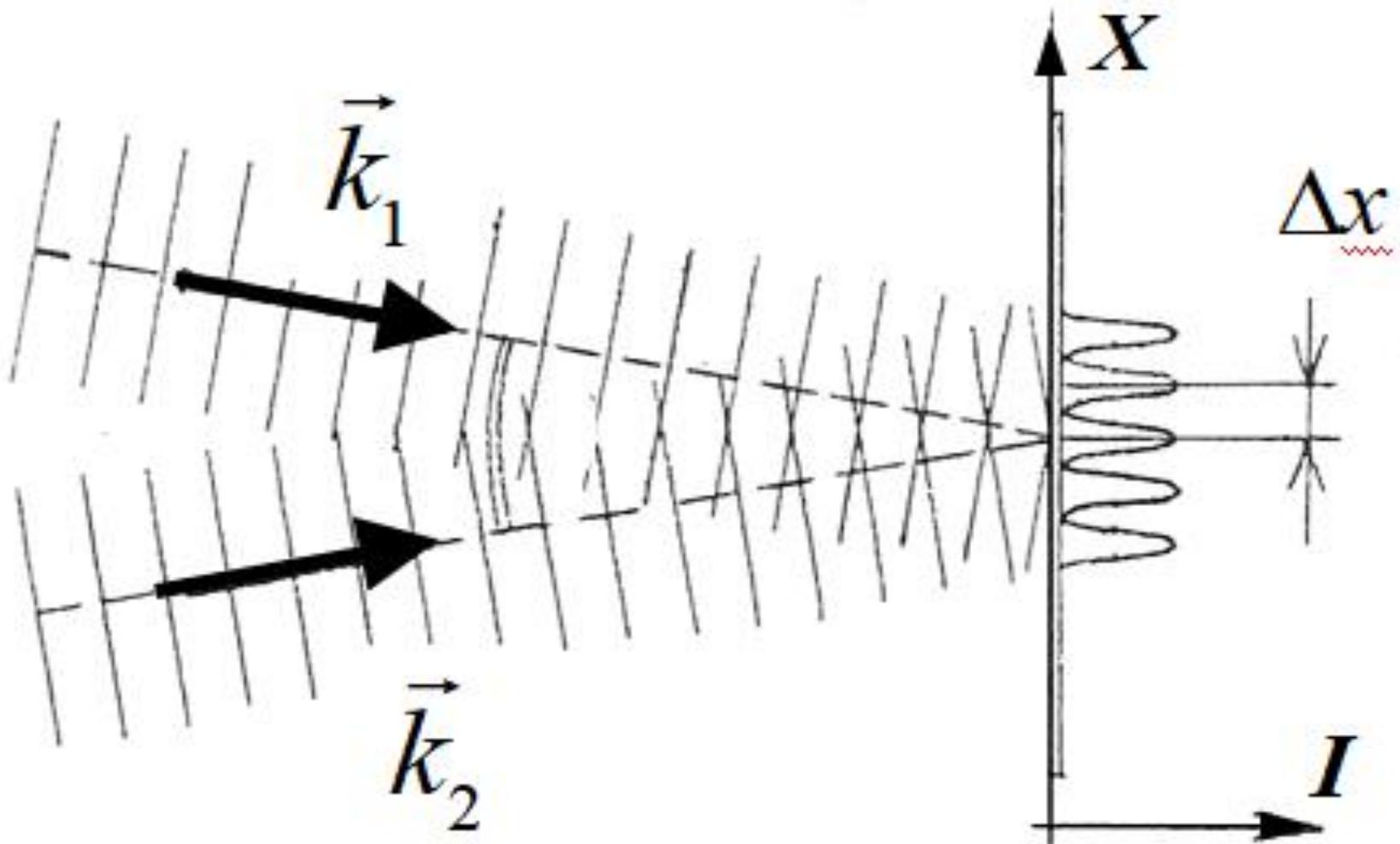
Франсуа Араго

Интерференционная схема Юнга



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

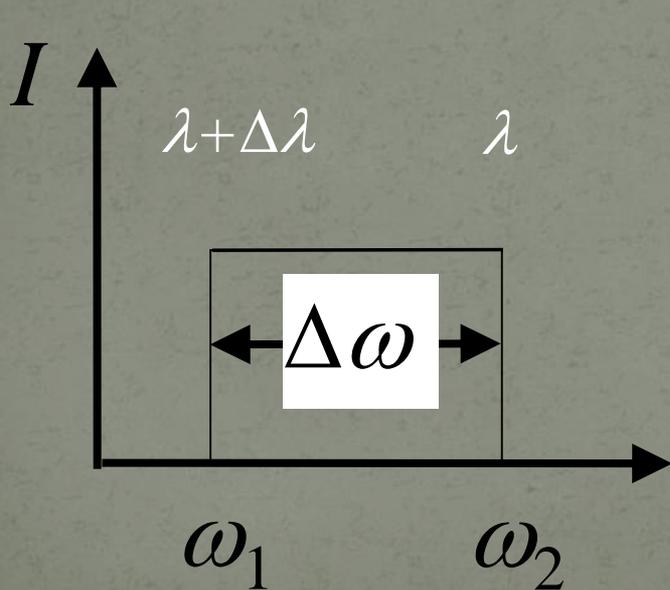
$$\Delta x \approx \frac{L\lambda}{d}$$



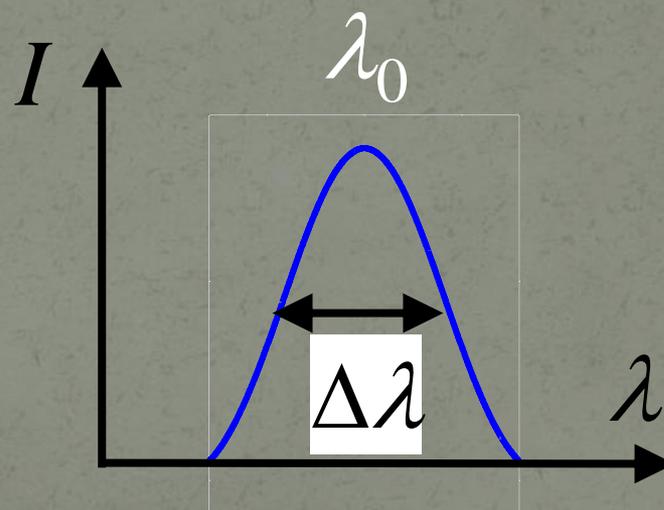
Степень когерентности

Временная когерентность

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



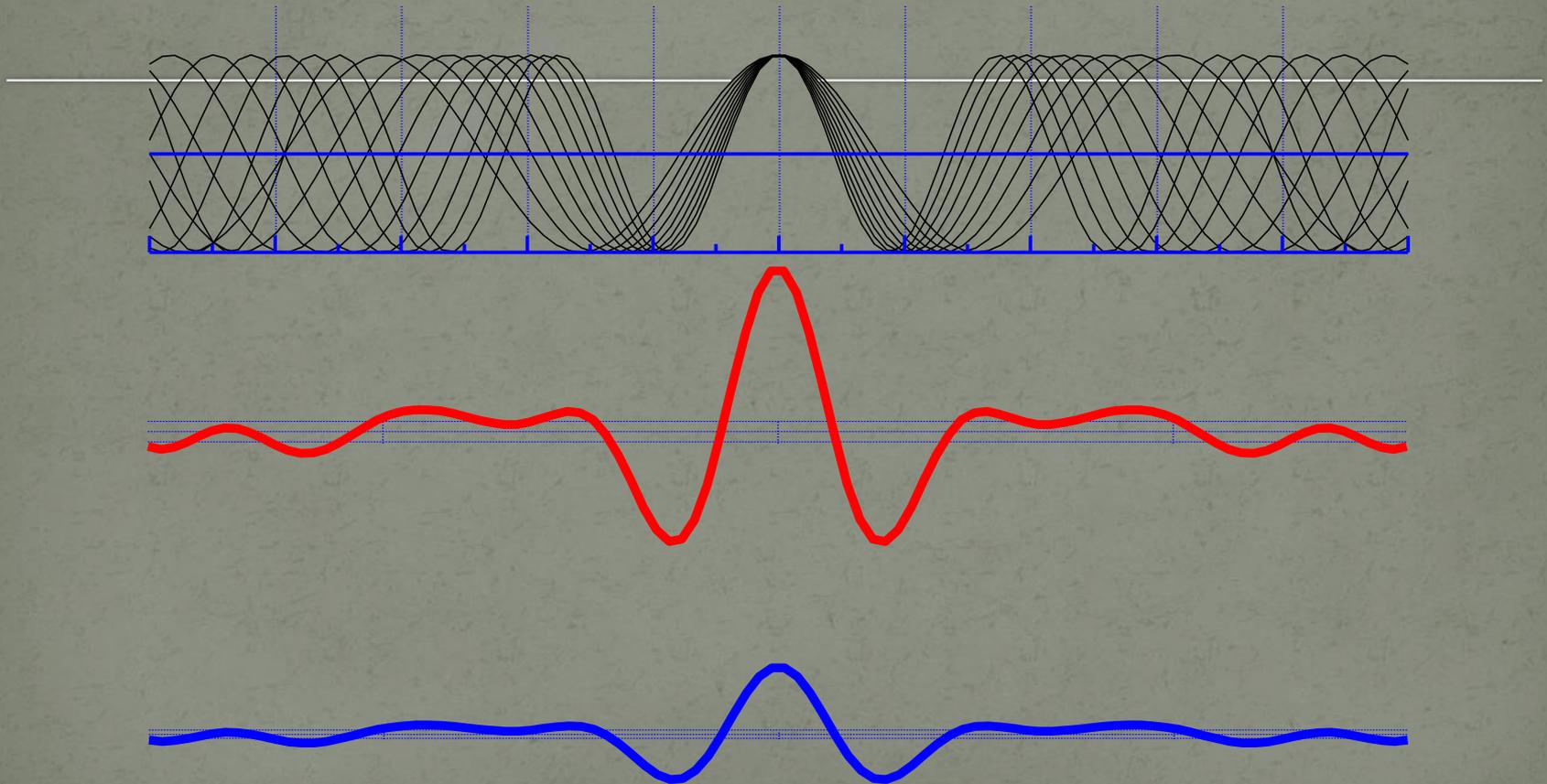
a



б

Временная и пространственная когерентность

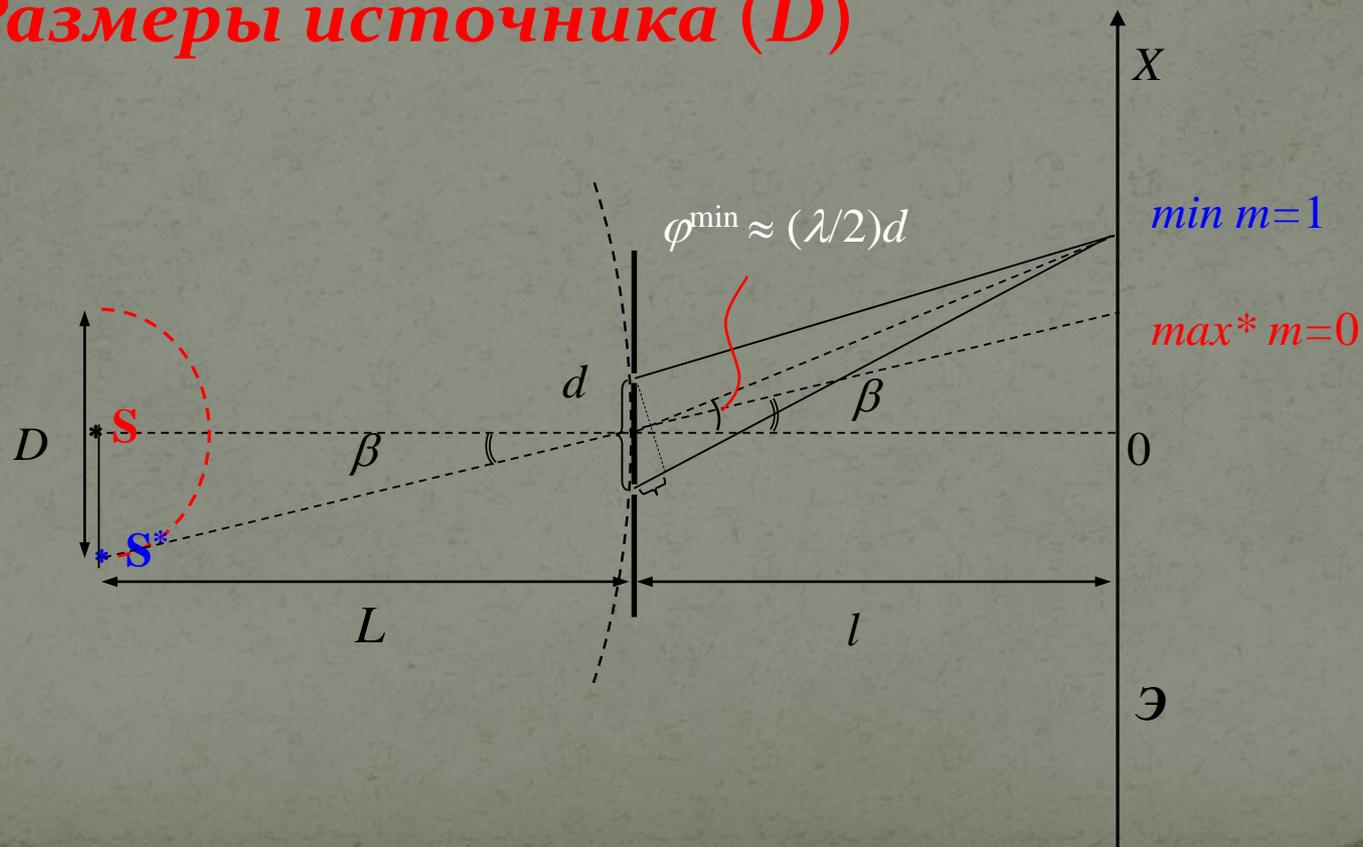
1) Немонохроматичность источника ($\Delta\lambda$)



Степень когерентности

Пространственная когерентность

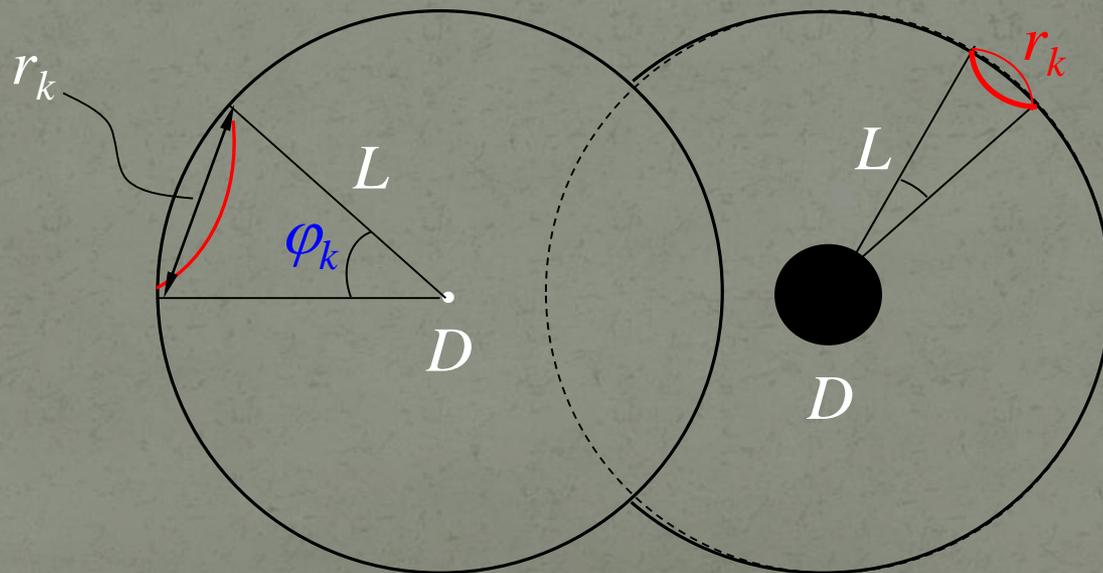
2) Размеры источника (D)



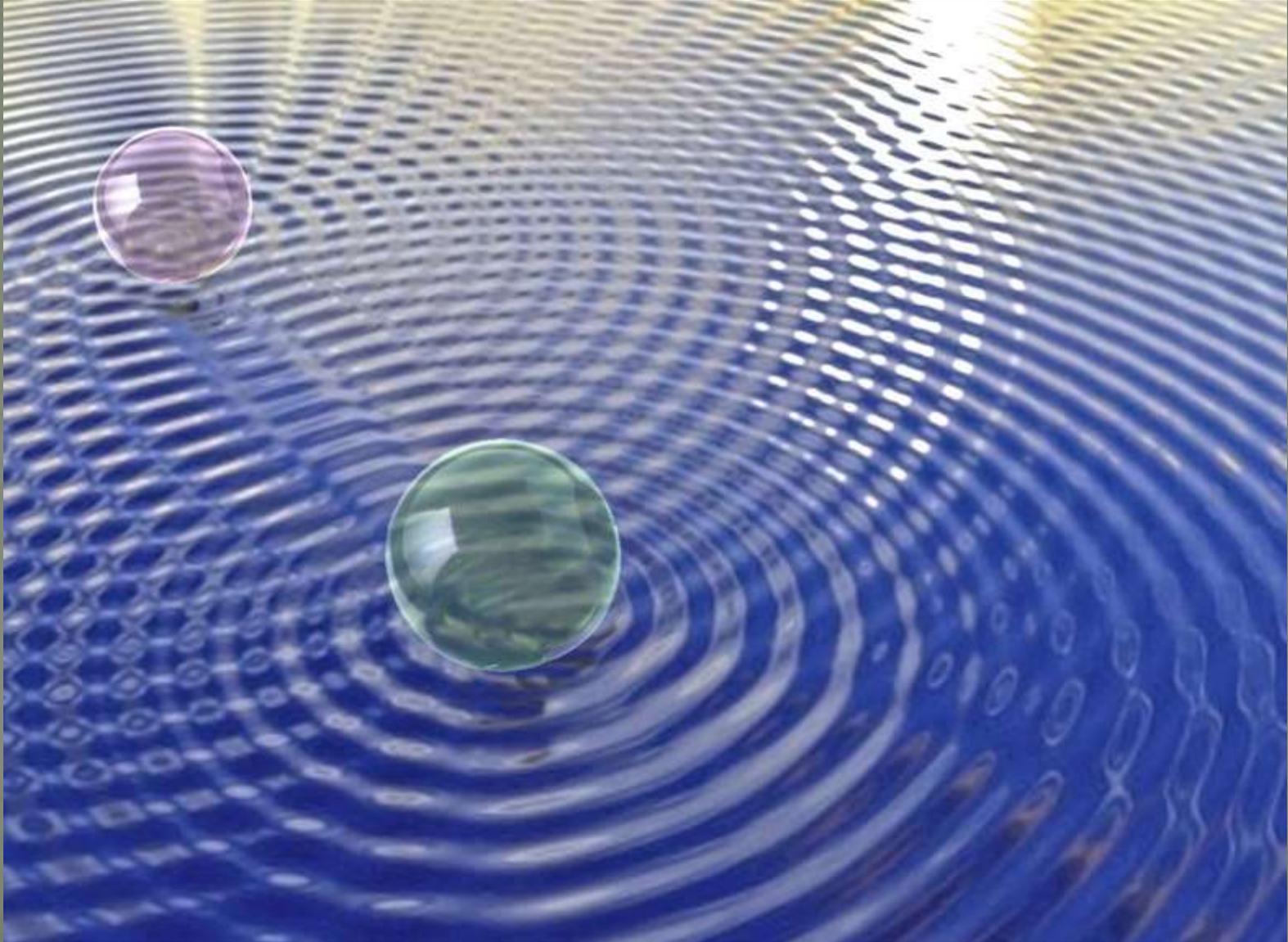
Степень когерентности

Пространственная когерентность

2) Размеры источника (D)

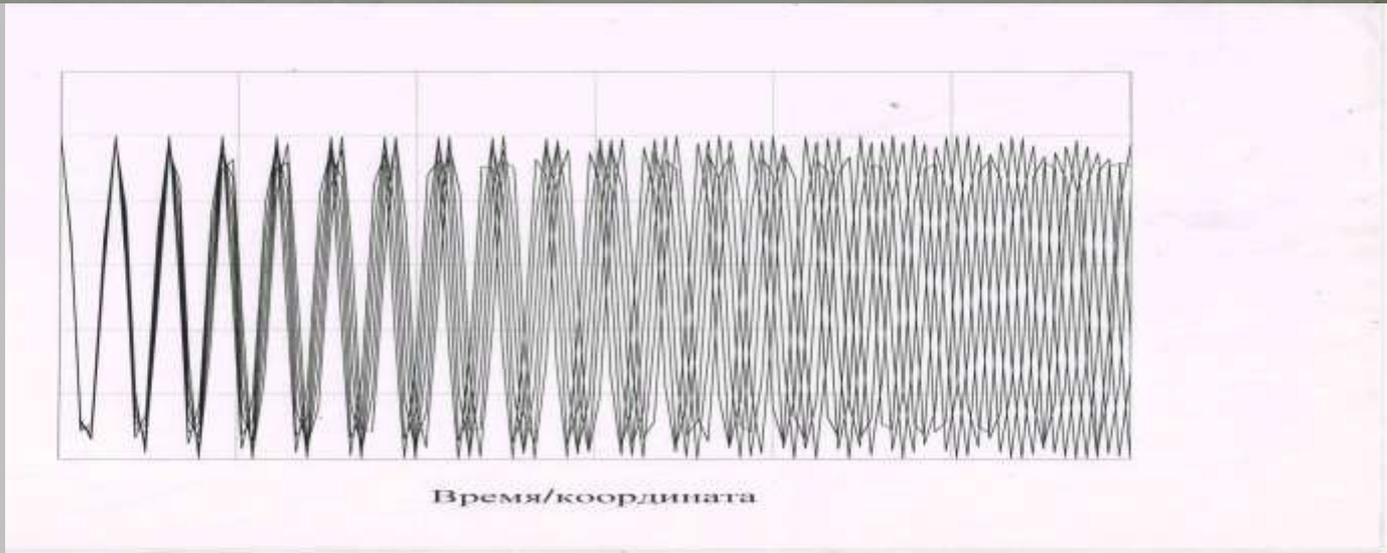
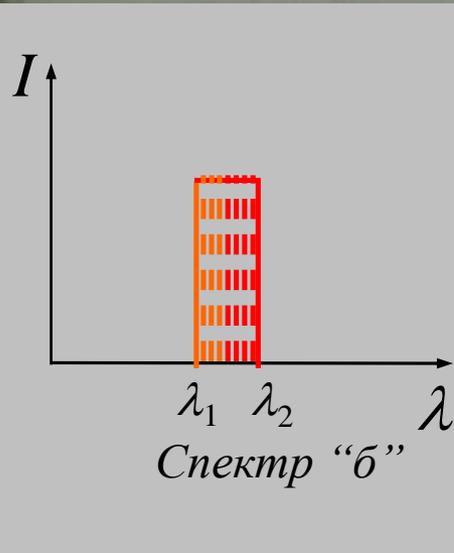
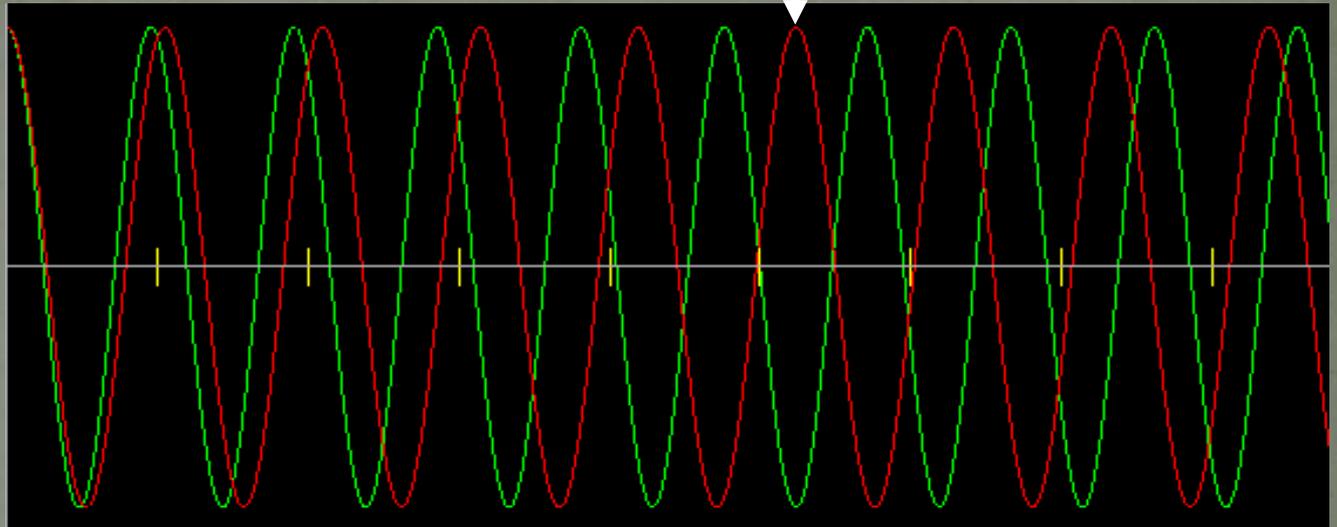
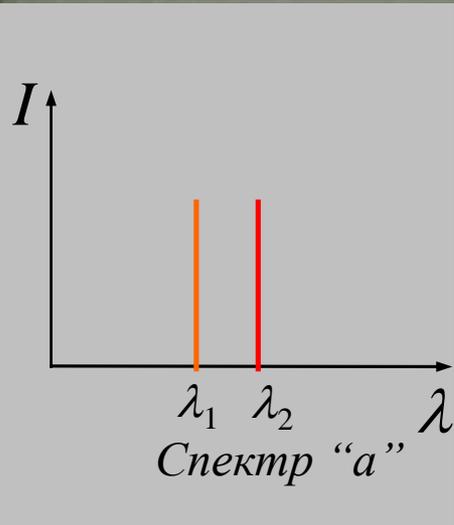


Лекции 8-9. Интерференция света



Время когерентности,

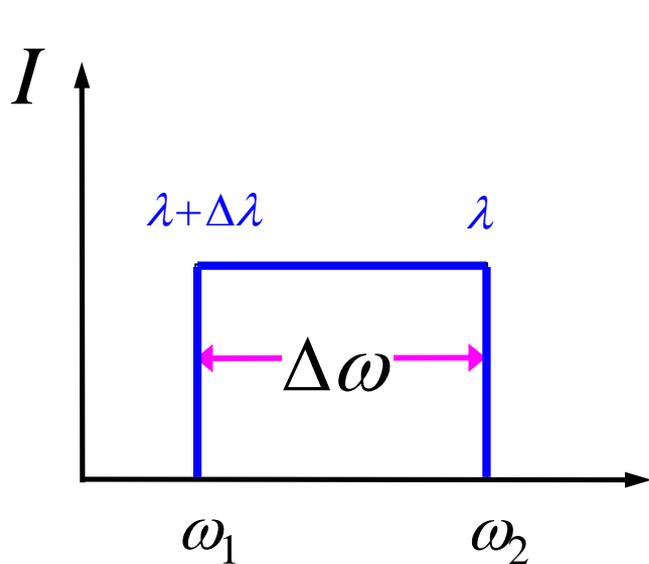
$\tau_{\text{КОГ}}$



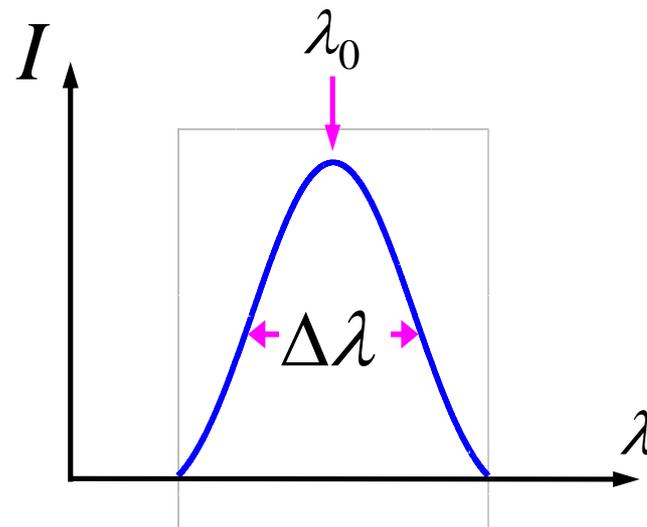
Степень когерентности

1) Временная когерентность

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



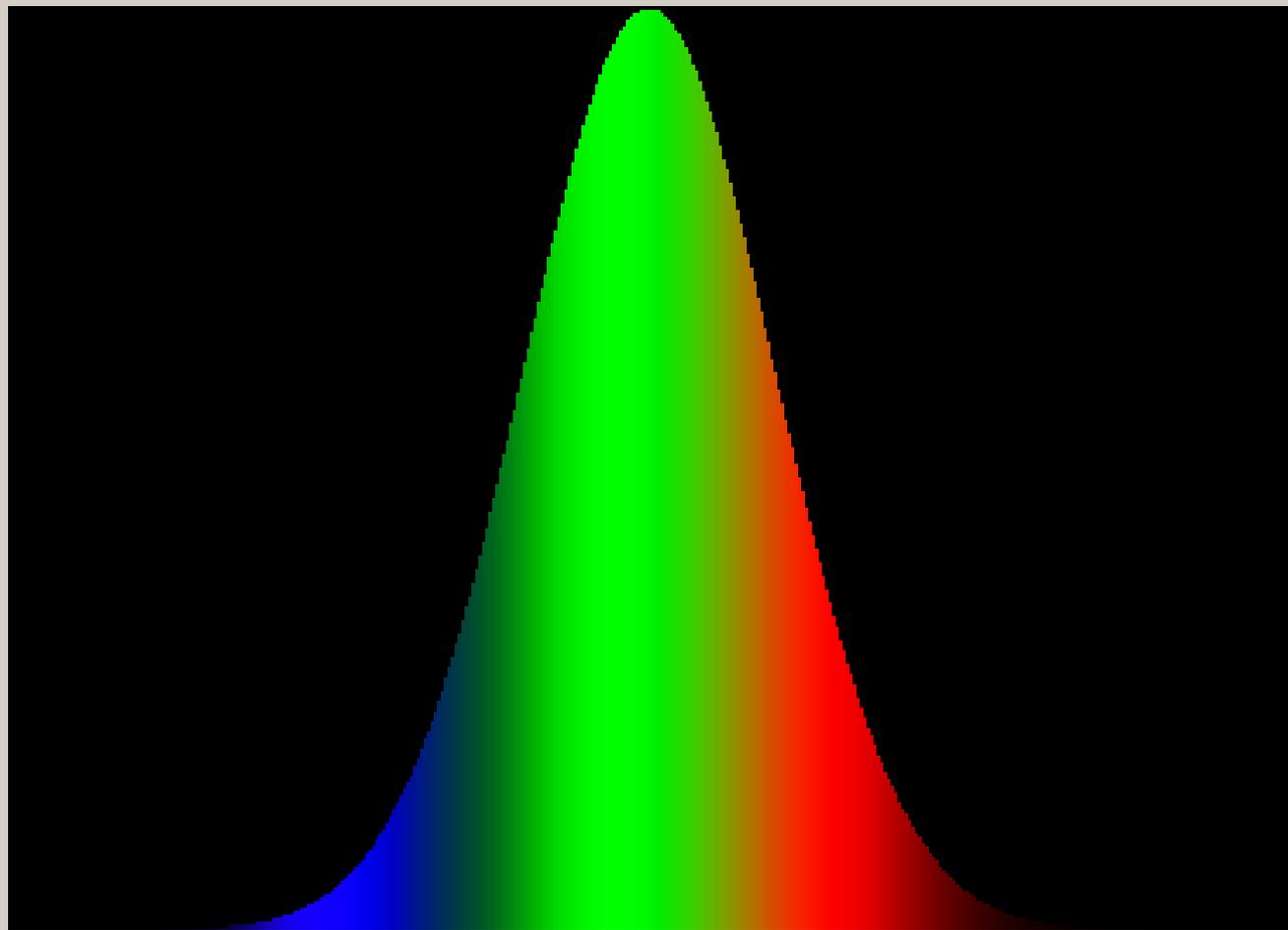
а



б

Спектр видимого света

Спектральная плотность



346

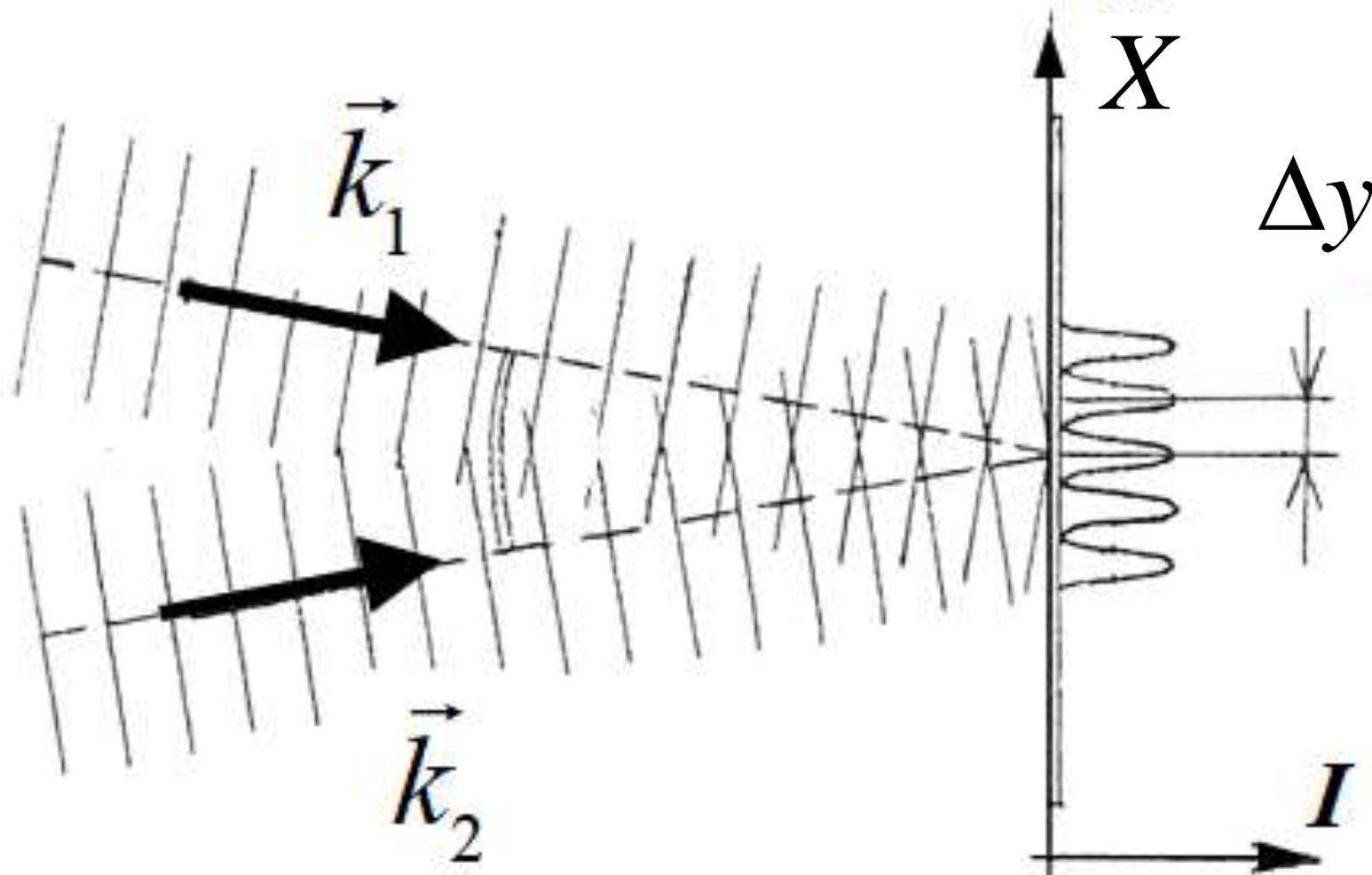
длина волны, нм

756

λ , нм

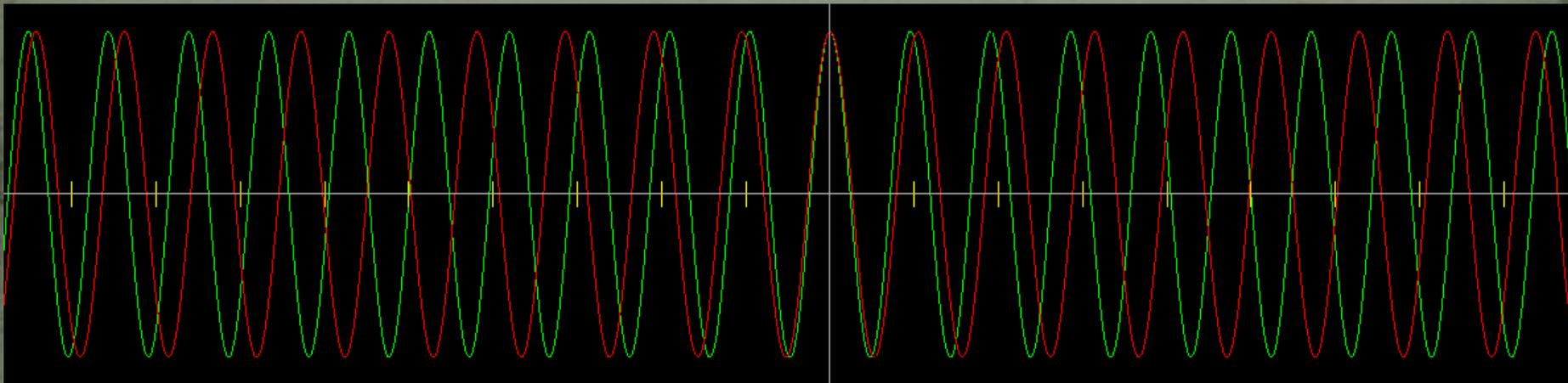
$$y_{\max} \approx \pm m \frac{l}{d} \lambda,$$

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



Наложение интерференционных картин на экране в схеме Юнга

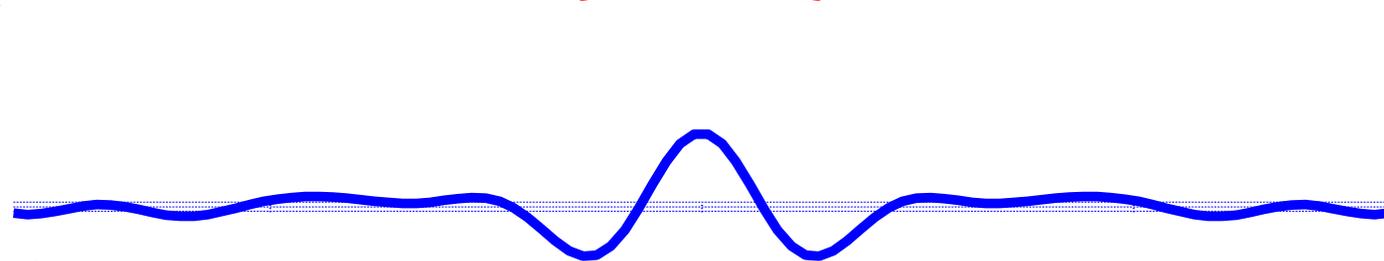
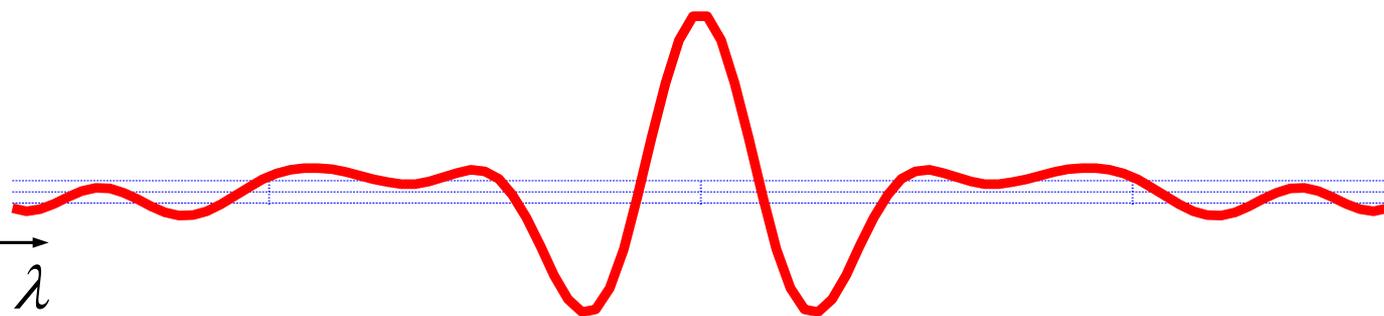
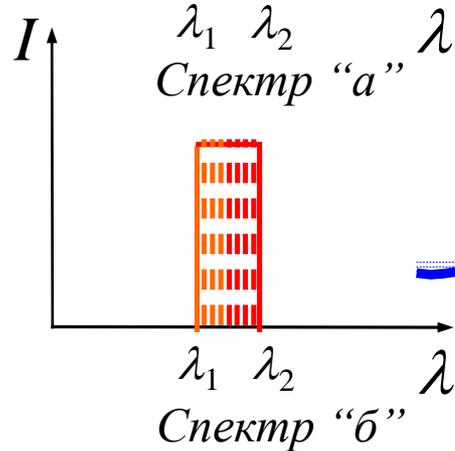
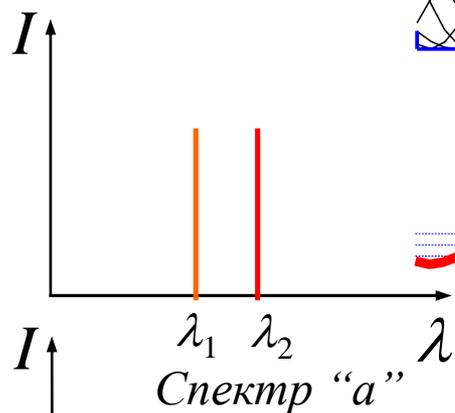
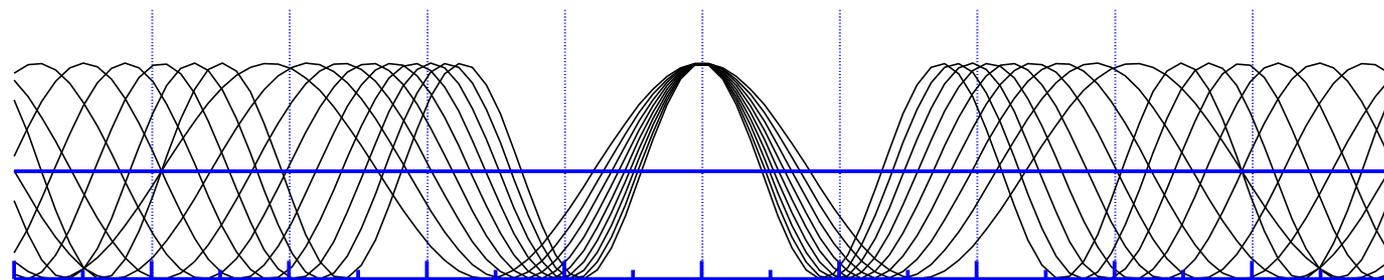
Центральный максимум



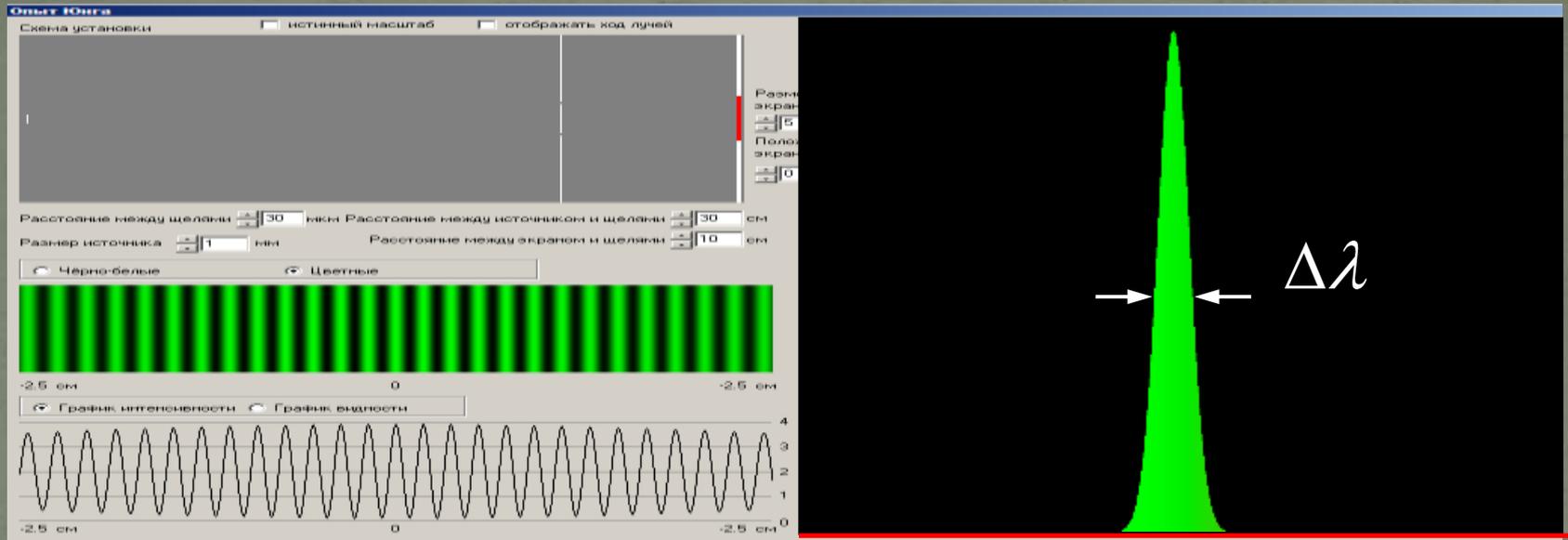
O

Временная и пространственная когерентность

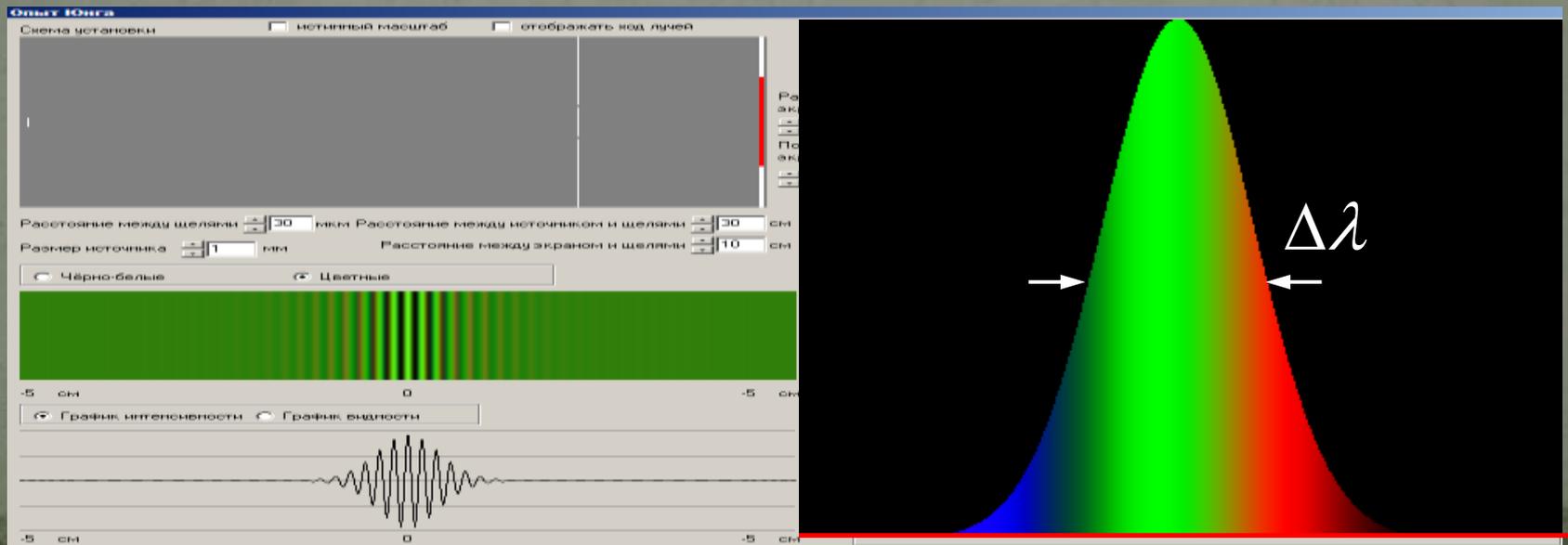
1) Немонохроматичность источника ($\Delta\lambda$)



Свет монохроматичен – хорошая «видность»



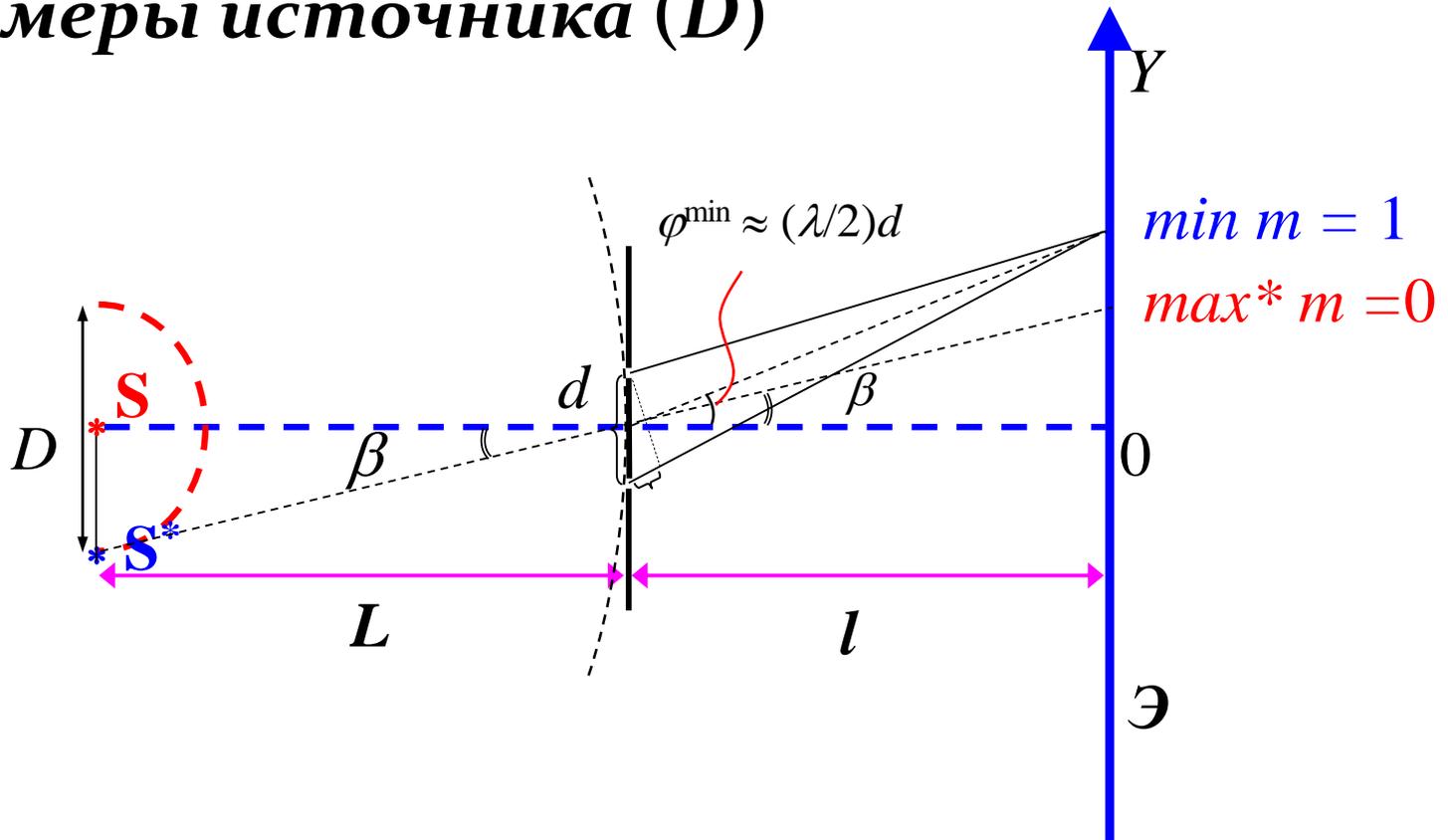
Широкий спектр – «видность» падает



Степень когерентности

2) Пространственная когерентность

Размеры источника (D)

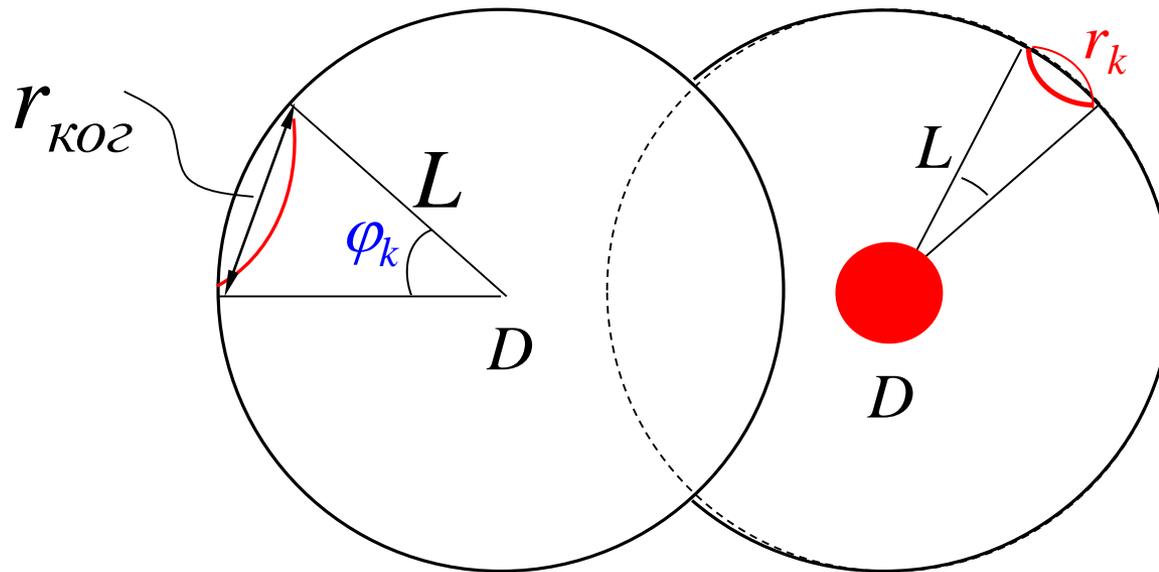


$$d, D \ll l, L!$$

Степень когерентности

2) Пространственная когерентность

Размеры источника (D)



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

или

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

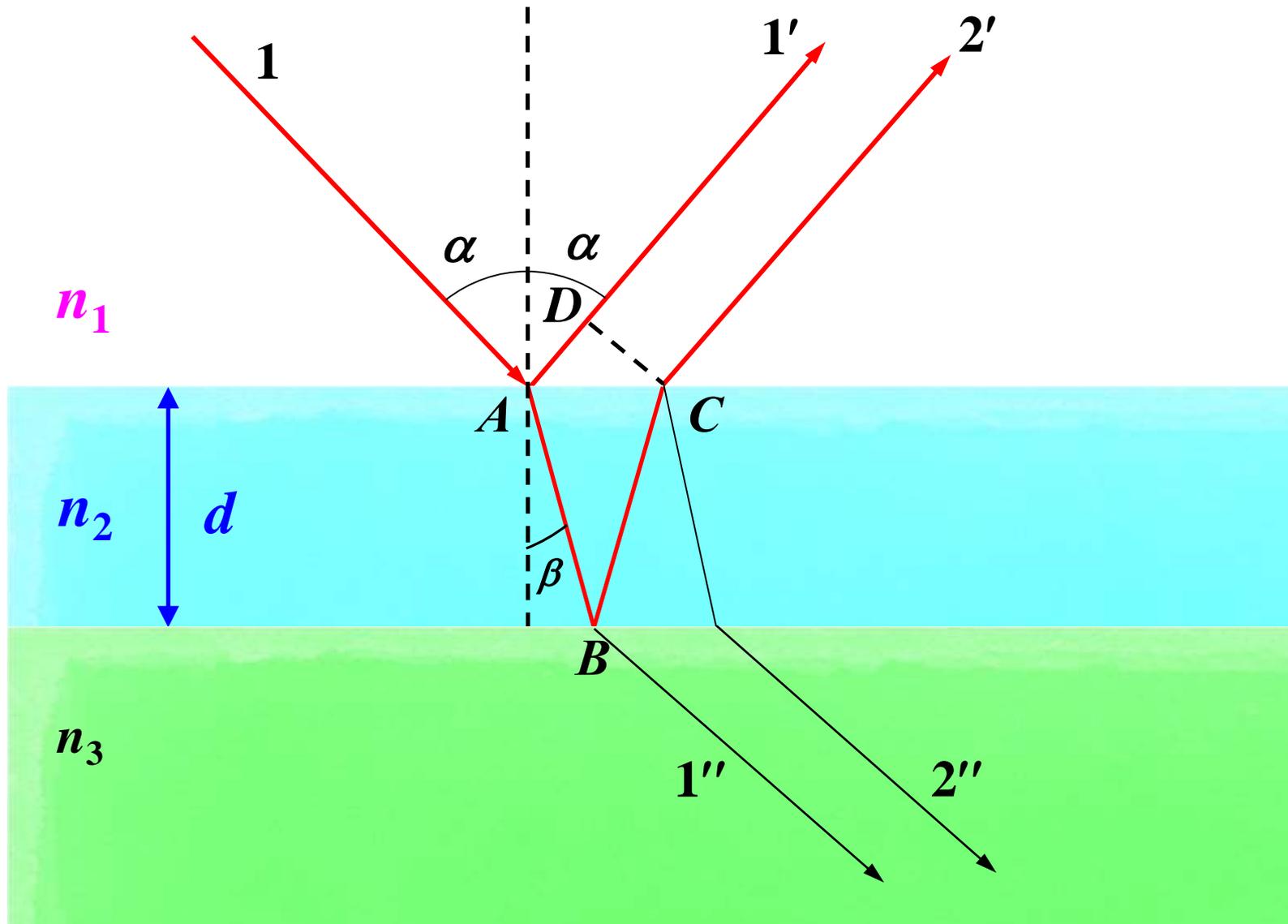
Интерференция в тонких плёнках

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

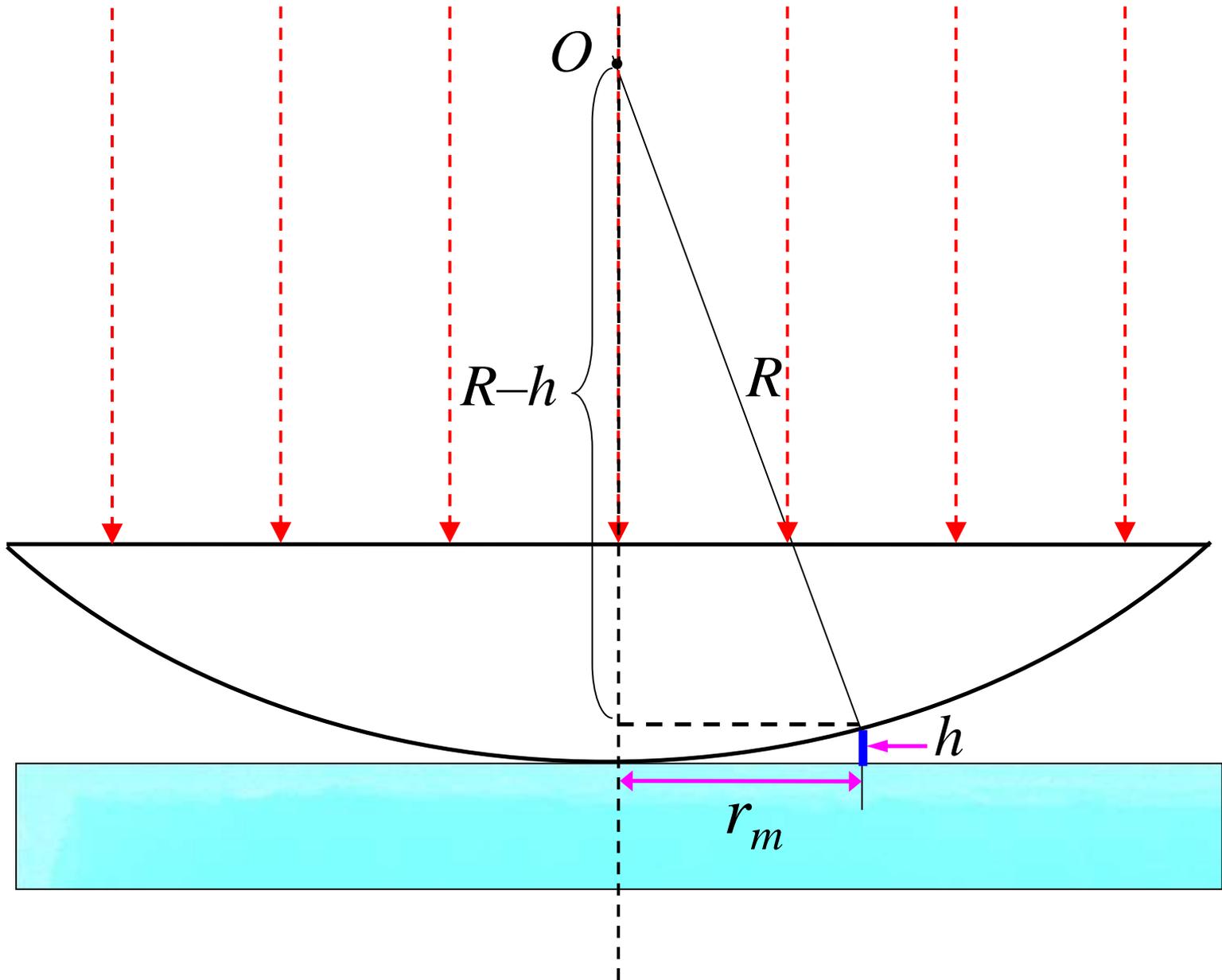
Марк Твен

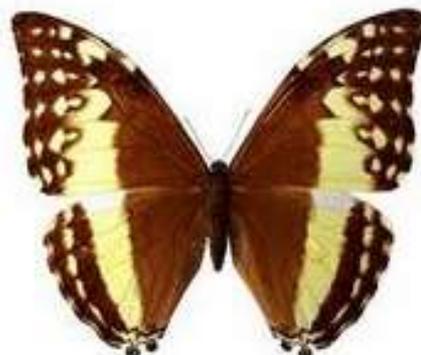
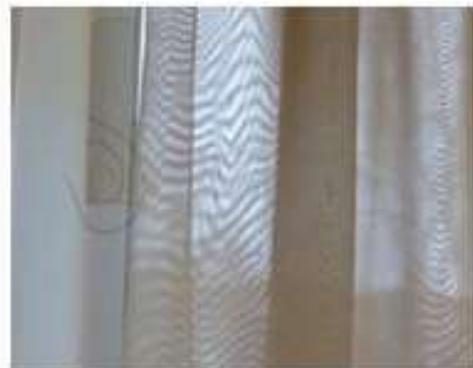


Интерференция в тонких плёнках



“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

Спектральная плотность

313 789
 длина волны, нм

Чёрно-белые Цветные

-22 см 0 -22 см

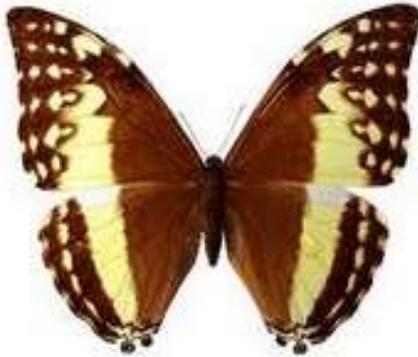
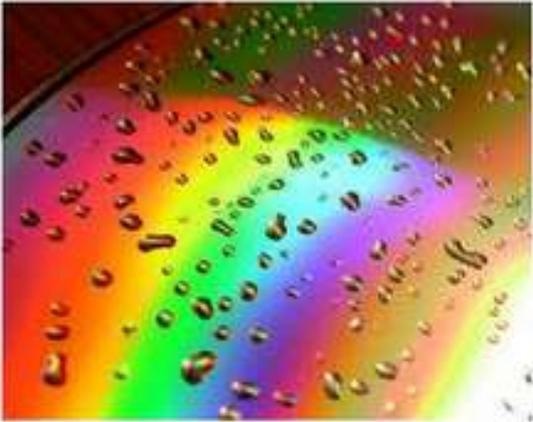
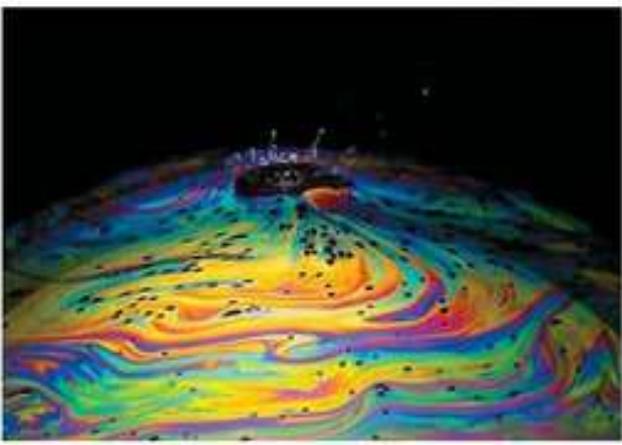
График интенсивности График видности

-22 см 0 -22 см

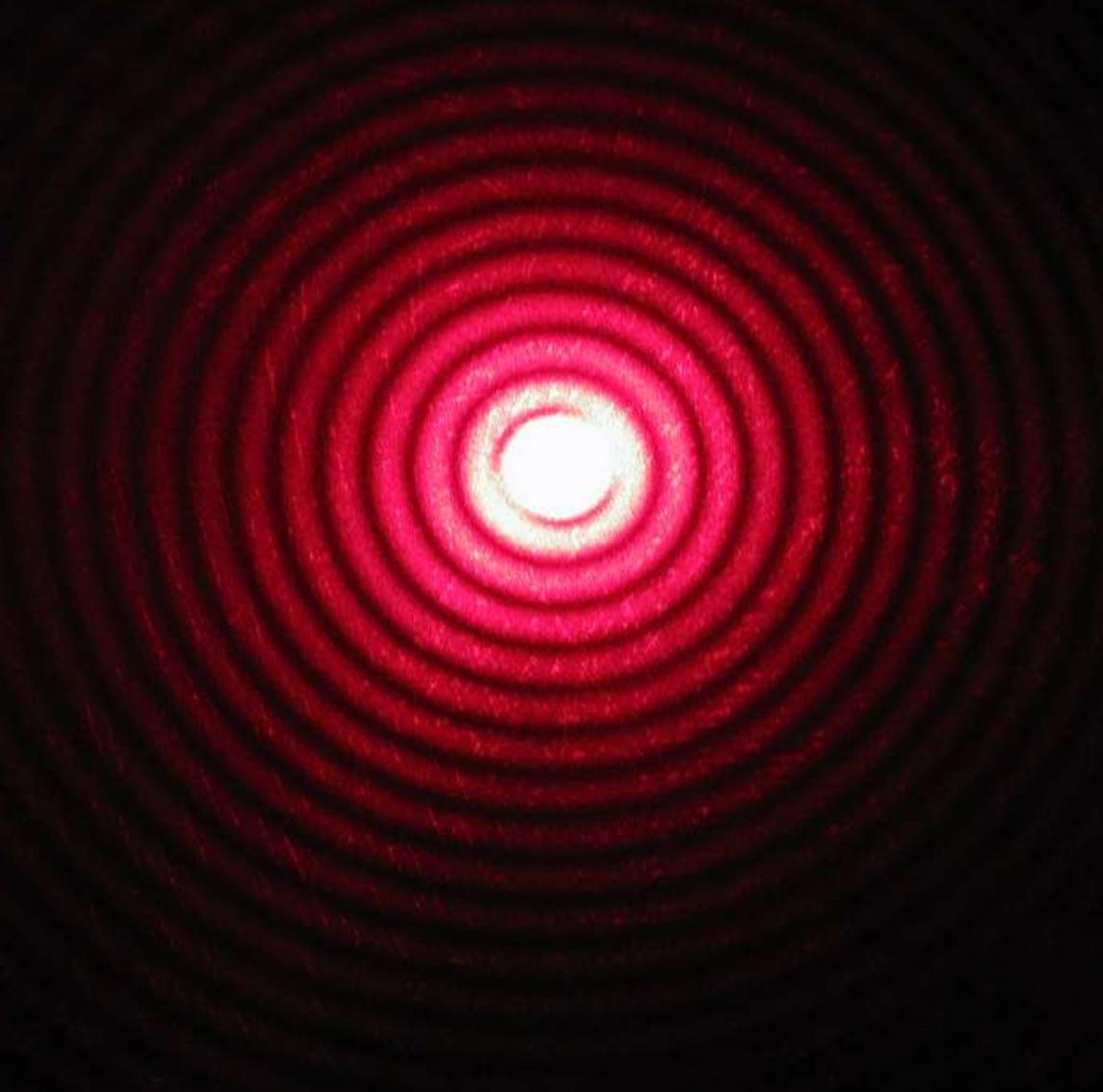
Число спектральных линий: 1

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 |



Лекции 10. Дифракция Френеля



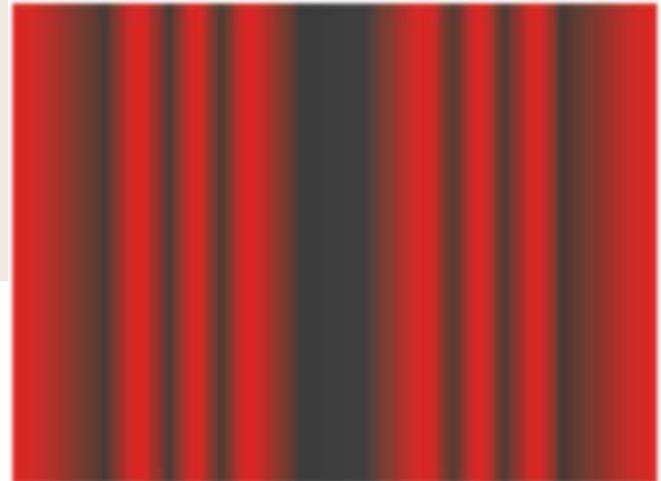
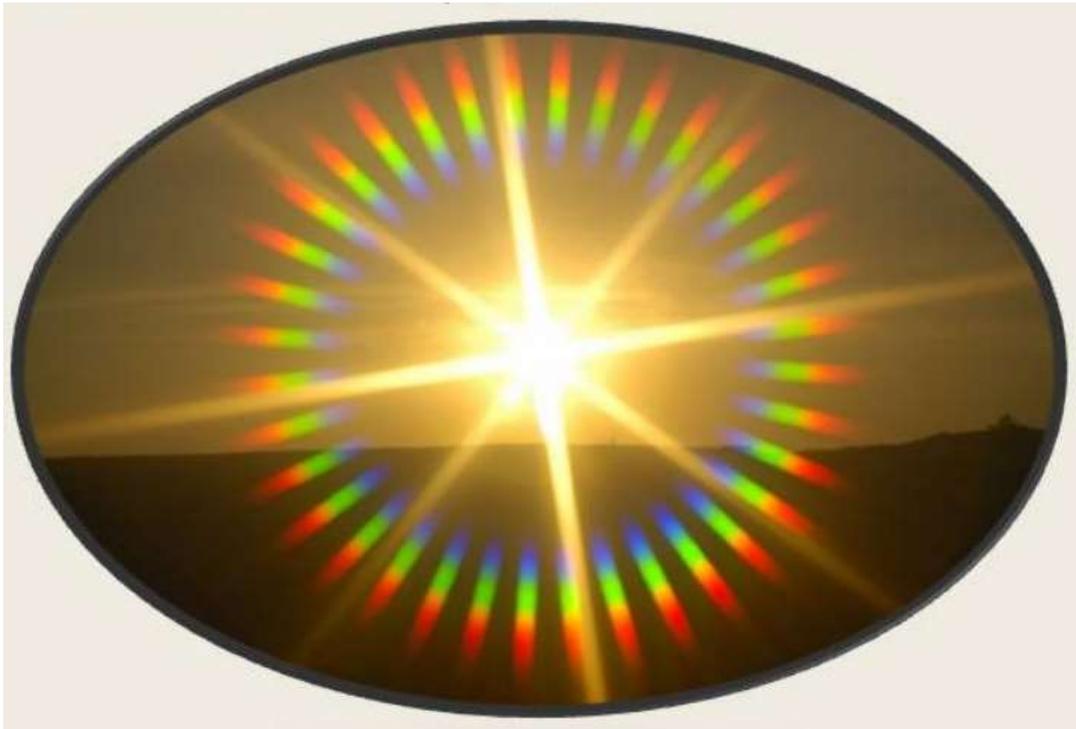
Дифракция волн



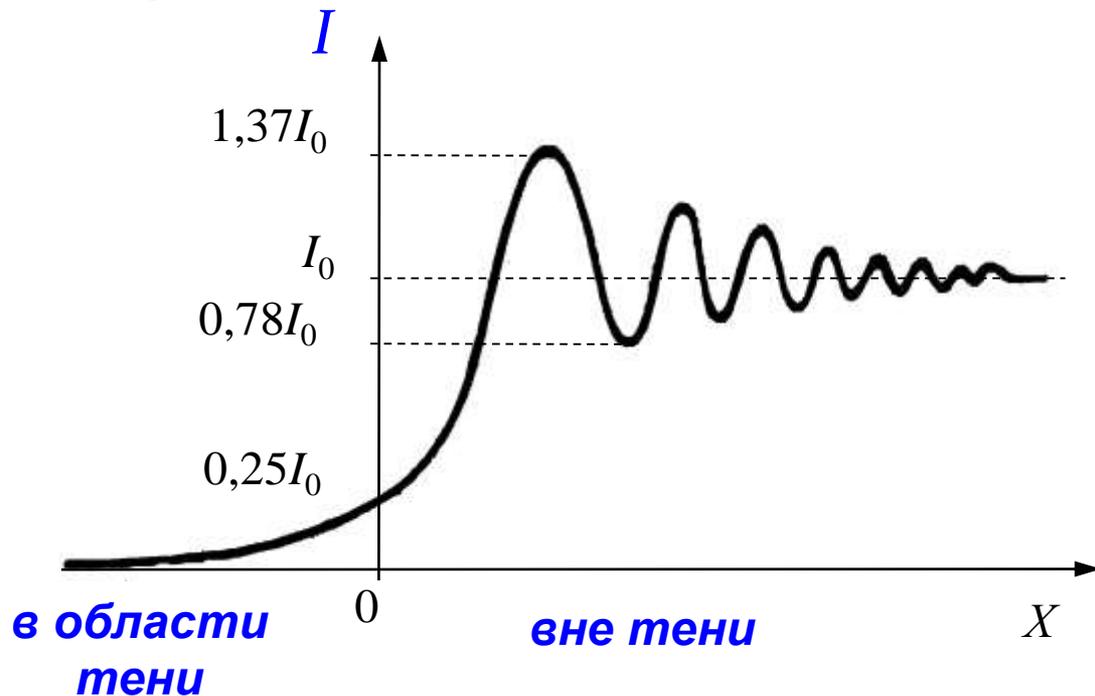
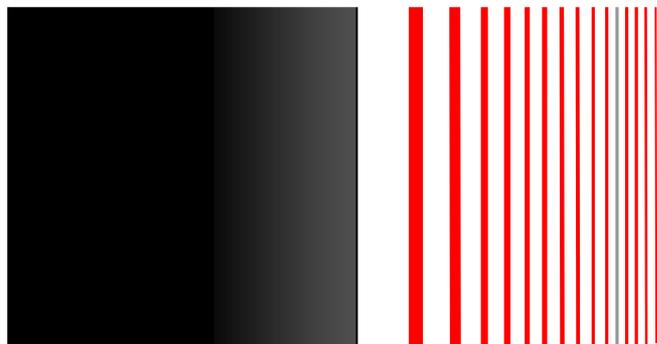
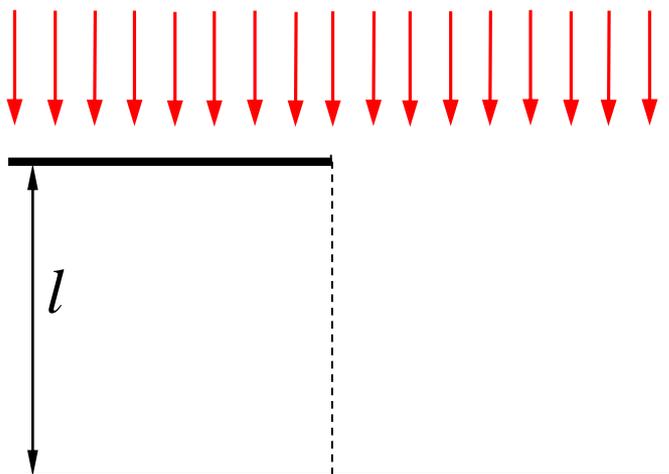
Дифракция



Дифракция света



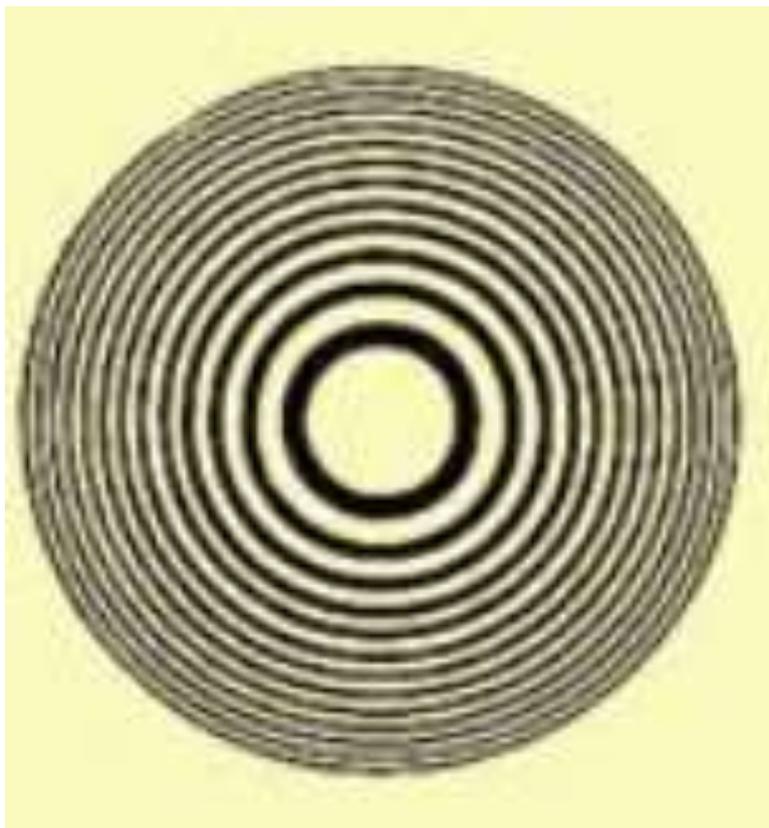
Дифракция Френеля на полуплоскости и щели



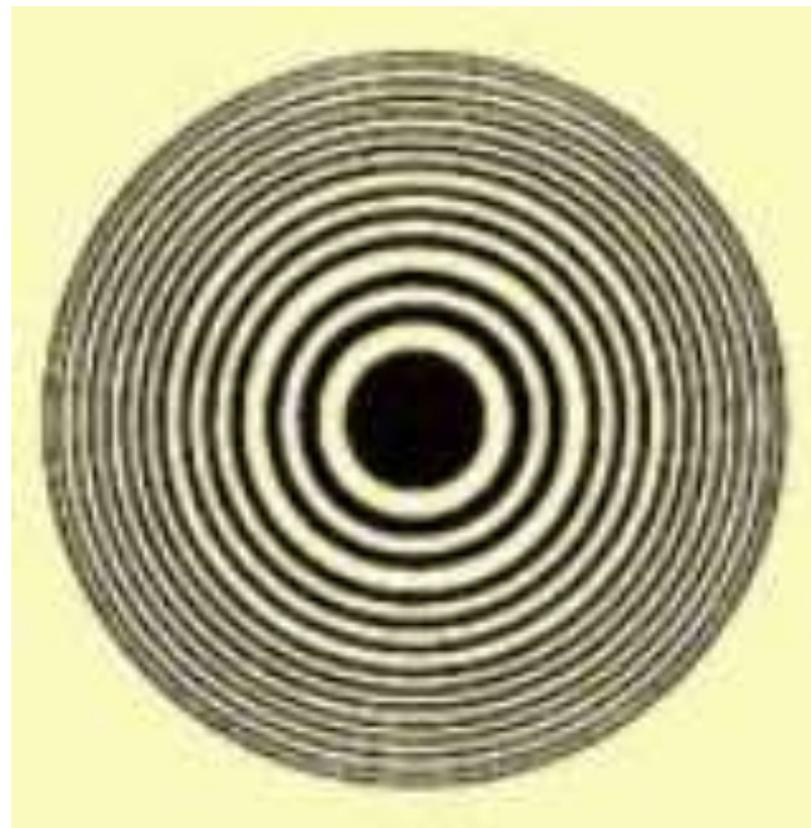
*Дифракция Френеля на
круглом отверстии*



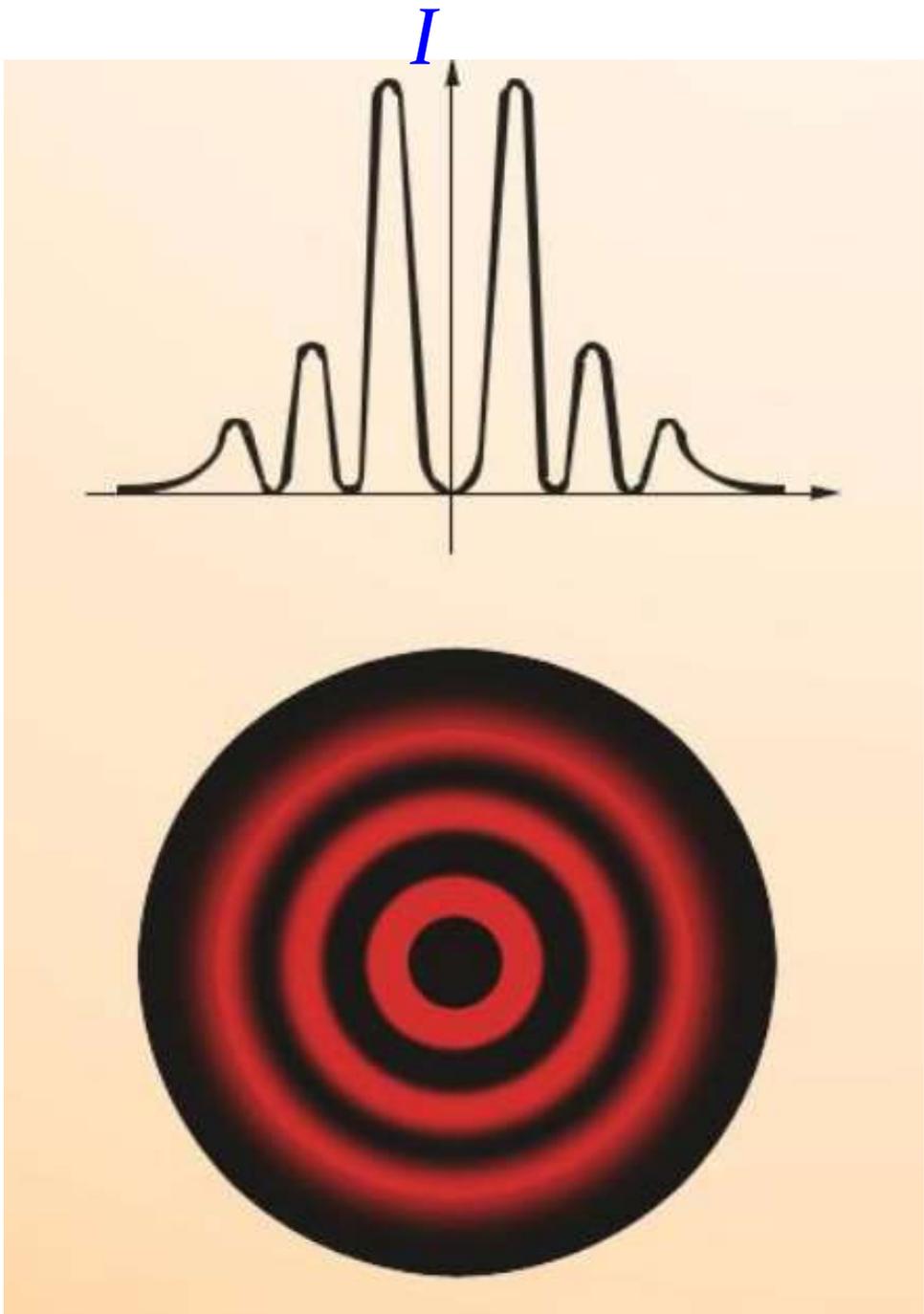
Дифракция на круглом отверстии – что видим ?



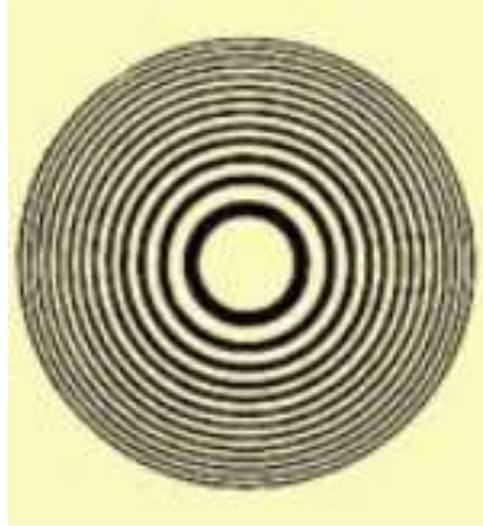
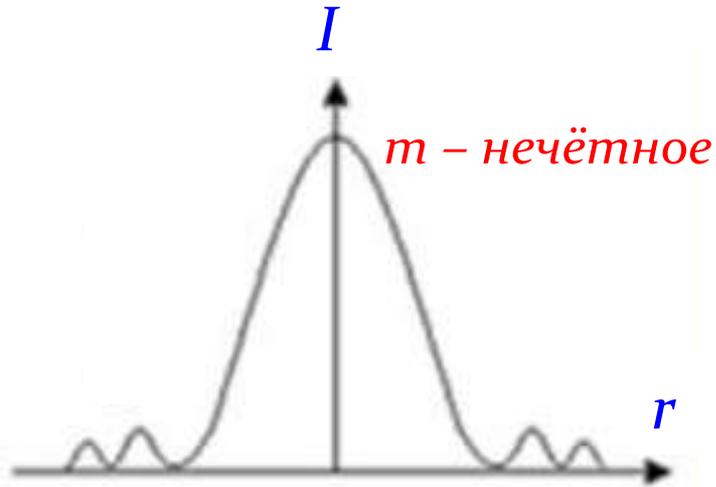
a



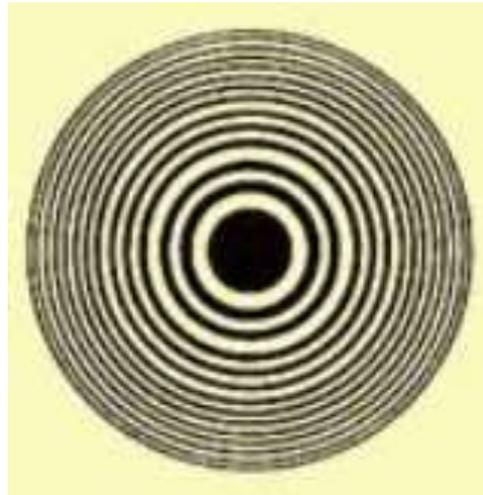
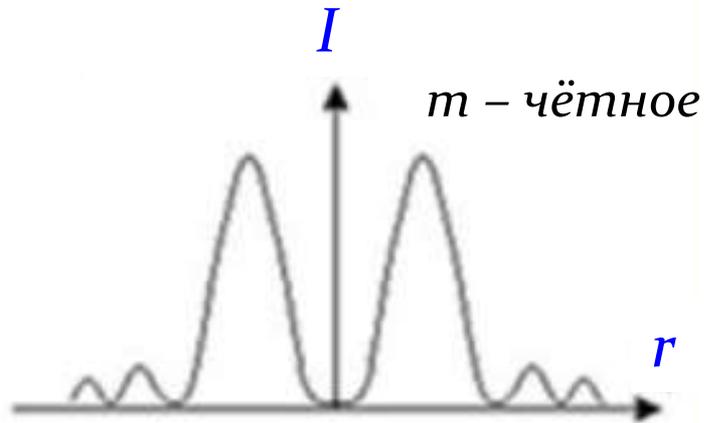
б



Дифракция на круглом отверстии



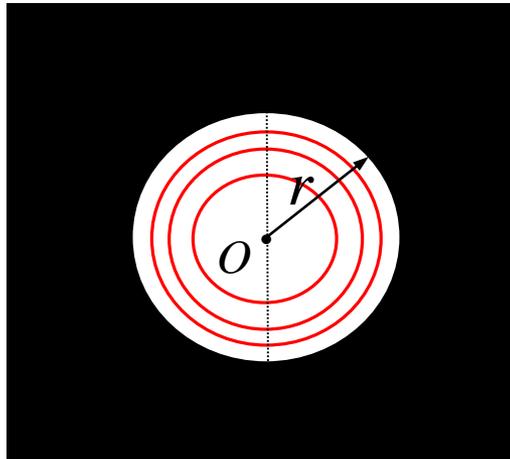
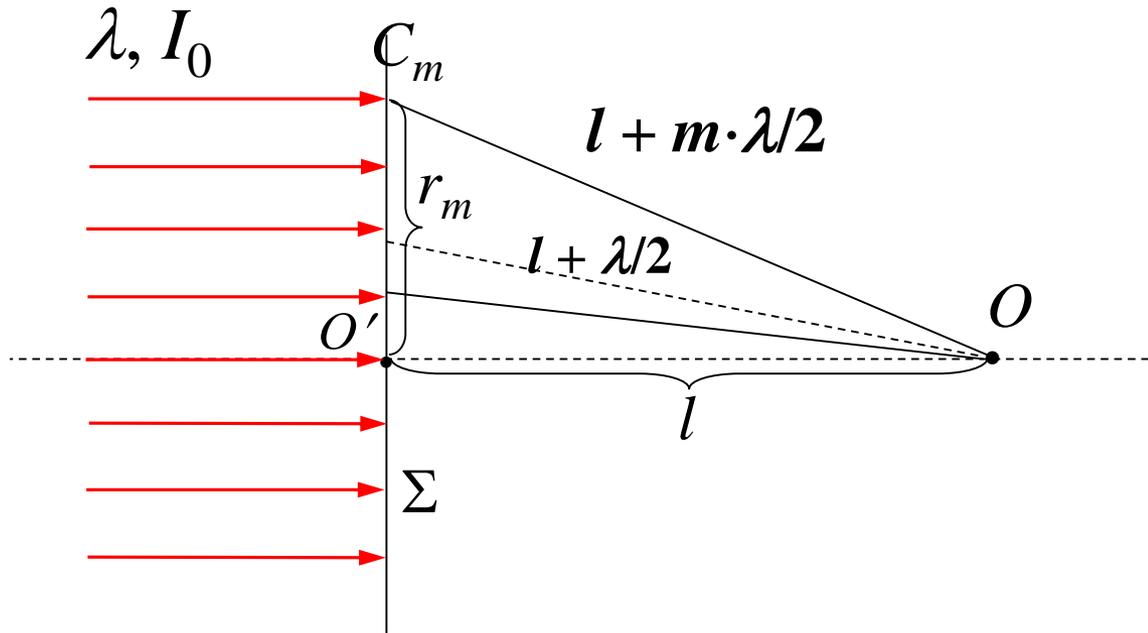
*В центре
максимум*



*В центре
минимум*

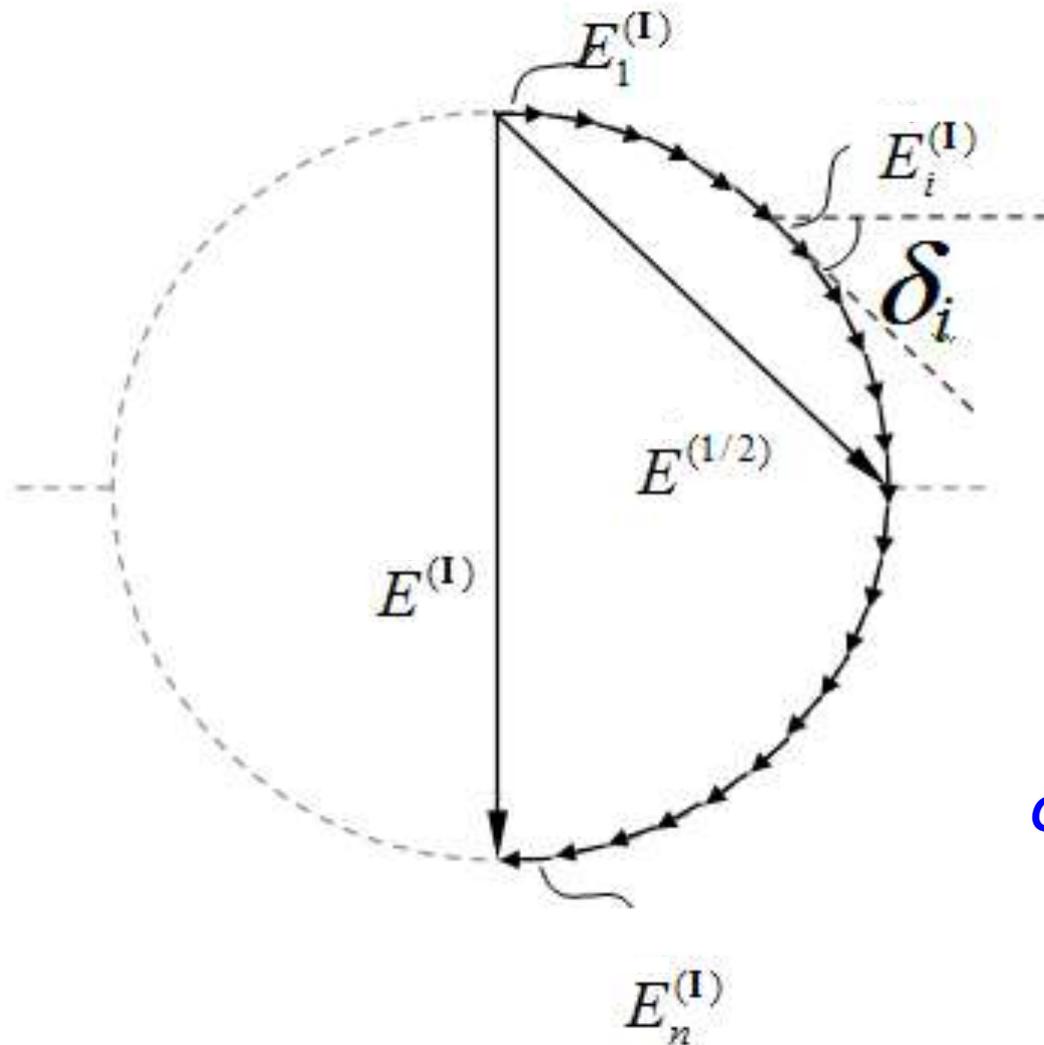
Дифракция на круглом отверстии

Вторичные источники и зоны Френеля



*Несколько первых зон
Френеля внутри
отверстия*

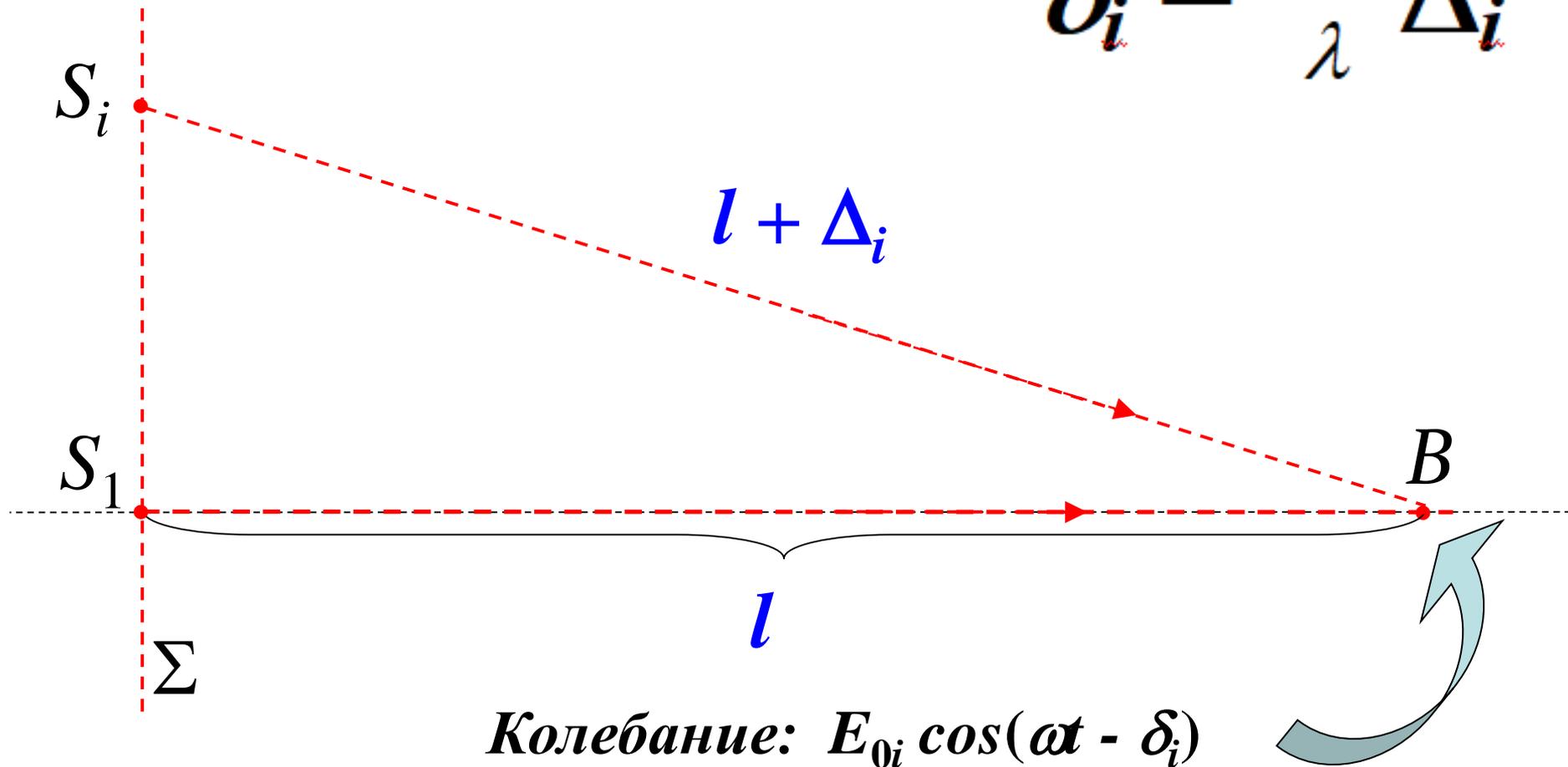
Векторные диаграммы колебаний для центра дифракционной картины



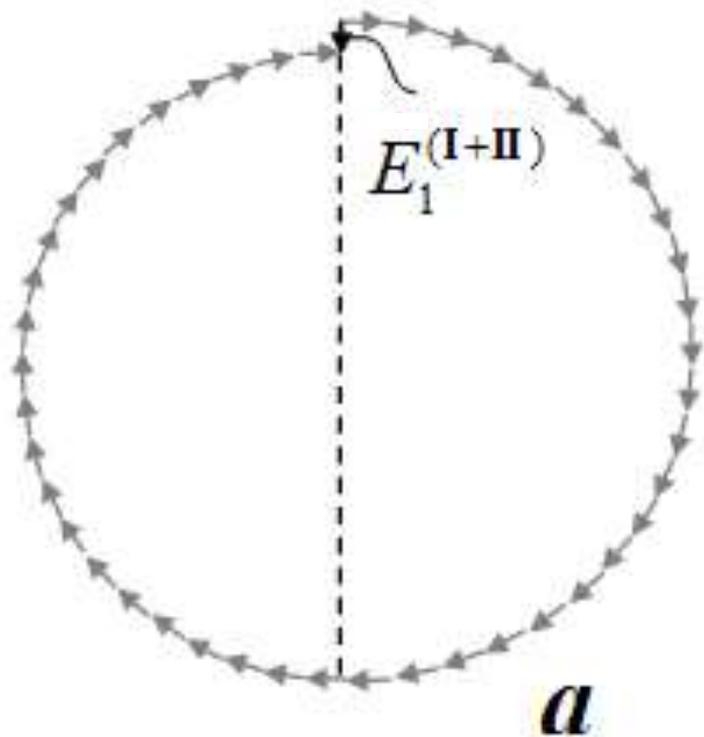
От источников
первой зоны
Френеля

К расчёту фазового запаздывания

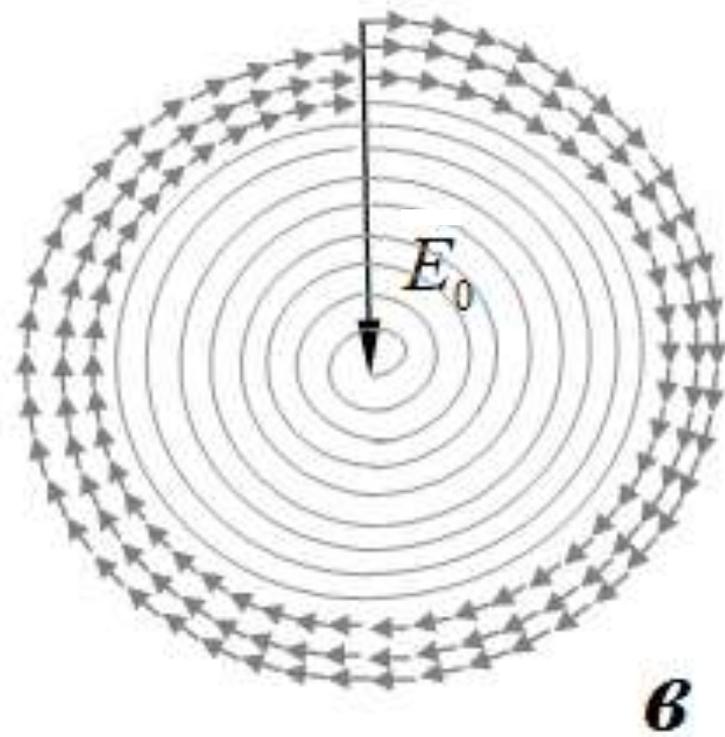
$$\delta_i = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta_i$$



Векторные диаграммы колебаний для центра дифракционной картины

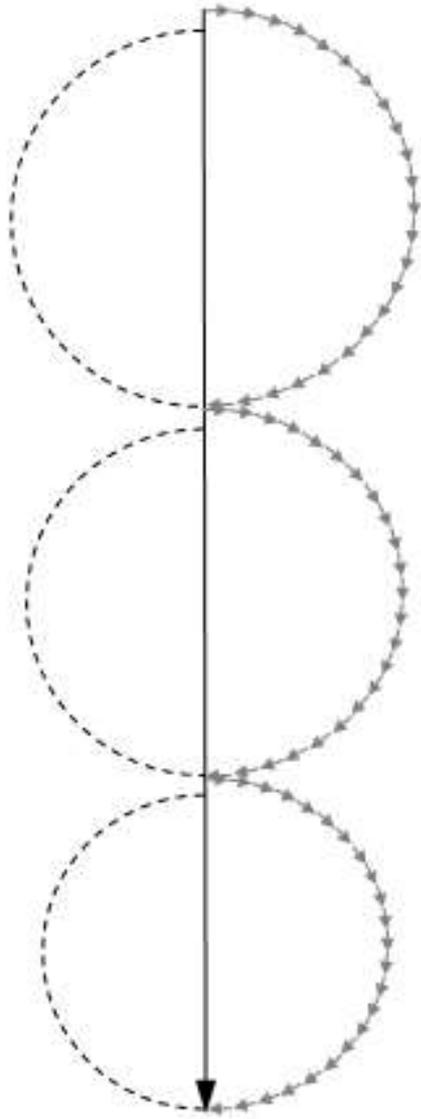


От источников первой и второй зоны Френеля



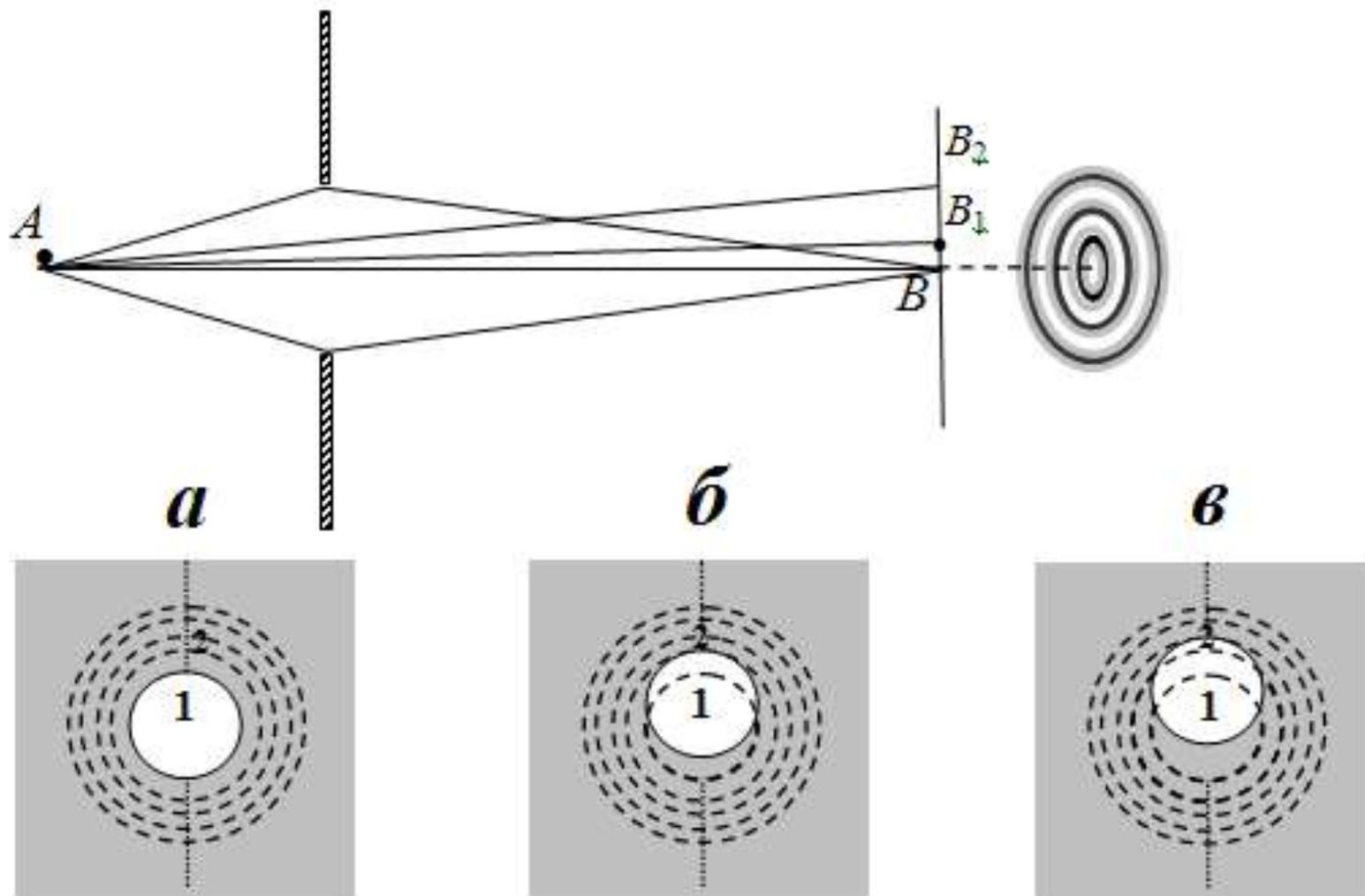
От источников всех зон Френеля

*Векторная диаграмма для амплитудной зонной
пластинки*



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

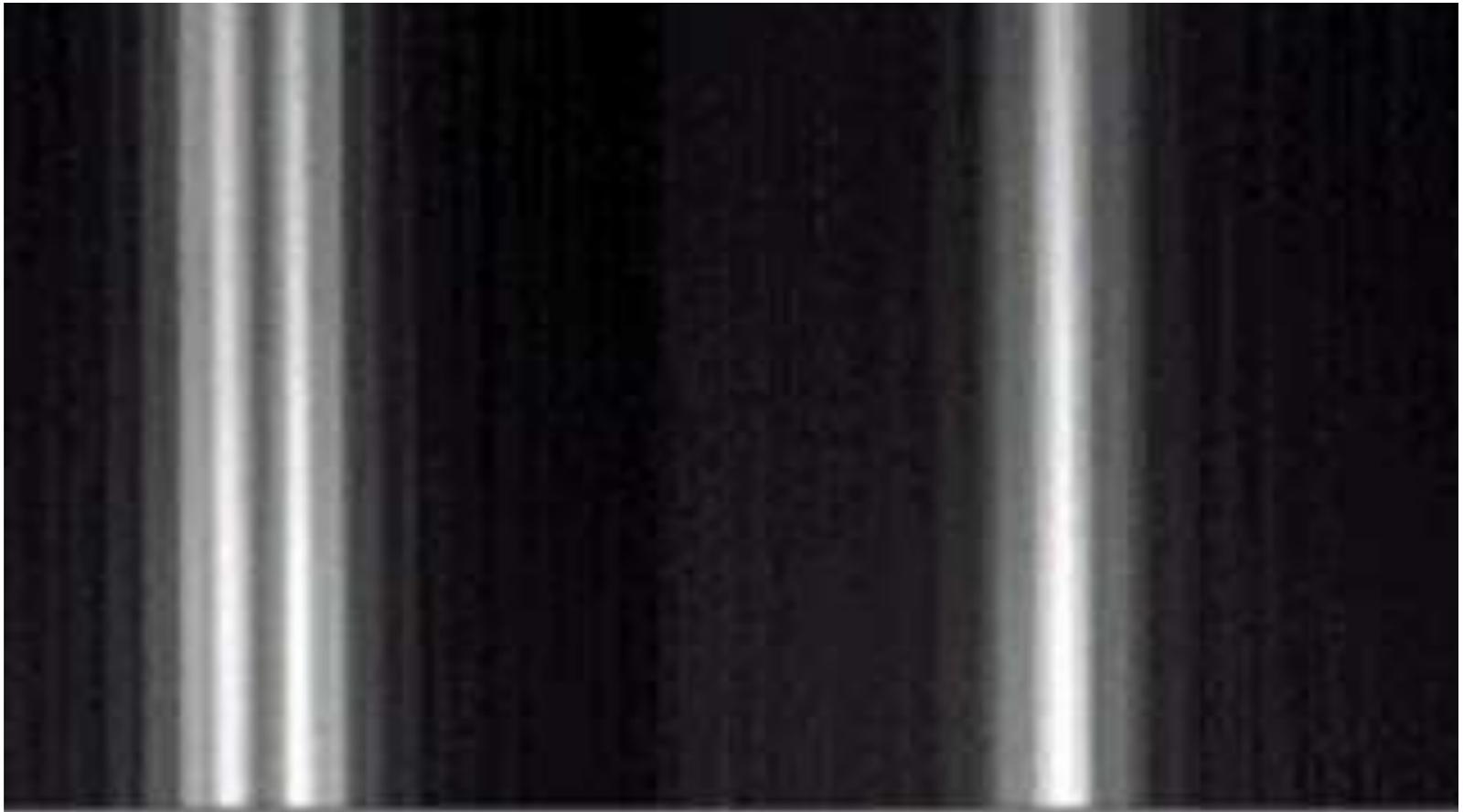
К объяснению формирования дифракционной картины



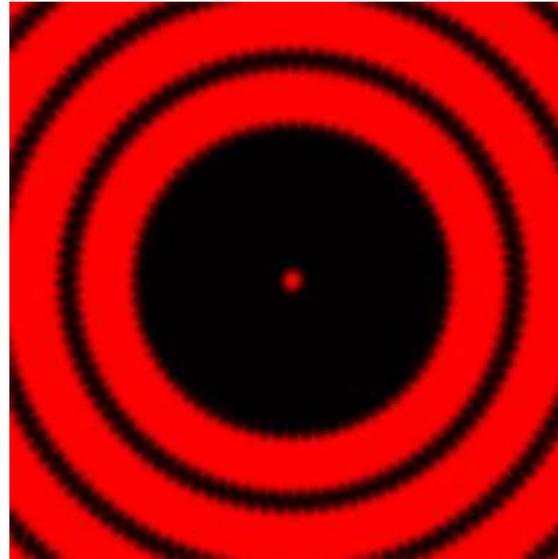
Дифракционная картина Френеля на щели

*В центре
минимум*

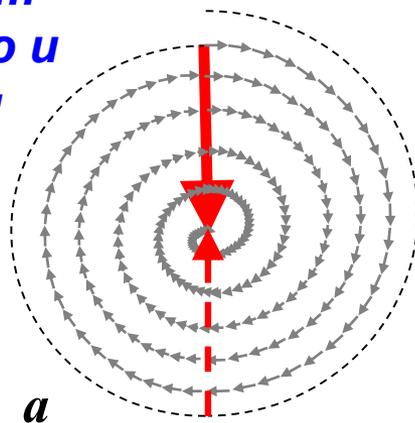
*В центре
максимум*



Дифракция на диске. Пятно Пуассона - Араго

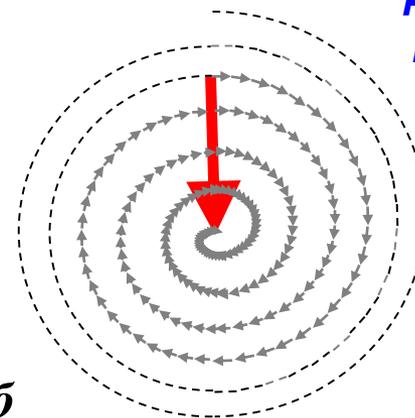


Диск закрывает
первую / первую и
вторую зоны
Френеля



a

Диск закрывает
первые четыре
зоны Френеля

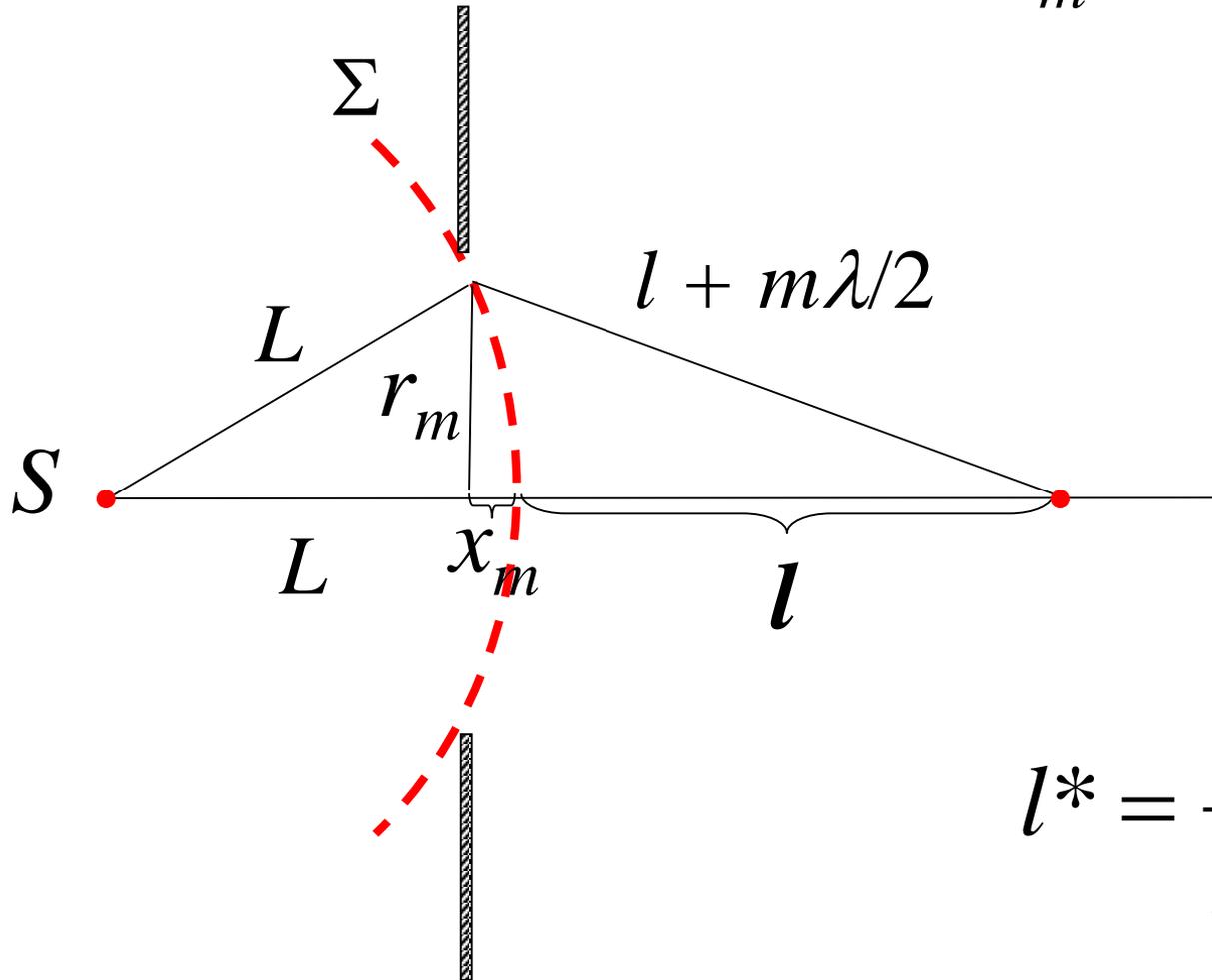


б

Точечный источник, сферическая волна

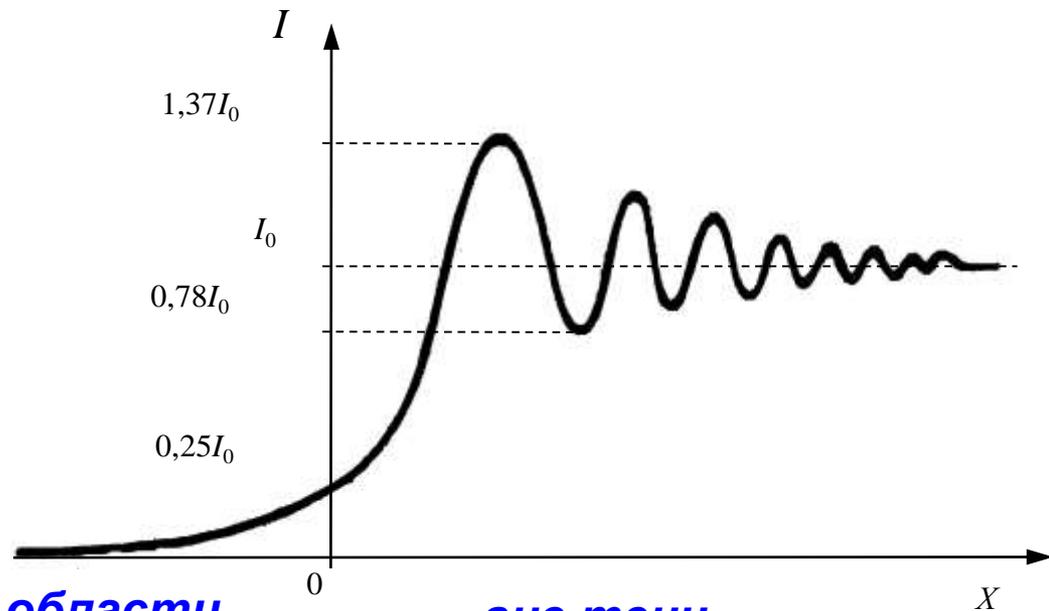
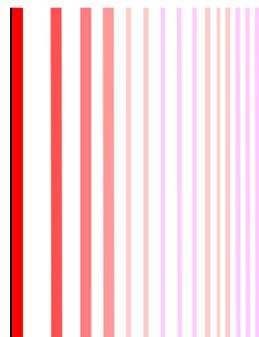
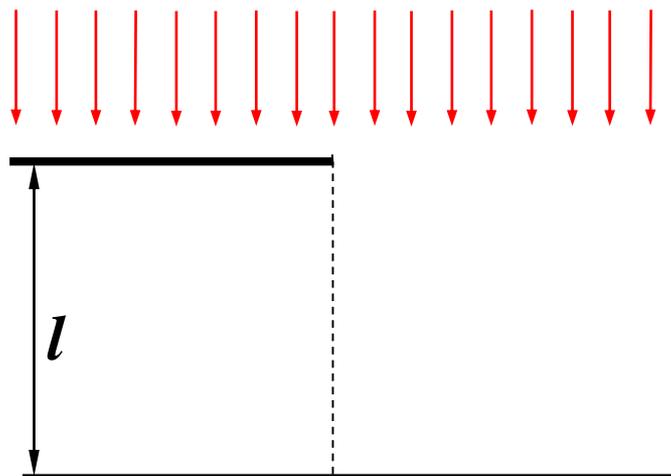
Радиусы зон Френеля

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



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

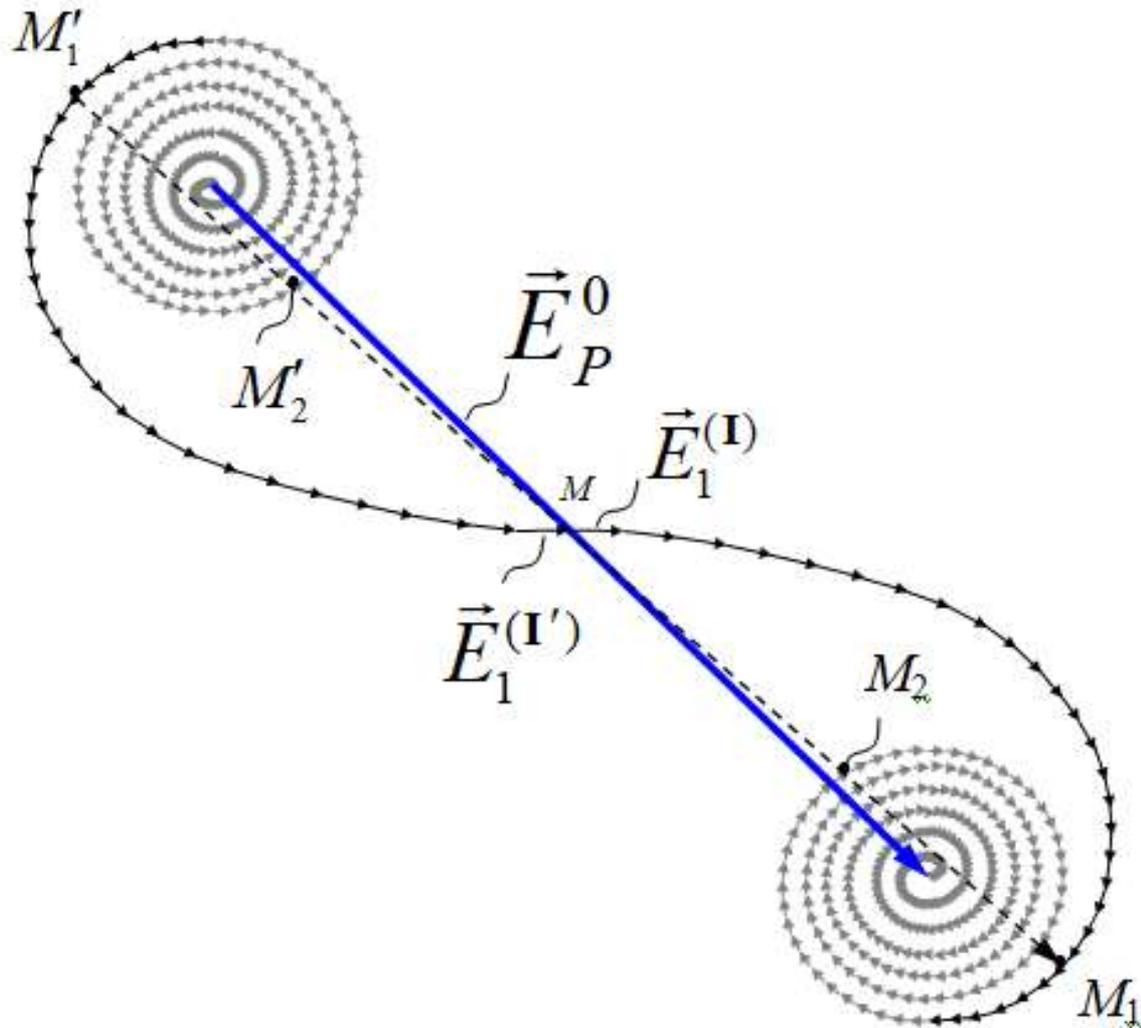
Дифракция Френеля на полуплоскости и щели



в области тени

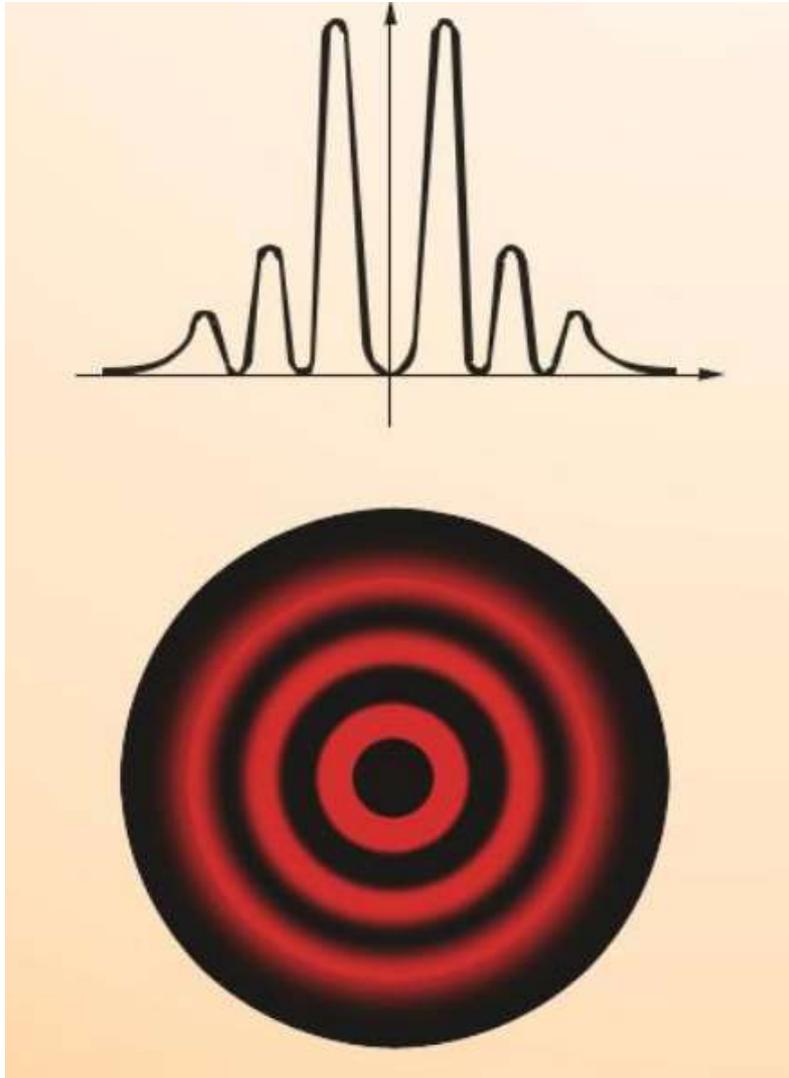
вне тени

Спираль Корню



** см. стр. 97 - 104

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

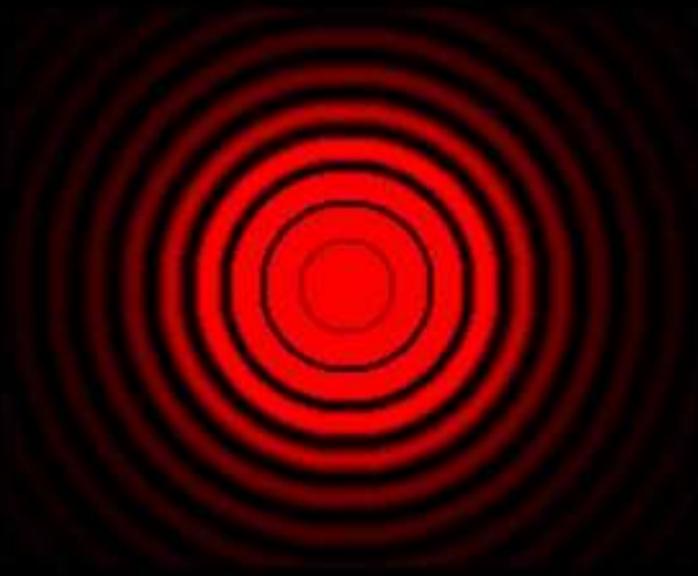


Круглое отверстие



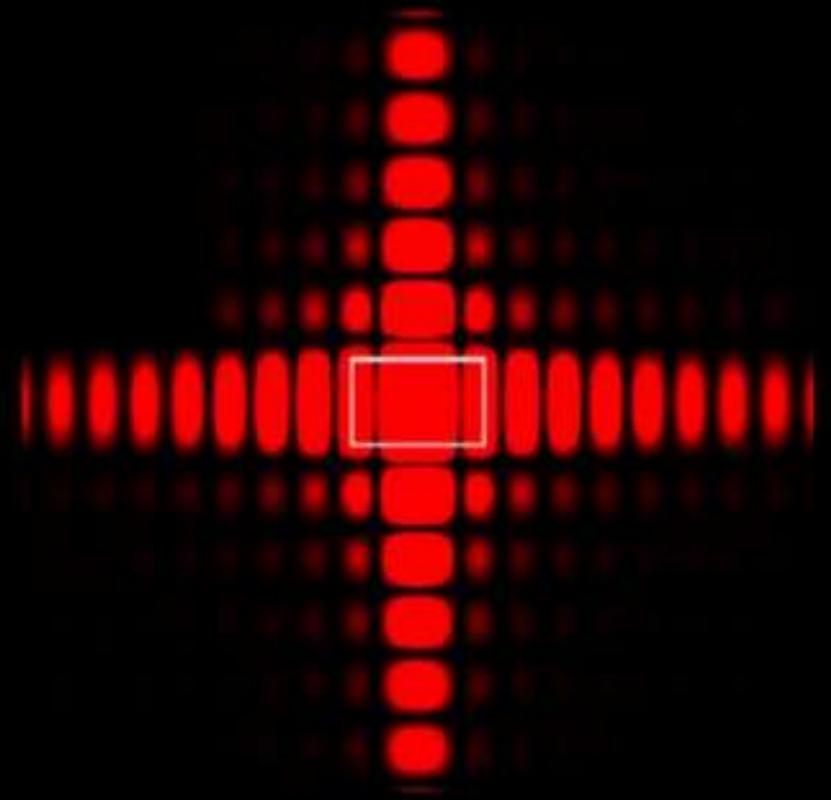
горизонтальная щель

Лекция 11. Дифракция Фраунгофера



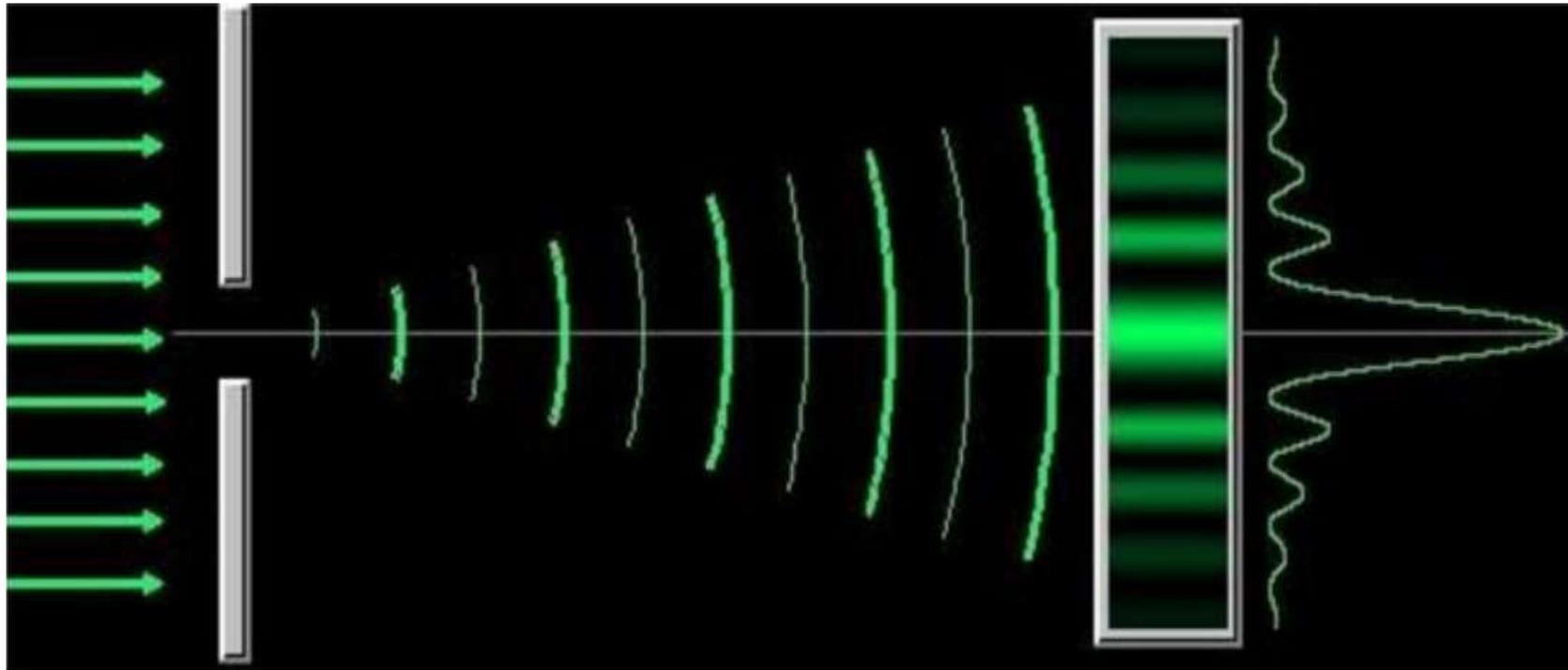
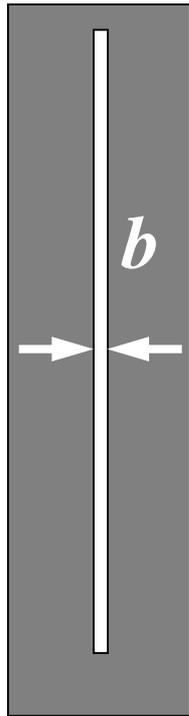
Круглое
отверстие

Прямоугольное
отверстие



Дифракция Фраунгофера на щели

Щель

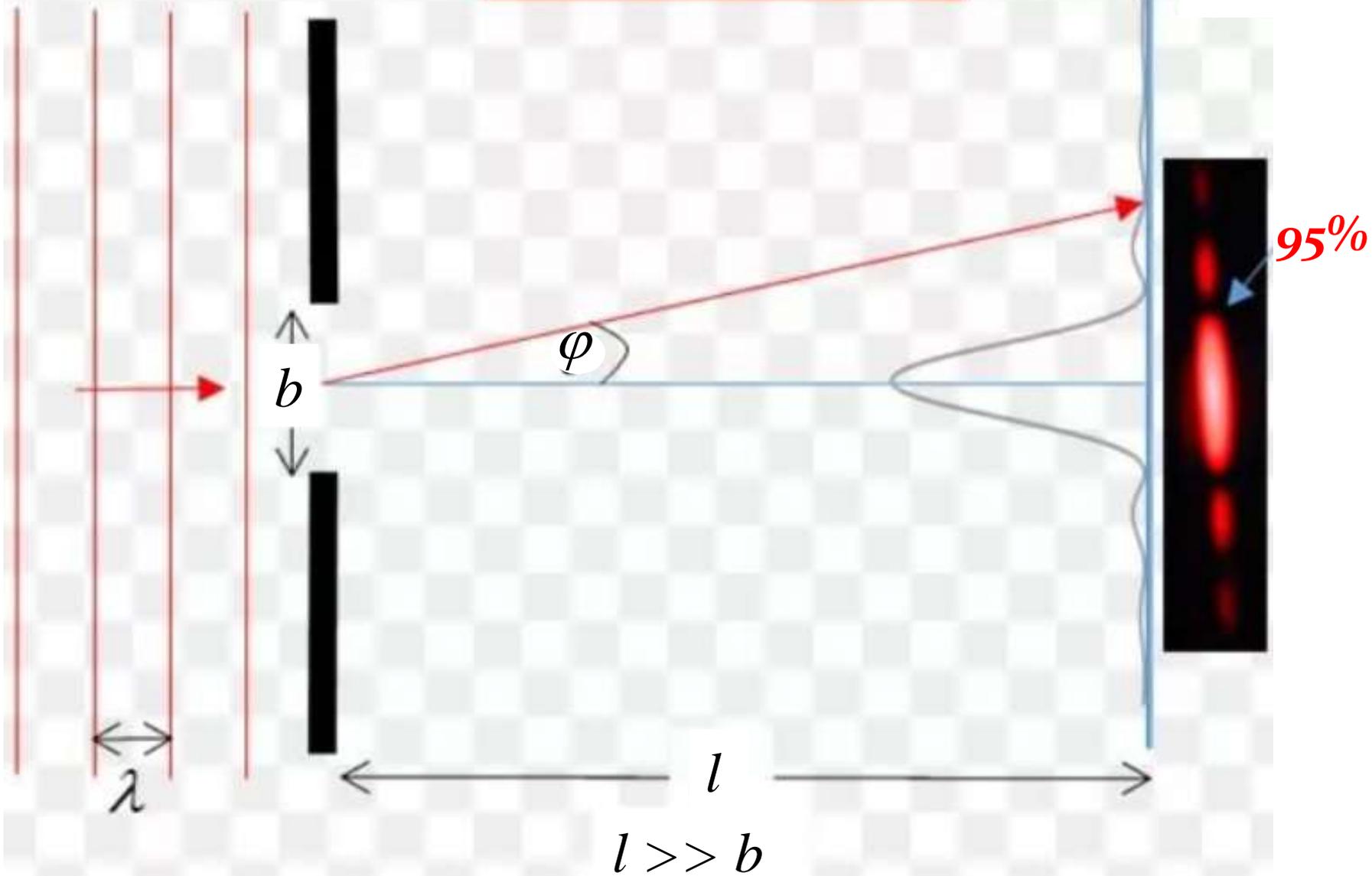


Центральный максимум: $\approx 95\%$ энергии



incident plane wave

Fraunhofer Diffraction



Дифракция Фраунгофера

Центральный максимум



Распределение интенсивности

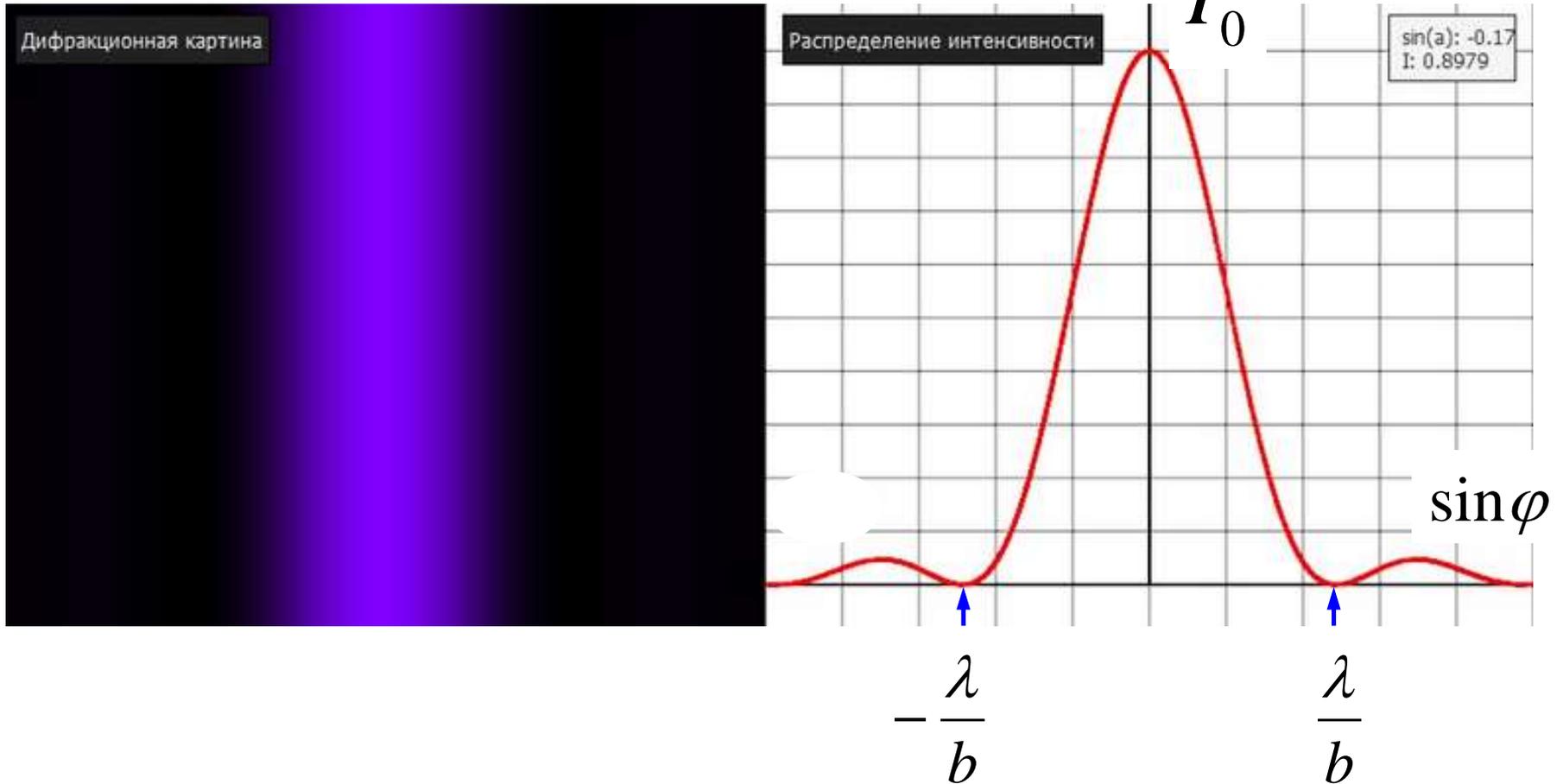
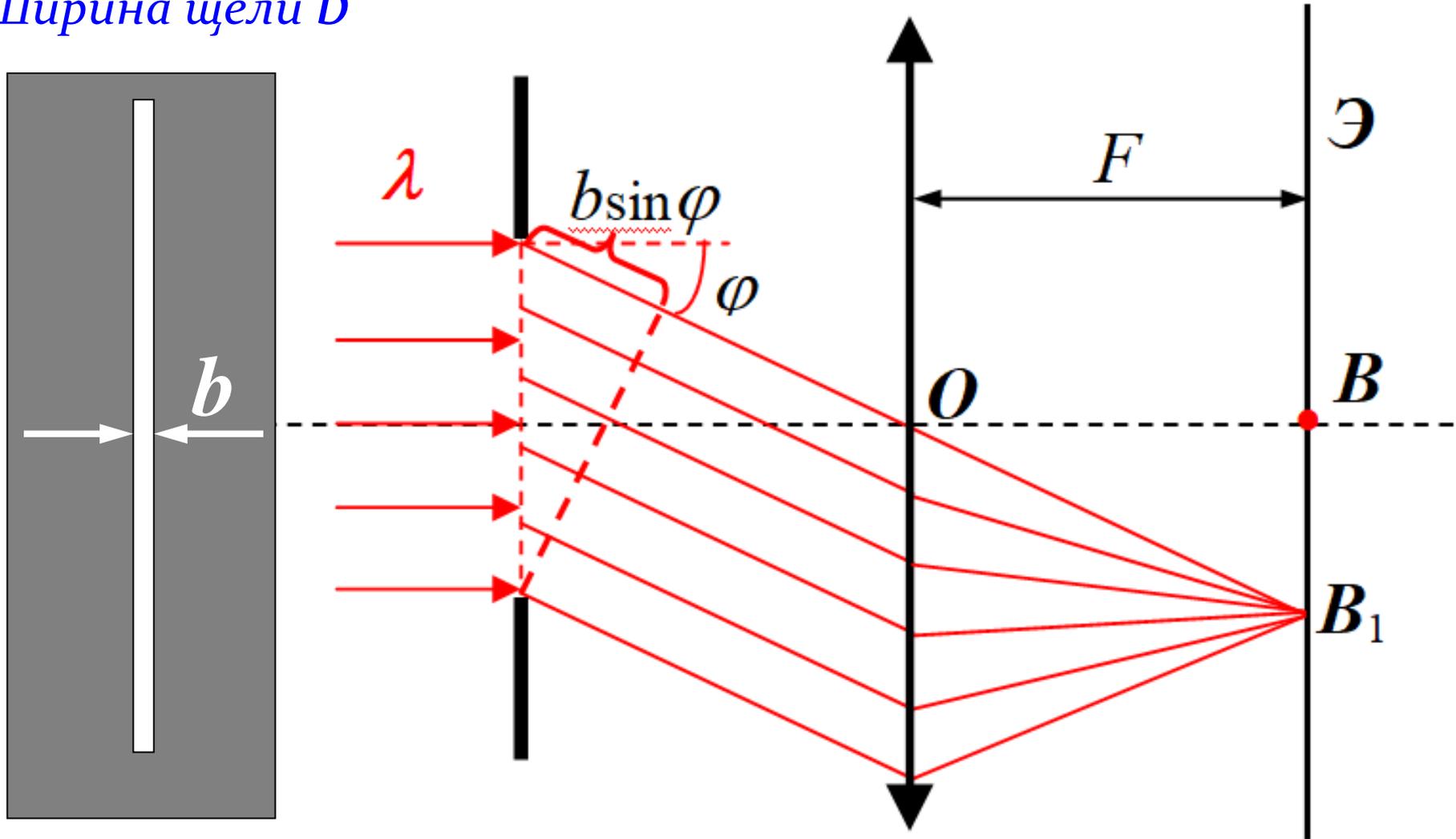


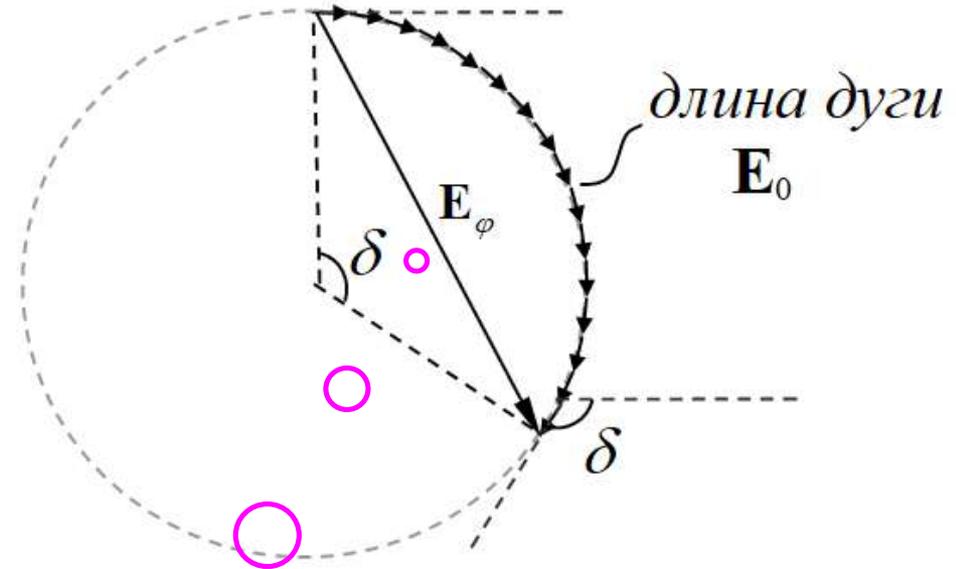
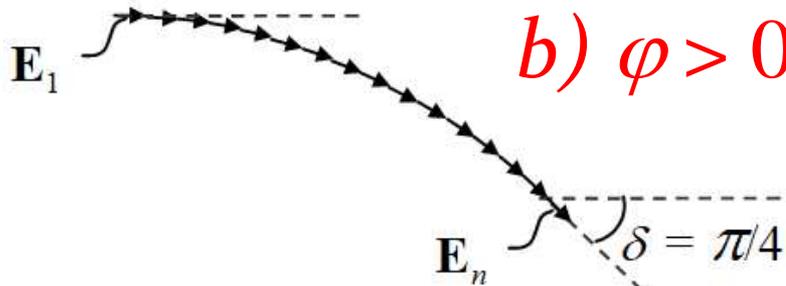
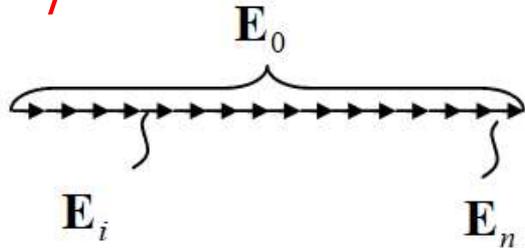
Схема наблюдения

Ширина щели b

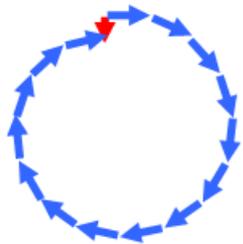


Векторные диаграммы

a) $\varphi = 0$



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



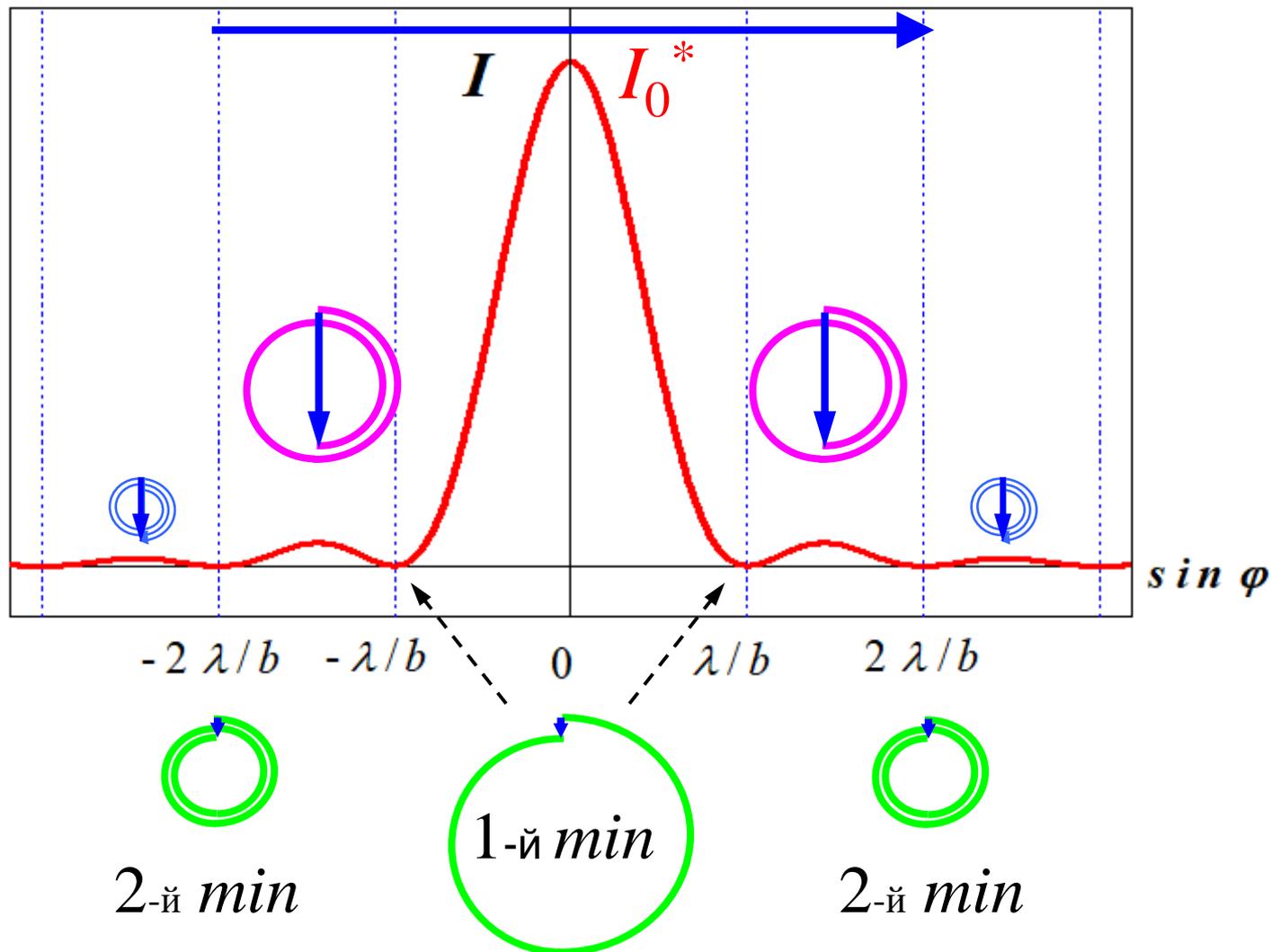
первый минимум

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

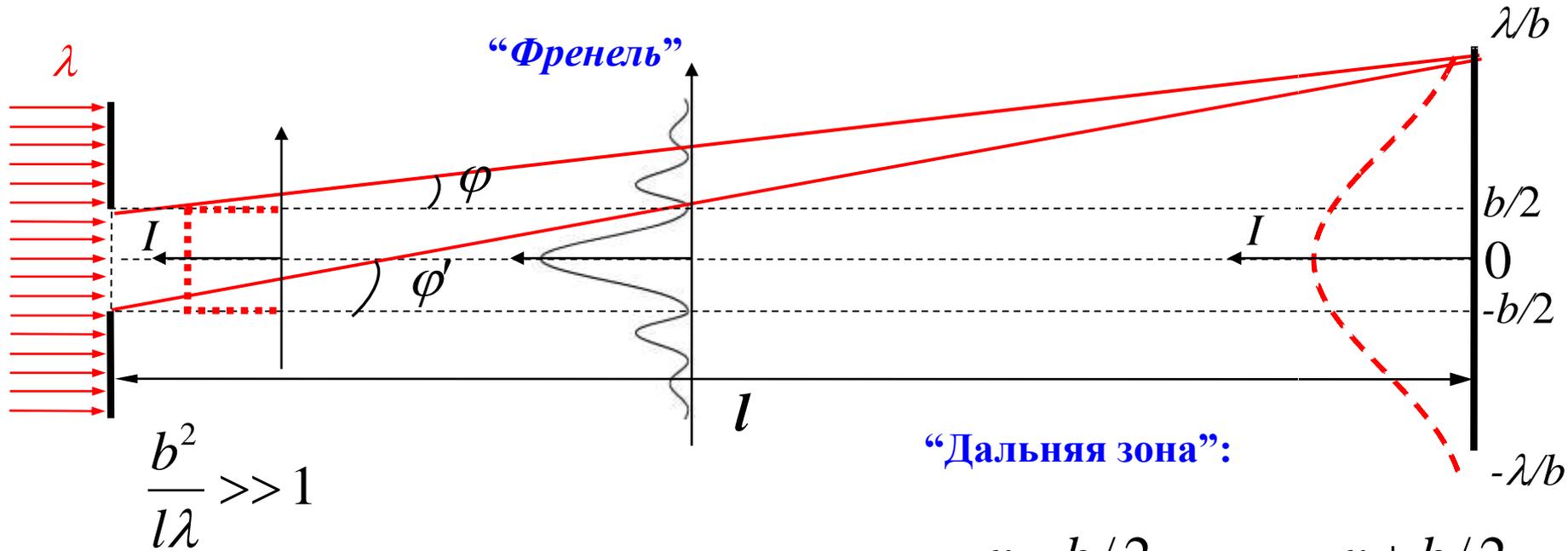
$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot b \sin \varphi$$

Дифракция Фраунгофера на щели

центральный
максимум



“Классификация дифракционных явлений”

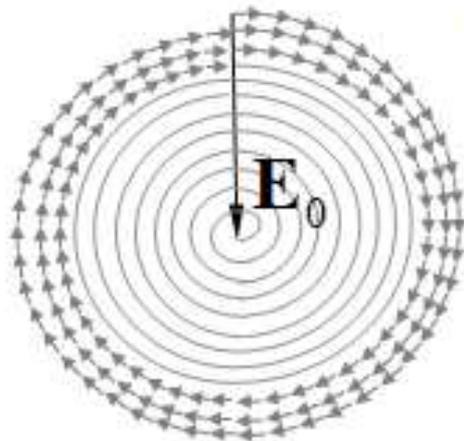
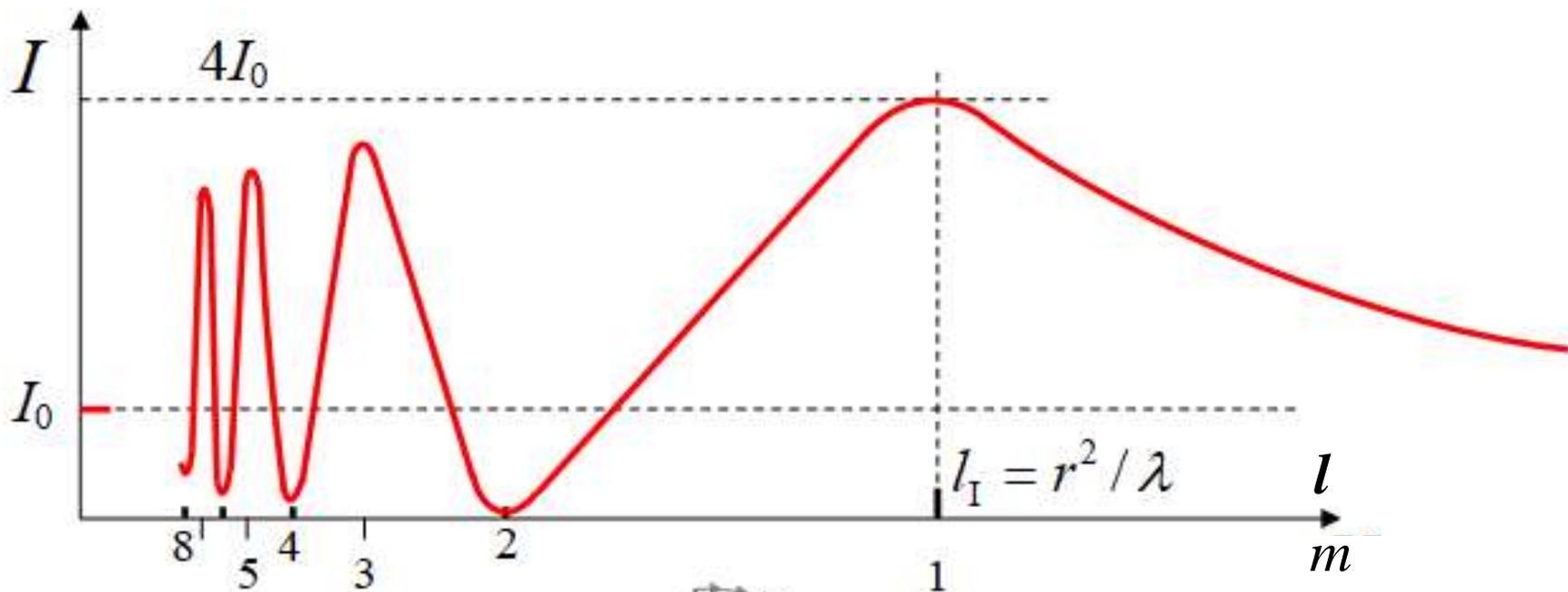


$$\varphi \cong \frac{x - b/2}{l}; \quad \varphi' \cong \frac{x + b/2}{l}$$

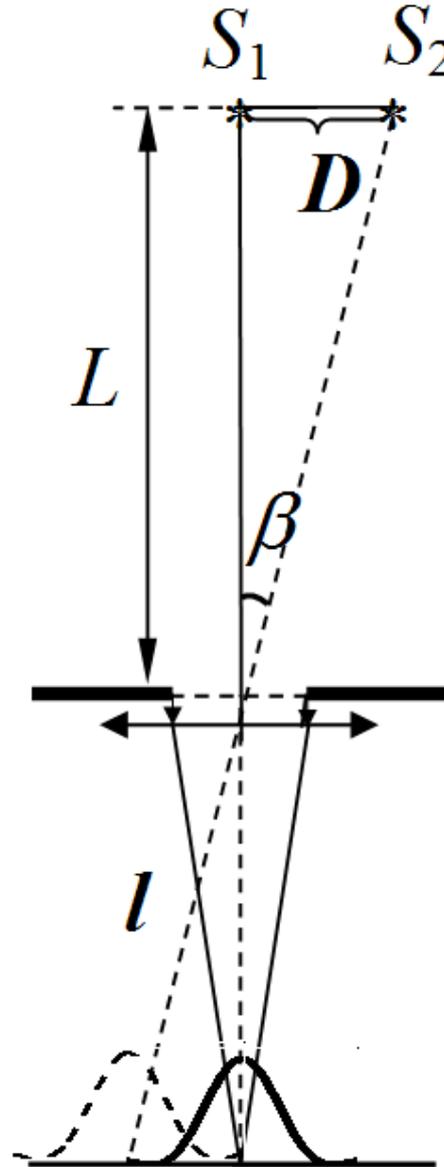
параллельны: $\varphi \approx \varphi'$, если $b \ll x_1^{\min}$: $b \ll l \cdot \frac{\lambda}{b}$

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

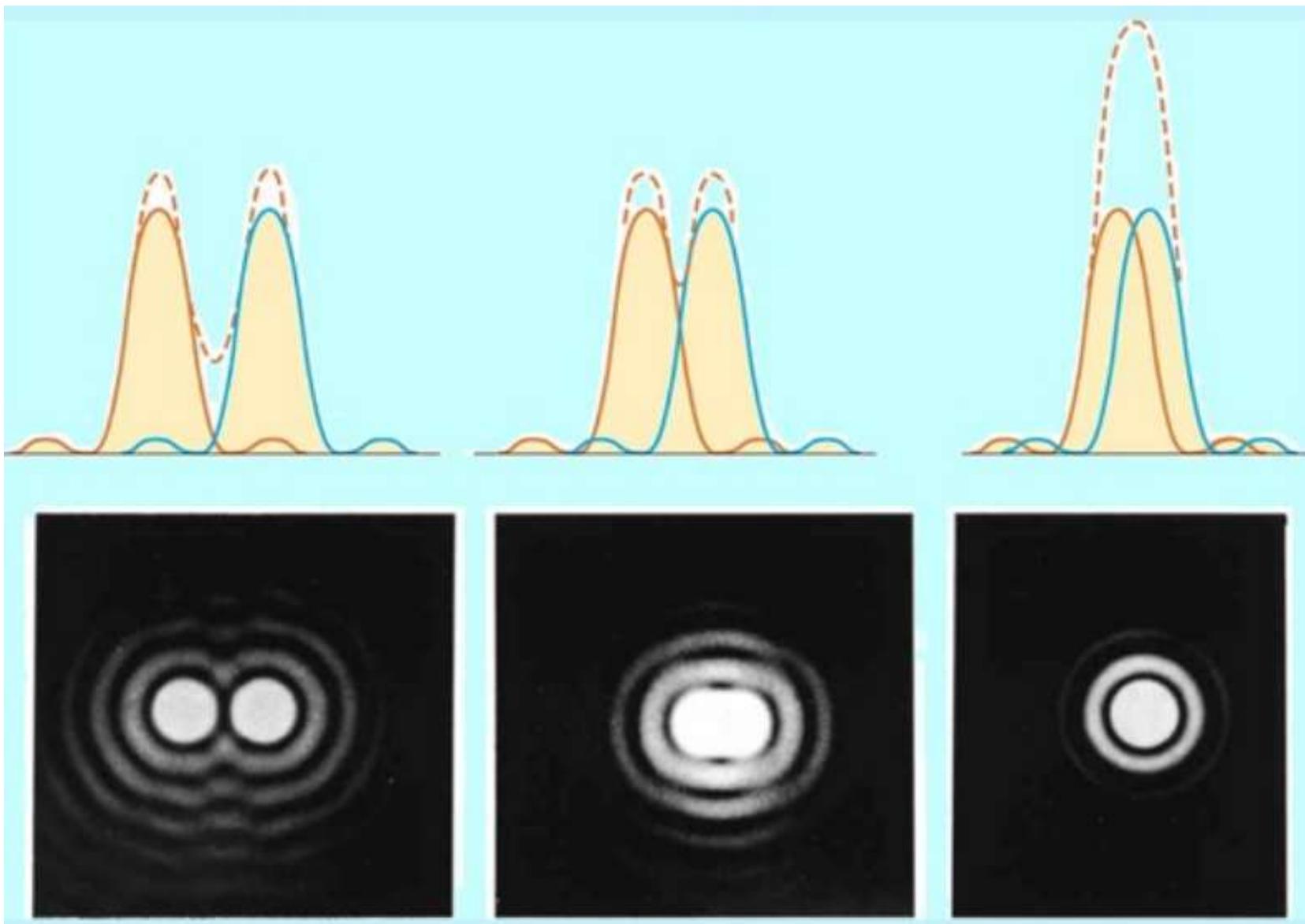
Интенсивность в центре дифракционной картины



К объяснению предельного разрешения



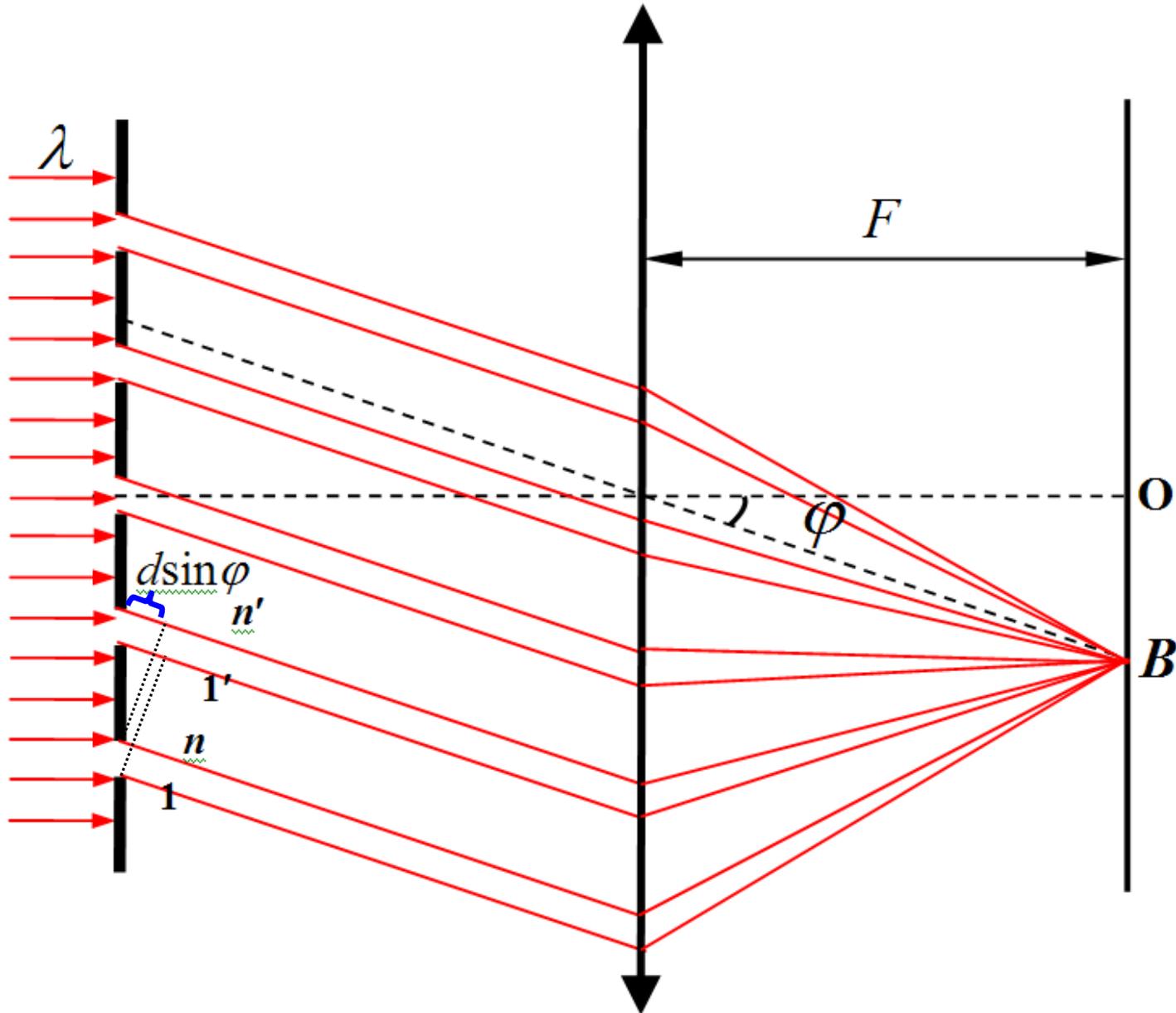
Предел разрешения оптических приборов. Критерий Рэля



Лекция 12. Дифракционная решётка. Поляризация света

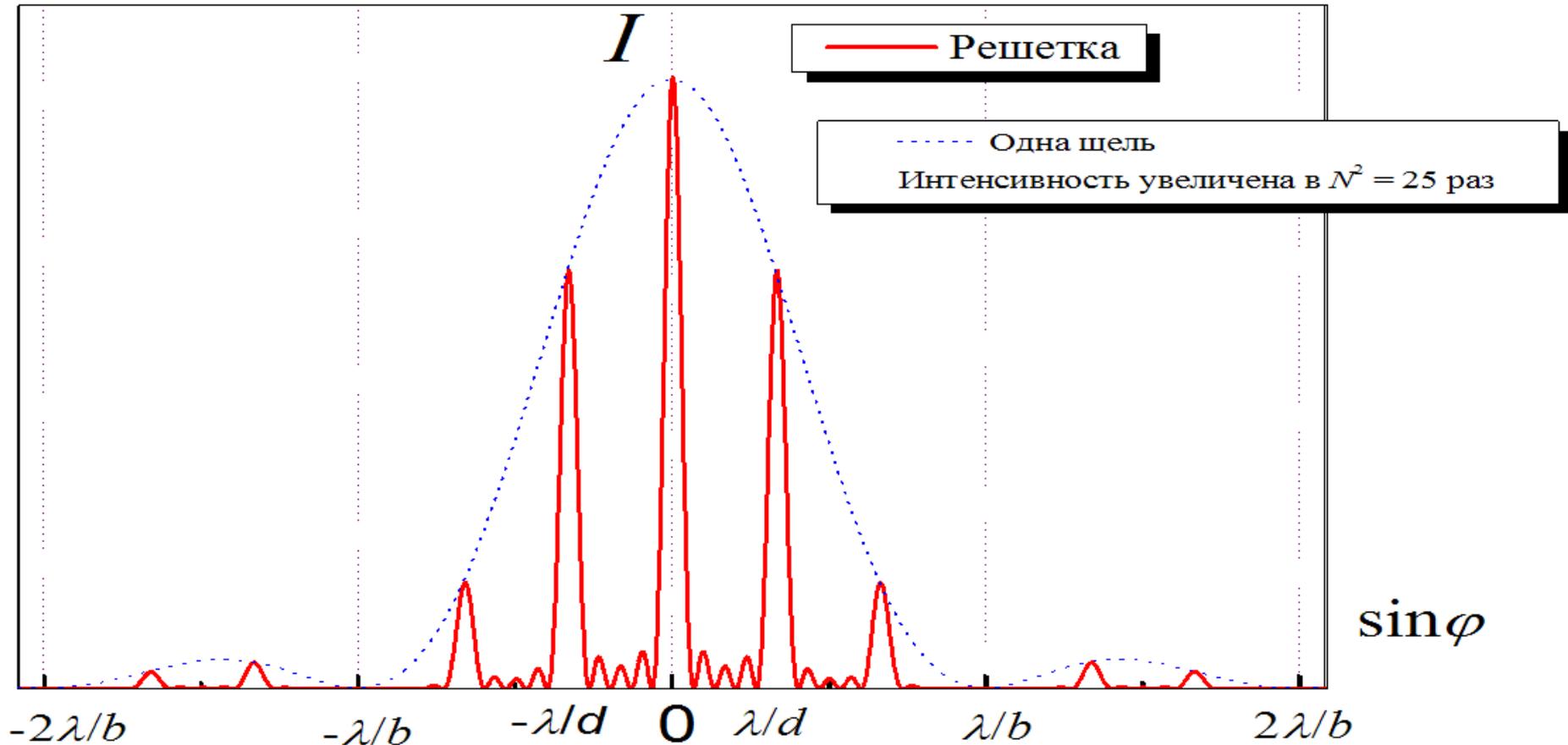


Дифракция на решётке



Дифракционная картина от решётки

5 щелей, $d = 3b$



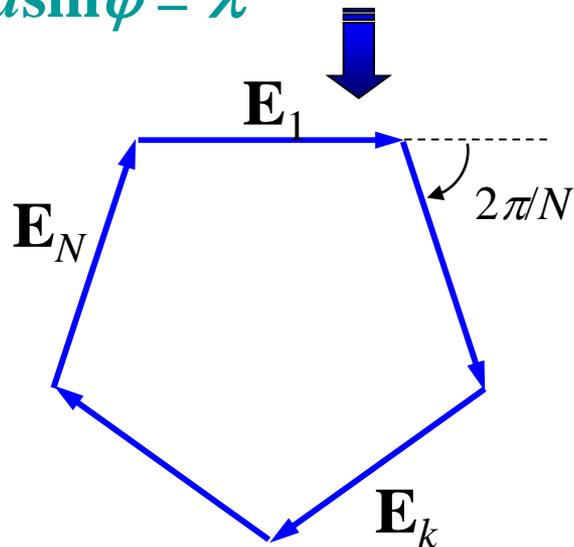
Главные максимумы : $d \sin \varphi = \pm m \lambda$, $m = 0, 1, 2, \dots$

К формированию дополнительных минимумов

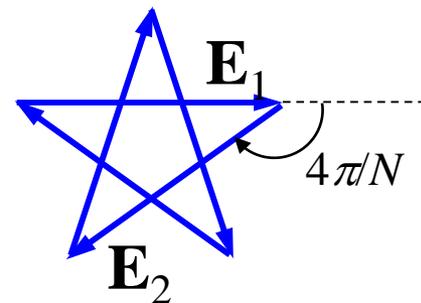
$$Nd \sin \varphi = \pm m_1 \lambda$$

Пример: число щелей $N = 5$

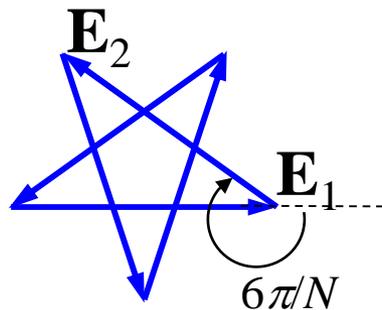
$$Nd \sin \varphi = \lambda$$



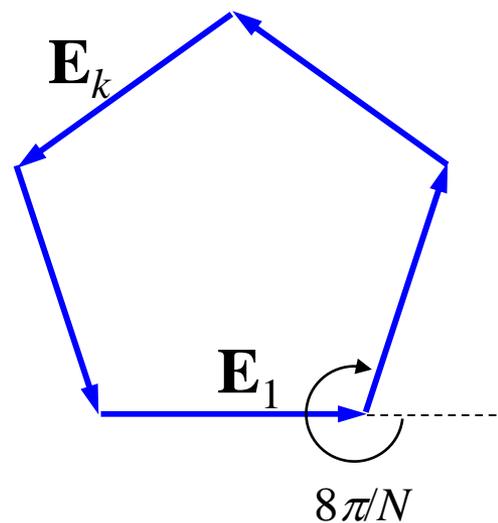
$$Nd \sin \varphi = 2\lambda$$



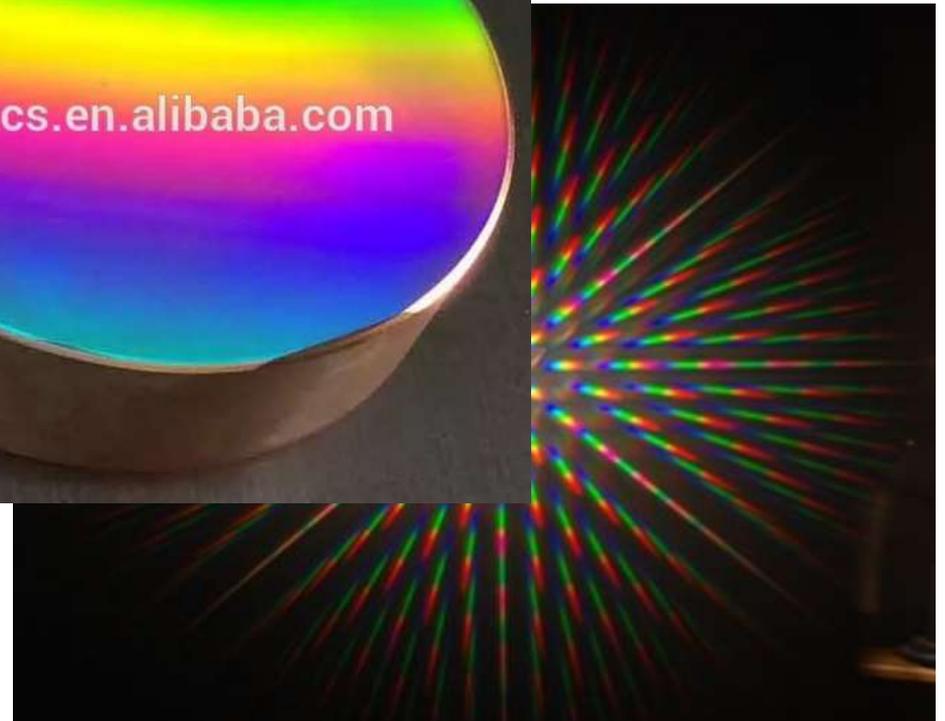
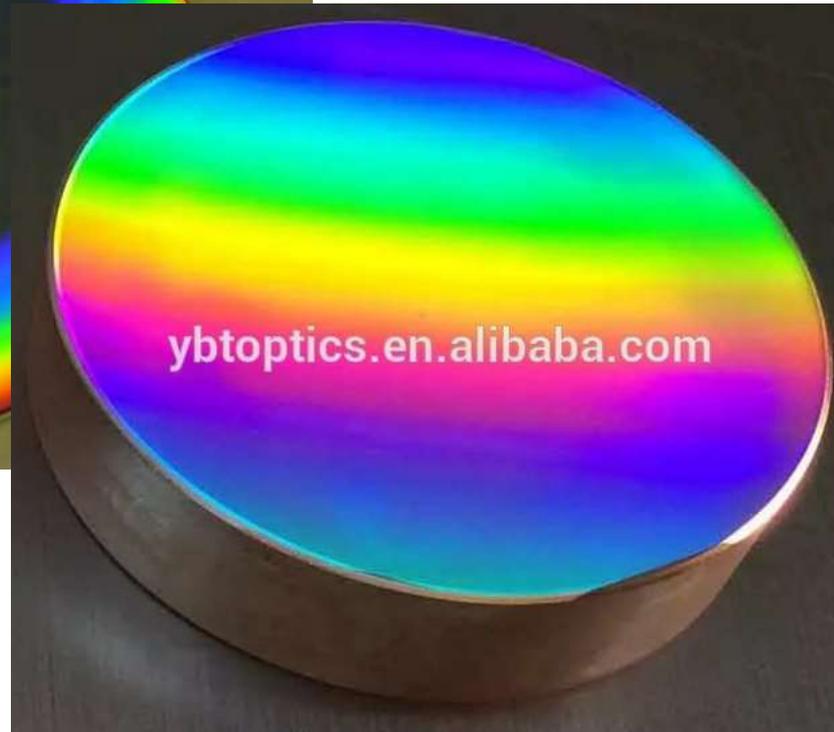
$$Nd \sin \varphi = 3\lambda$$



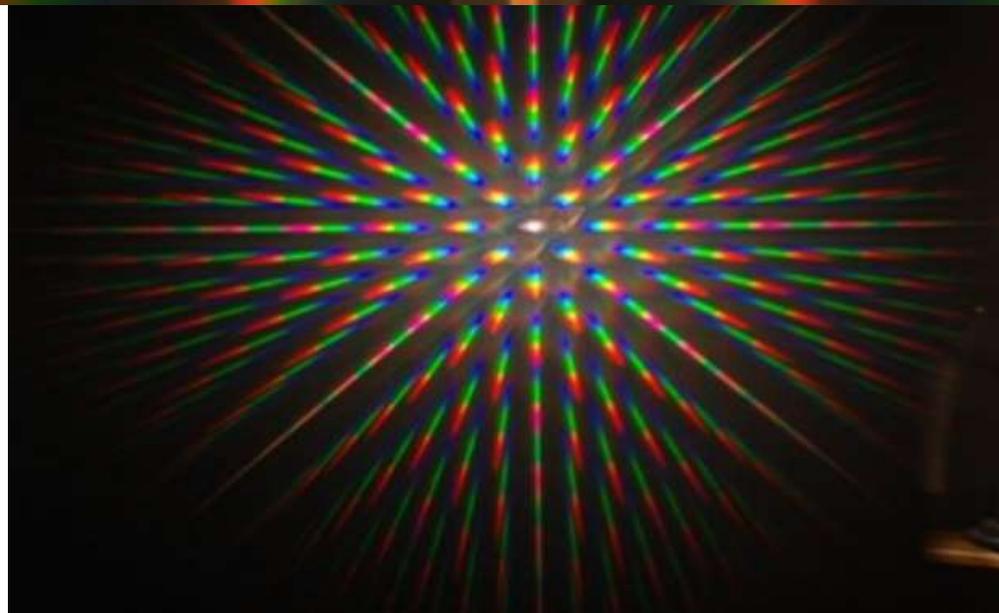
$$Nd \sin \varphi = 4\lambda$$



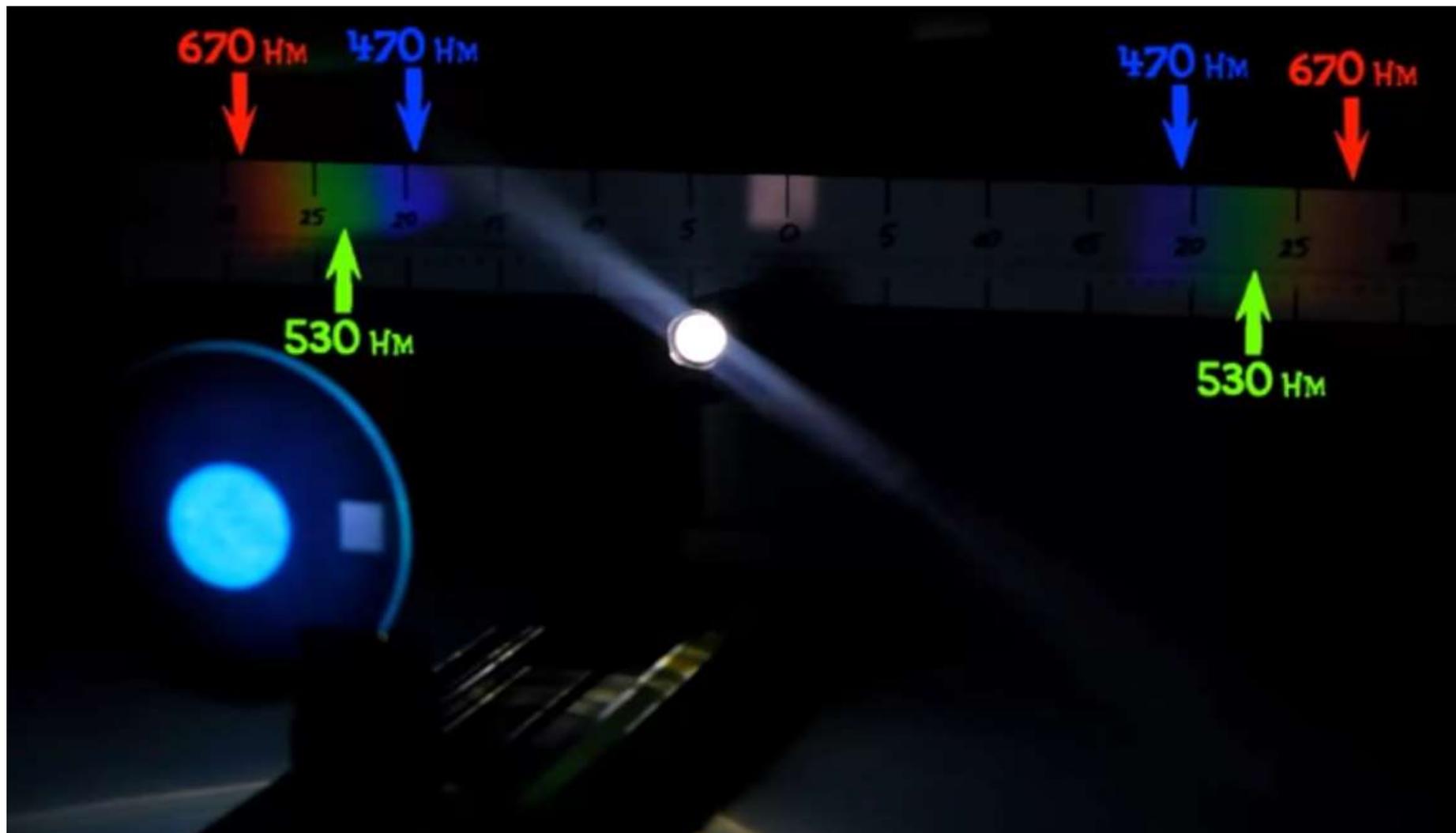
Дифракционное разложение света в спектр



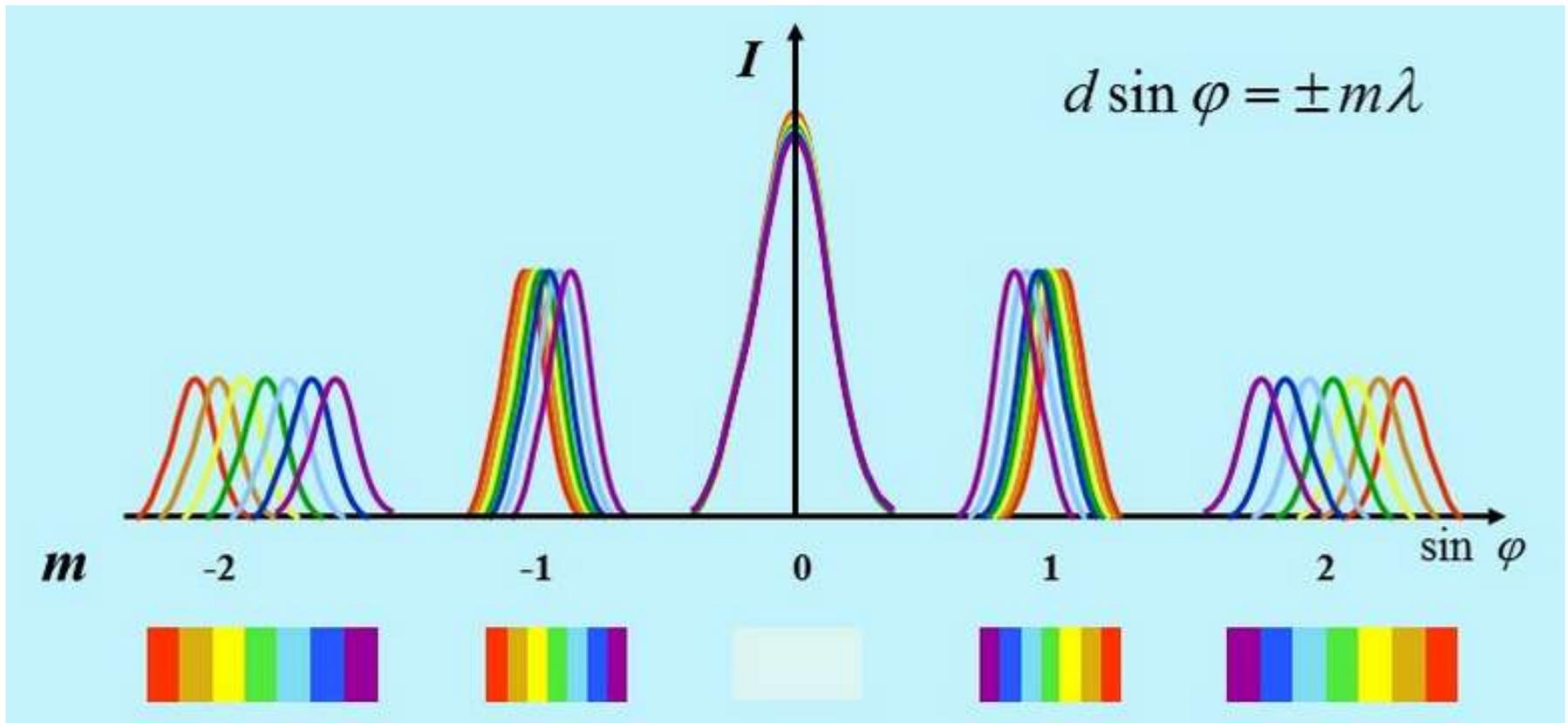
Дифракция белого света



Дифракция белого света

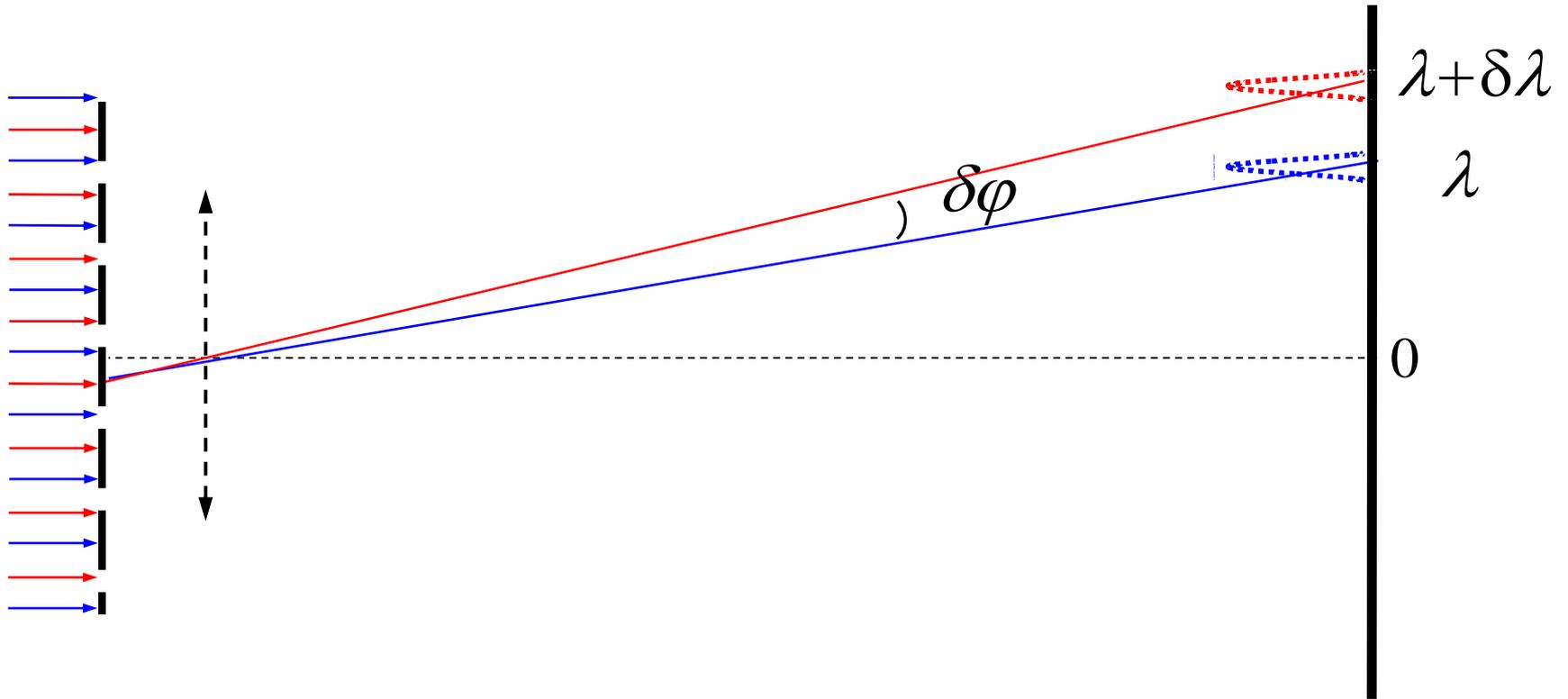


Дифракционная решётка - спектральный аппарат

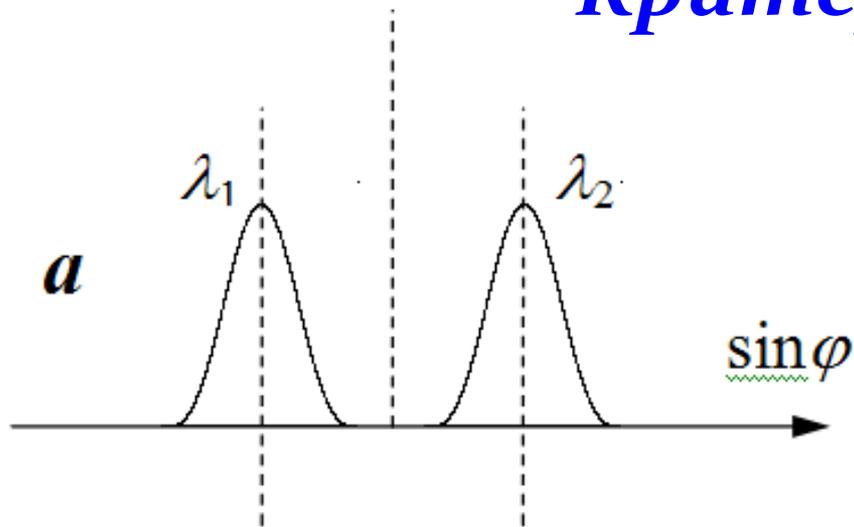


Угловая дисперсия

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



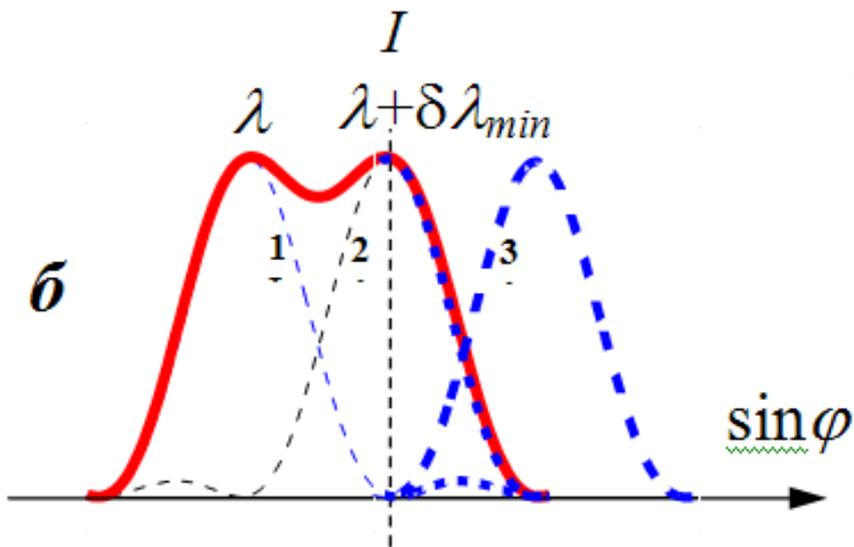
Разрешающая способность. Критерий Рэля



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

Решётка:

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

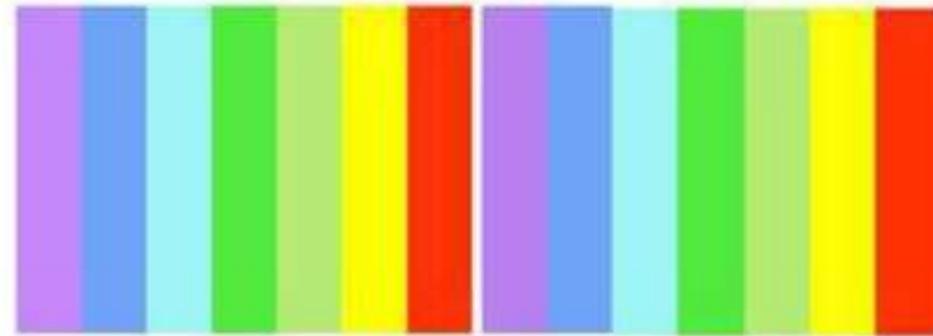


$$R = mN$$

Свободная спектральная область

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

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



λ

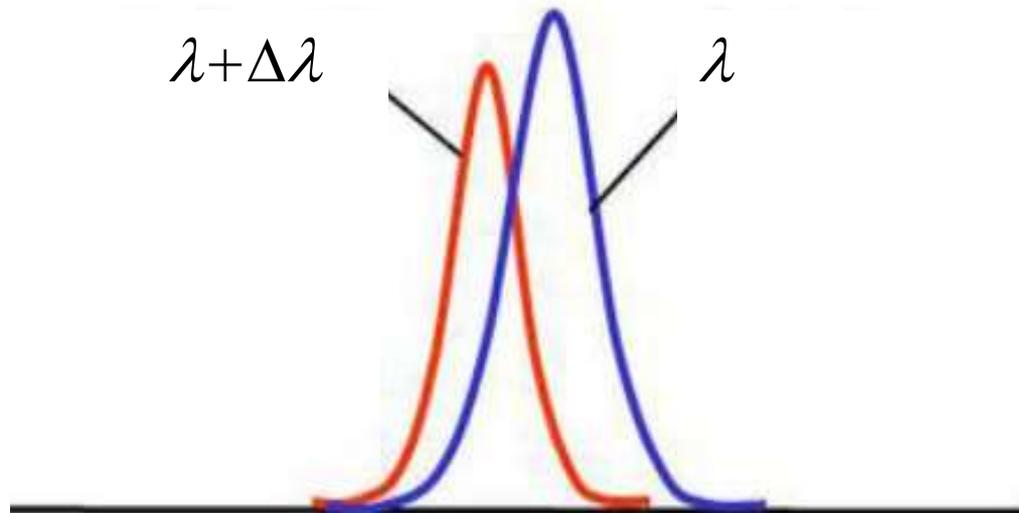
$\lambda + \Delta\lambda$

порядок "m"

порядок "m+1"

$\lambda + \Delta\lambda$

λ



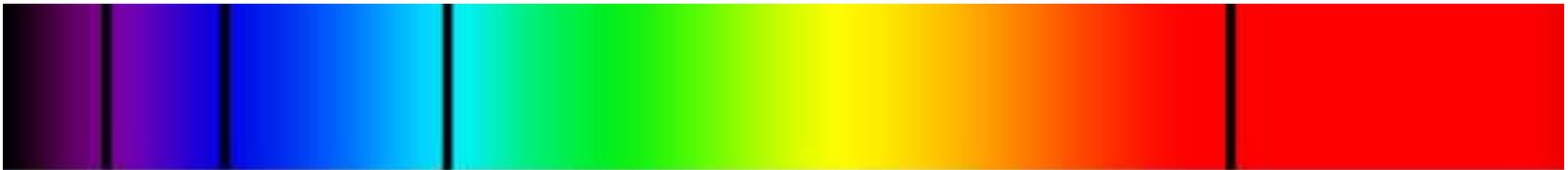
Спектры

Непрерывный



Линейчатый

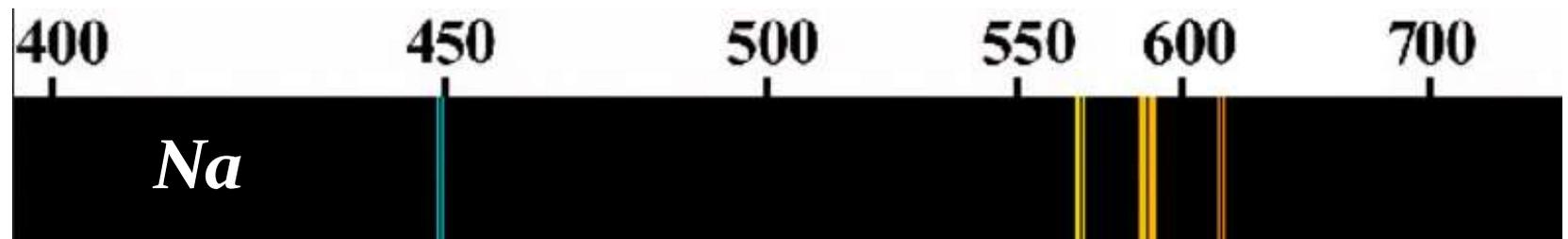
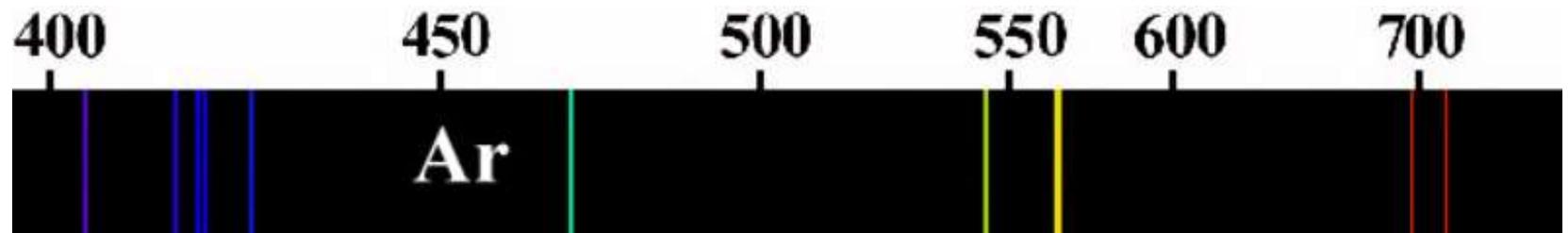
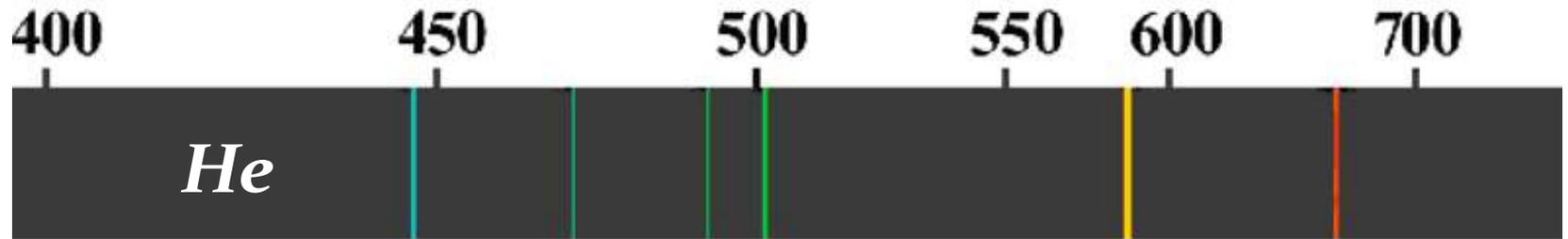
Водород



400 nm

700 nm

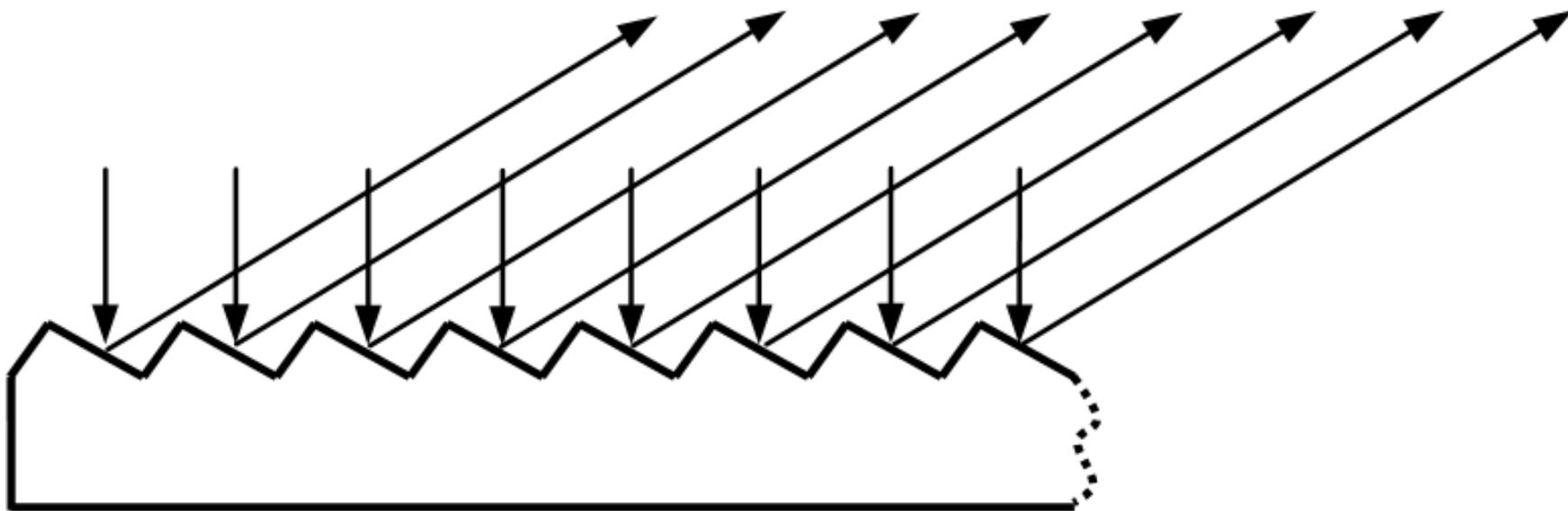
Линейчатые спектры



Спектры атомарных газов



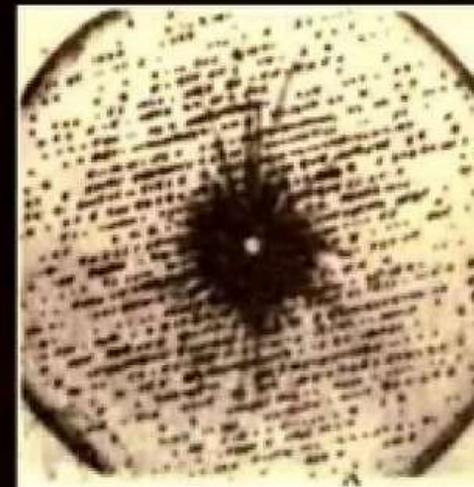
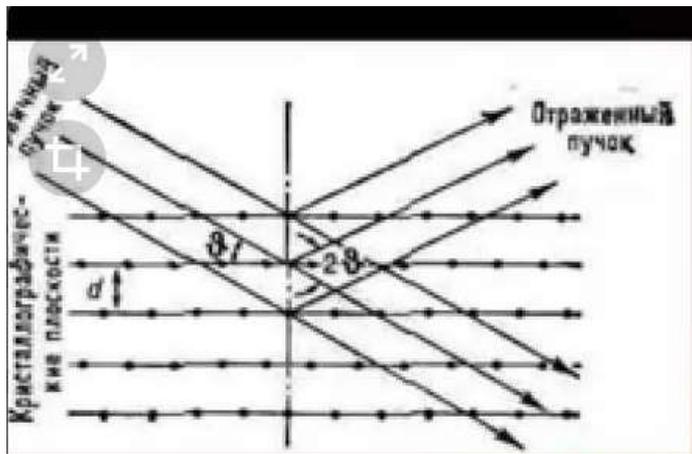
Отражательная дифракционная решётка “Эшелет”



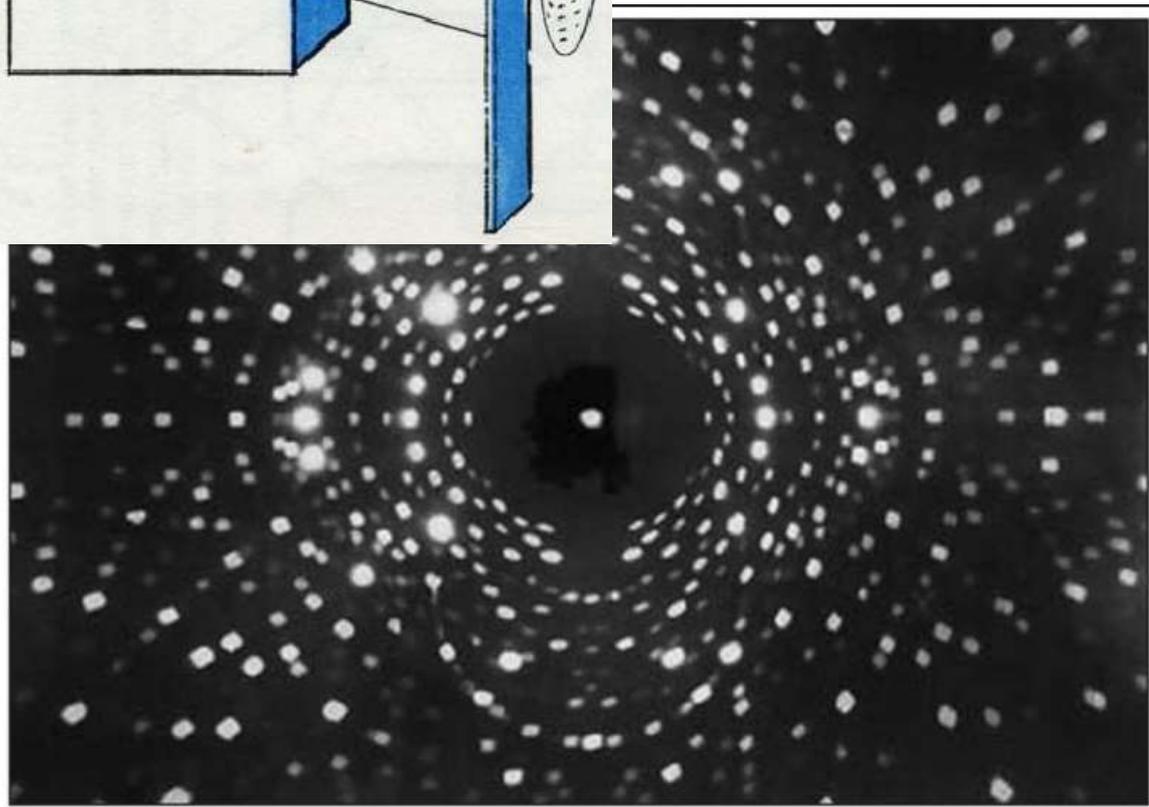
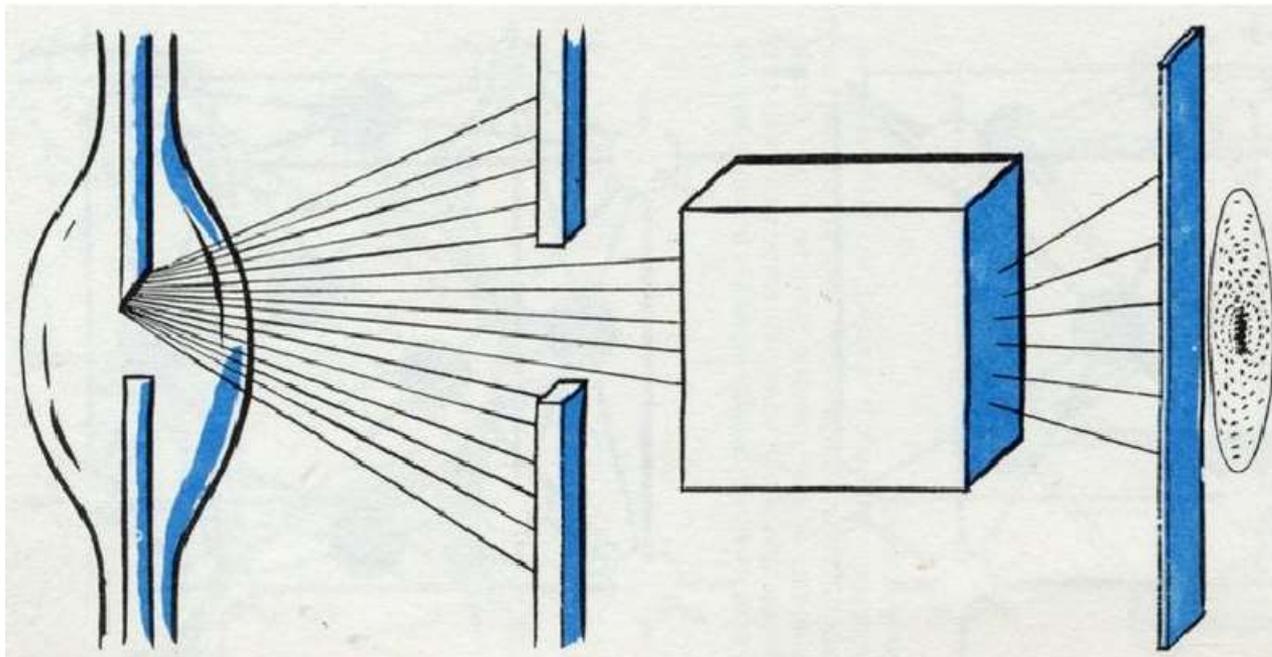
УСТРОЙСТВО КОМПАКТ-ДИСКА



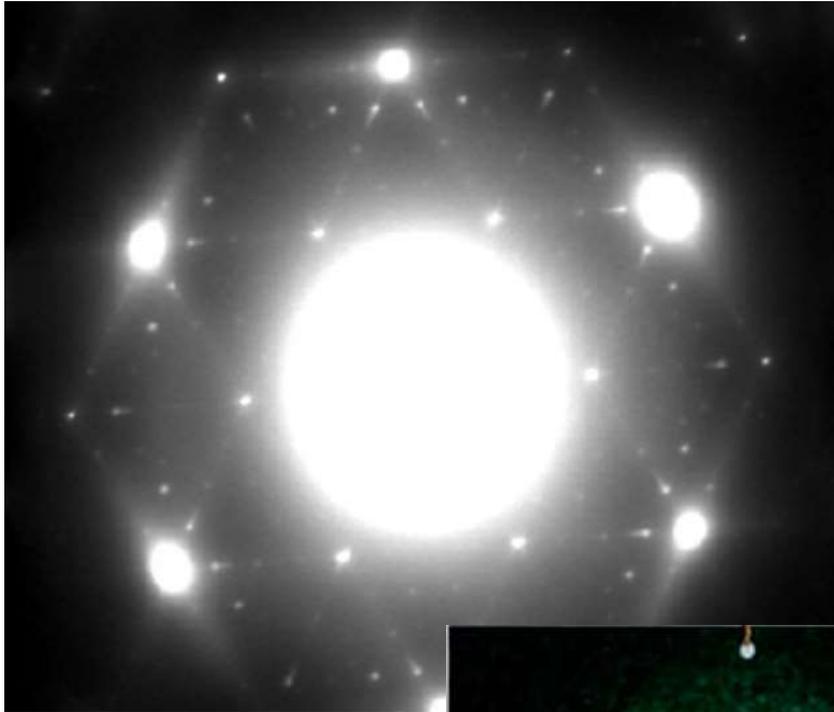
Интенсивность в центре дифракционной картины



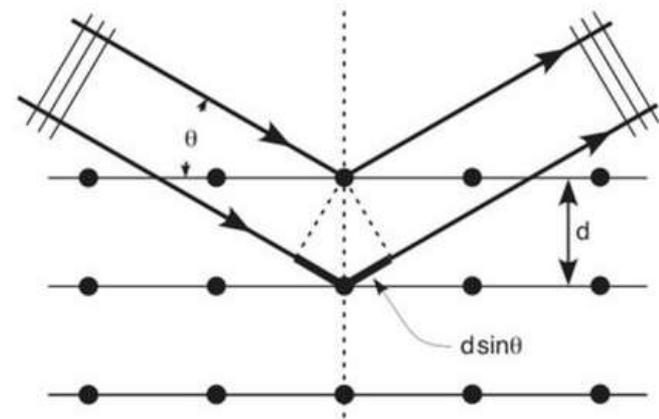
Дифракция на кристалле



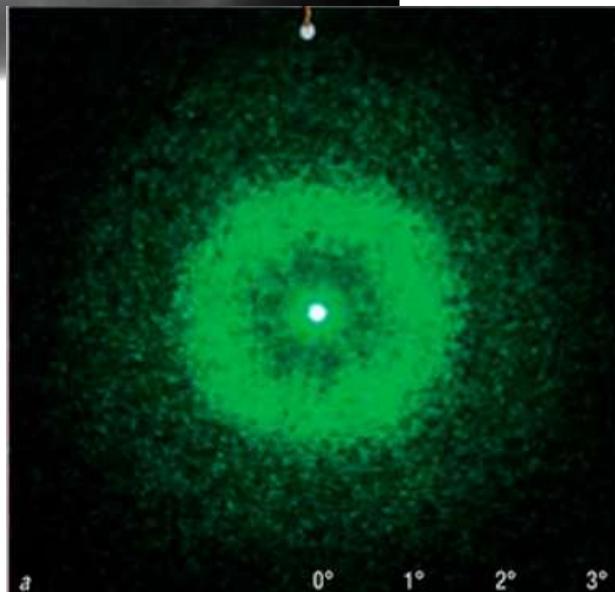
Формула Вульфа – Брэгга



Лауэ, 1912

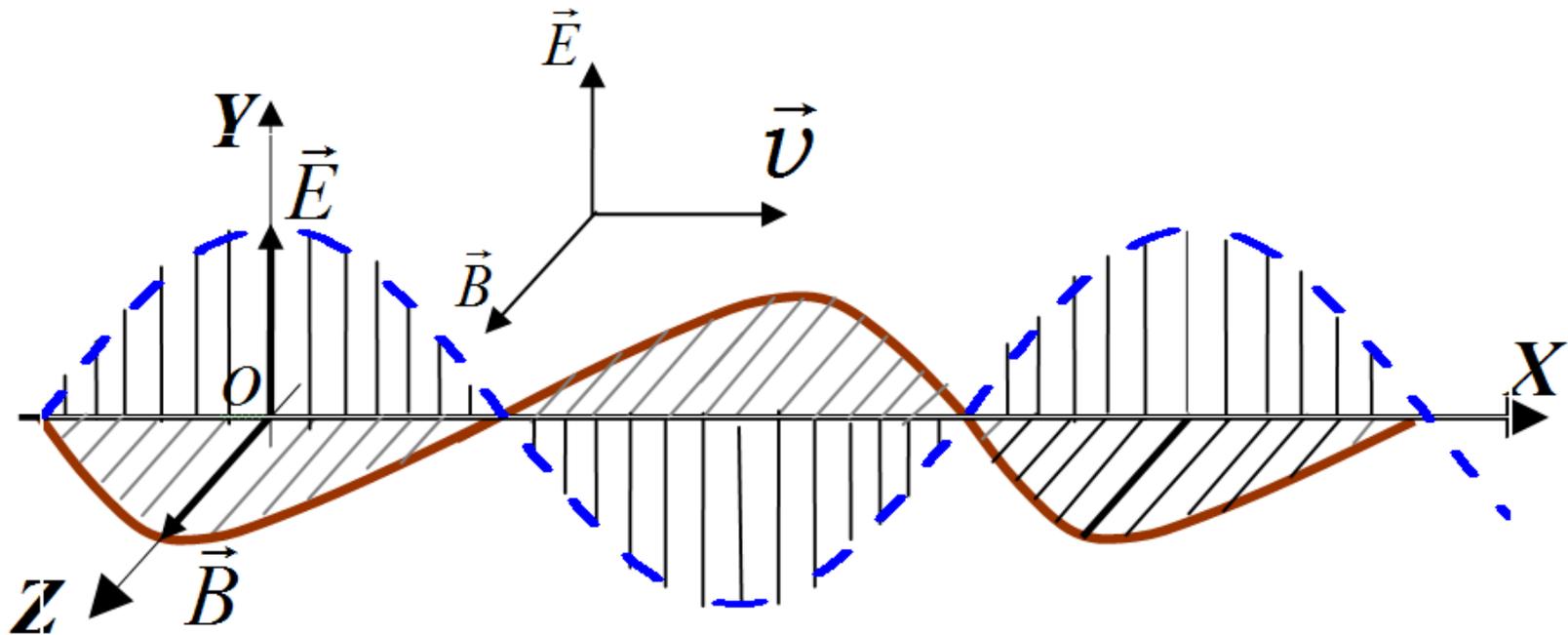


$$2d \sin \theta = n\lambda$$

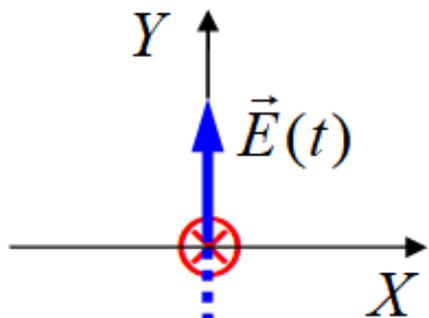


Аморфное галло

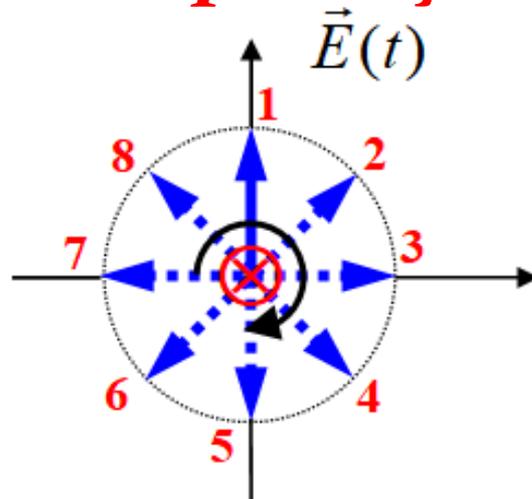
Плоскополяризованная электромагнитная волна



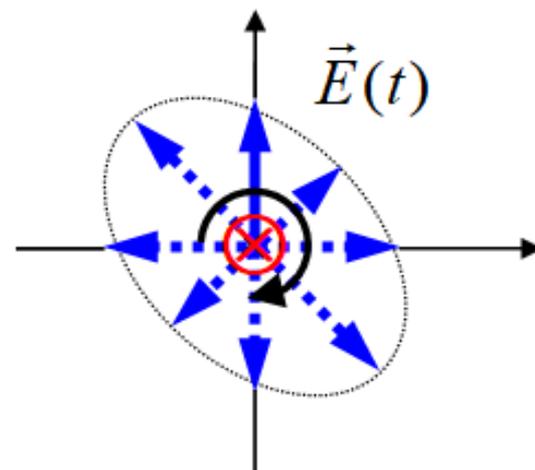
Типы поляризации света



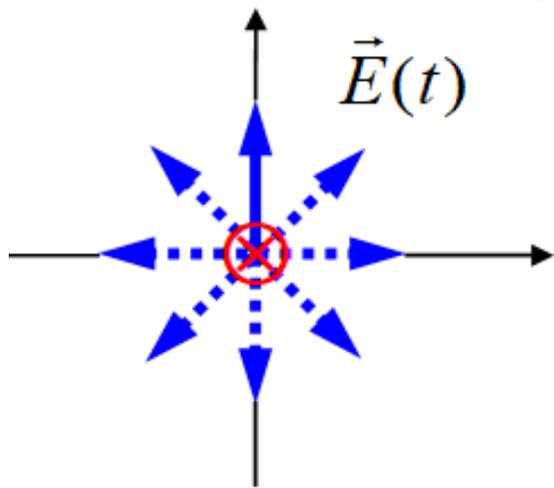
Плоско
поляризованный
свет



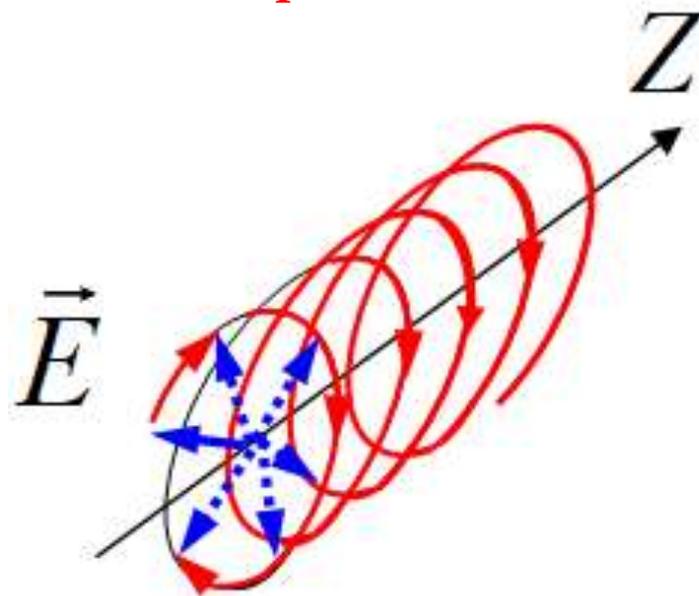
Циркулярно
поляризованный свет



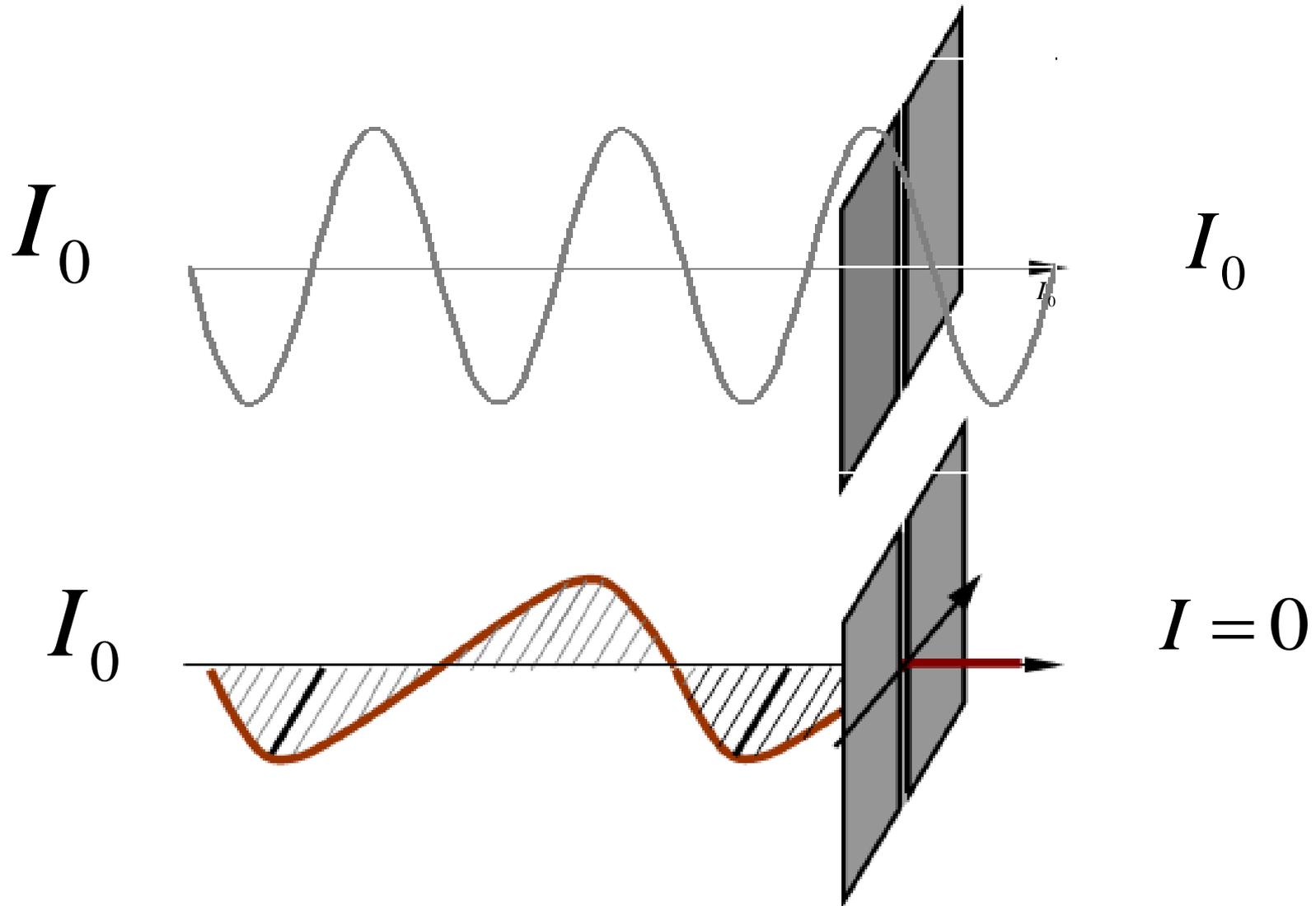
Эллиптически
поляризованный свет



Естественный \equiv
неполяризованный свет

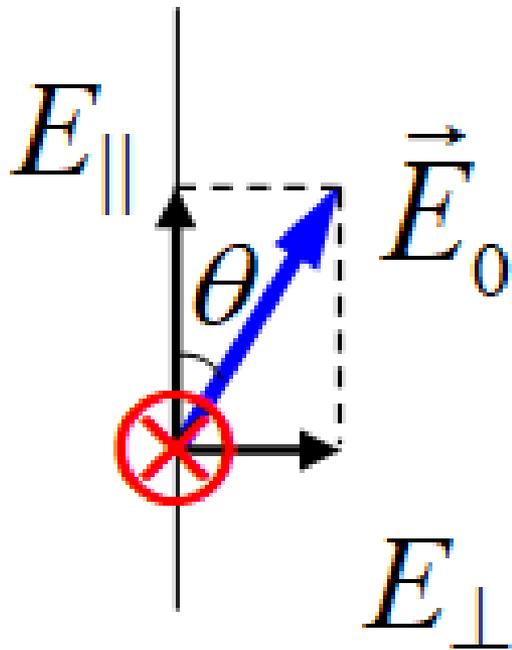


Идеальный поляризатор



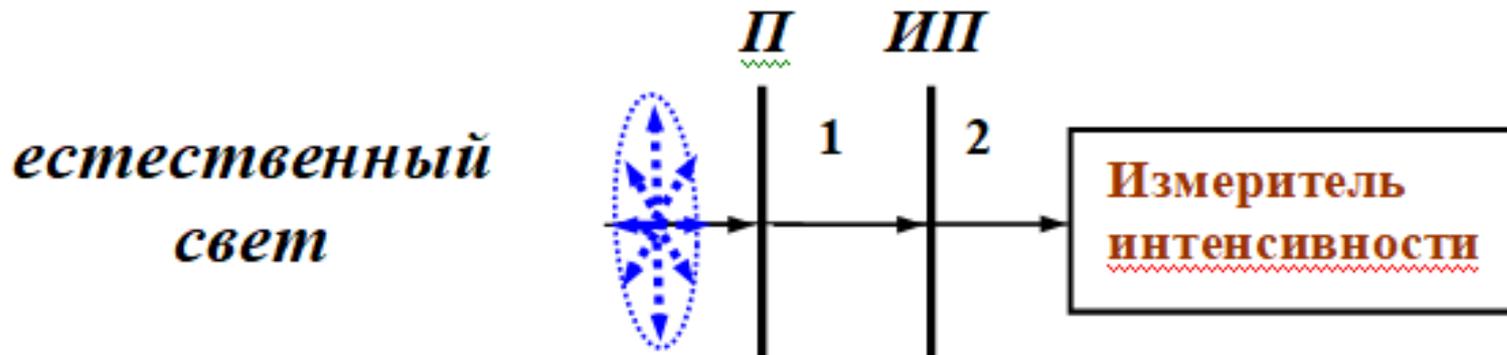
Закон Малюса

*главная
плоскость
поляризатора*

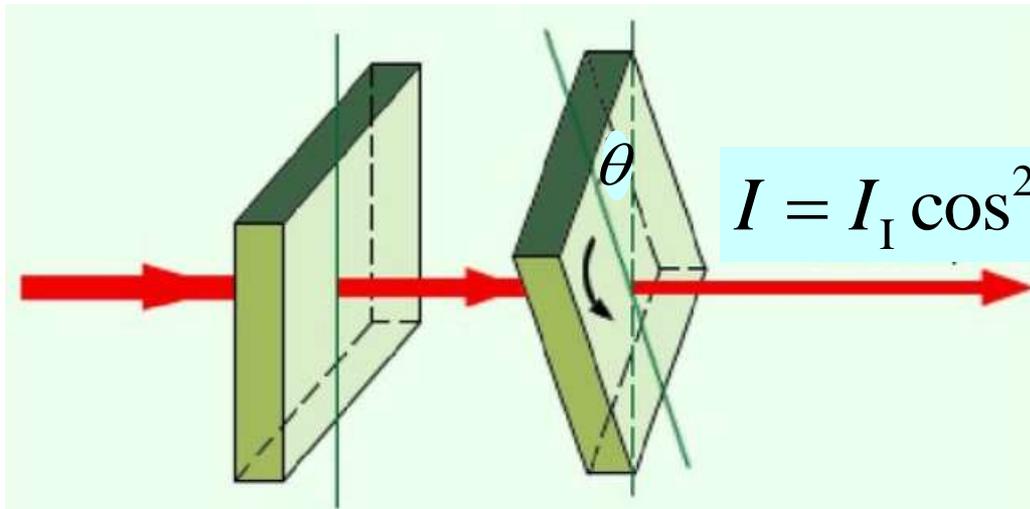


$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

Степень поляризации

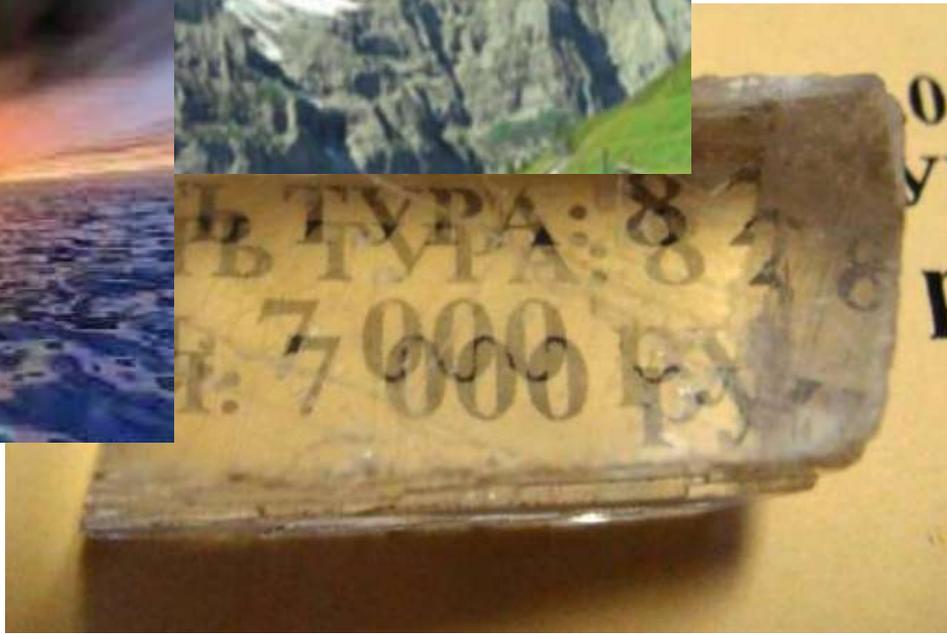


$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

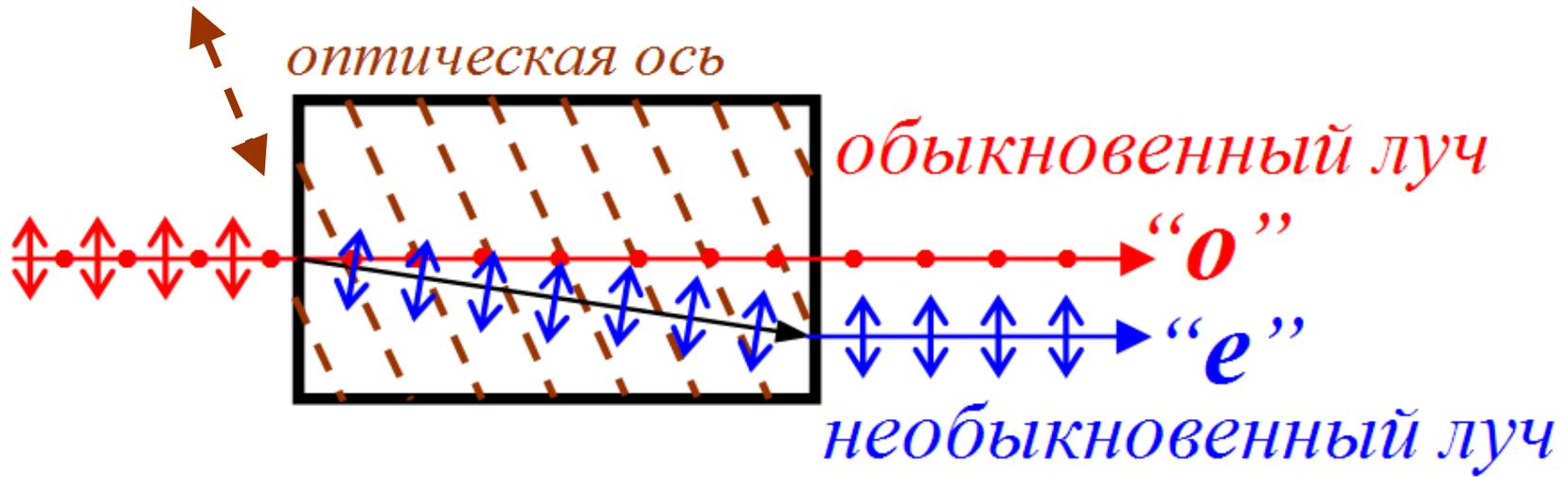


$$I = I_1 \cos^2 \theta + I_* / 2$$

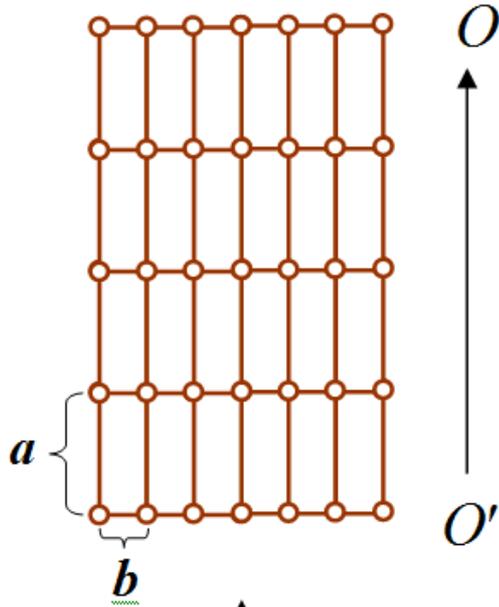
Лекция 13. Поляризация света



Двулучепреломление



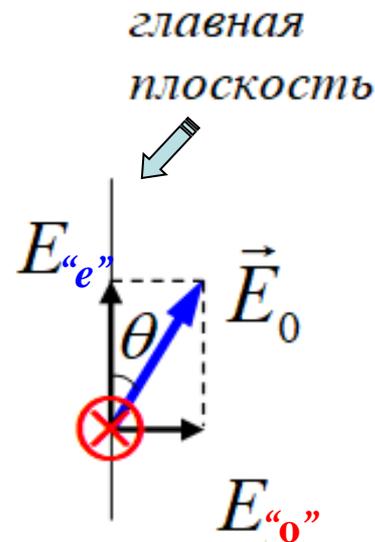
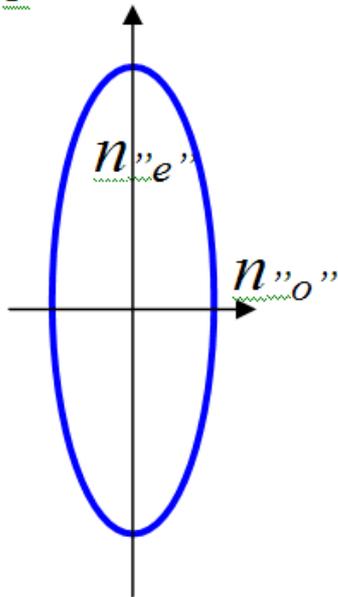
Природа двулучепреломления



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

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

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

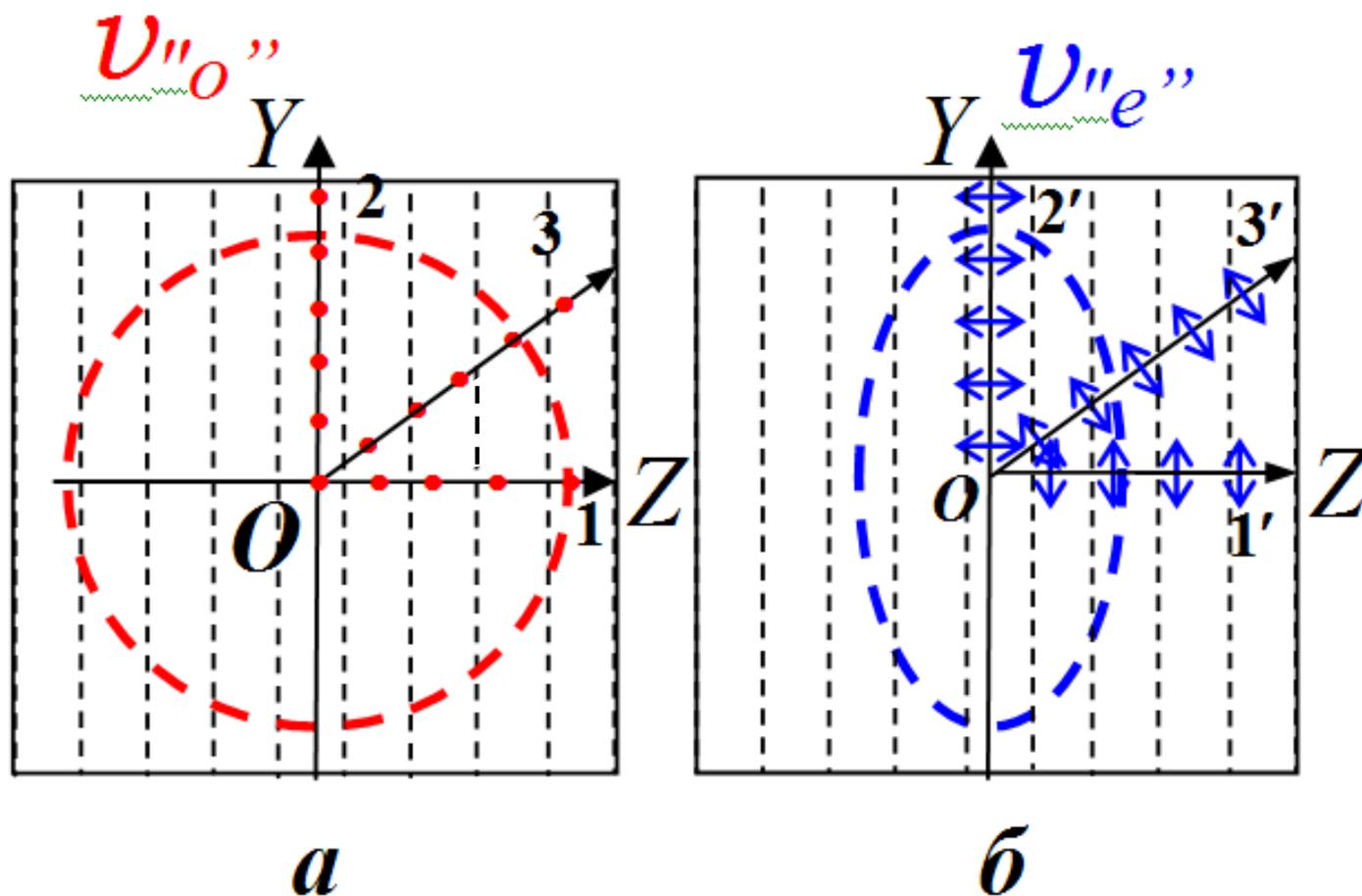


$$E_0^{"o"} = E_0 \sin \theta$$

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

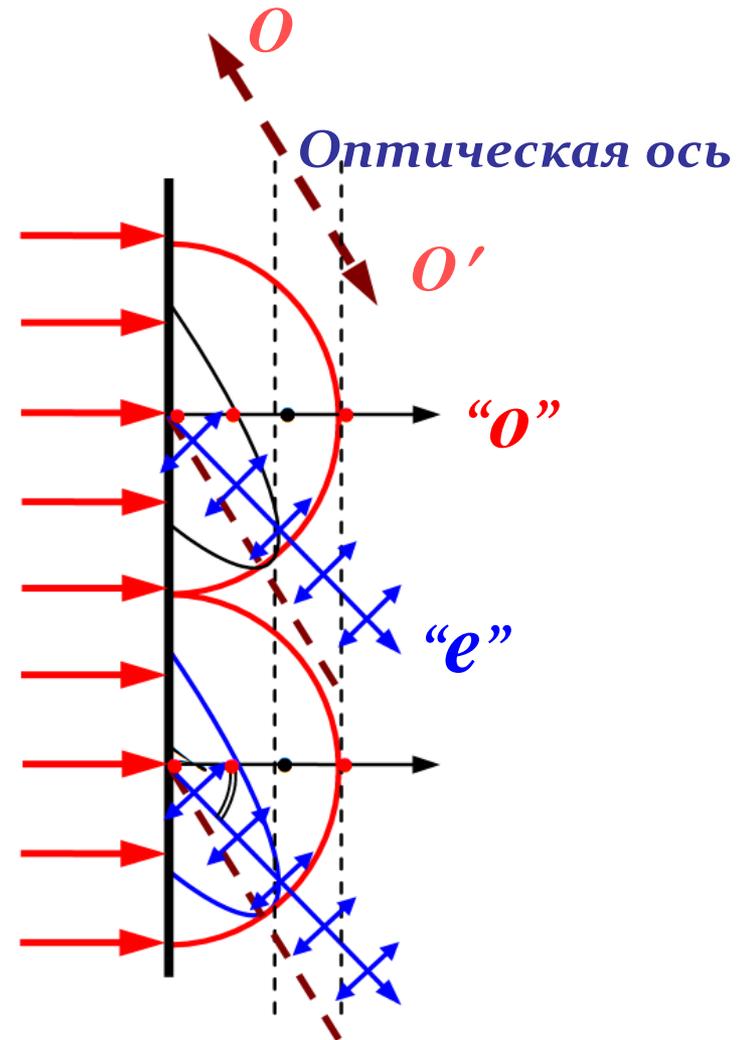
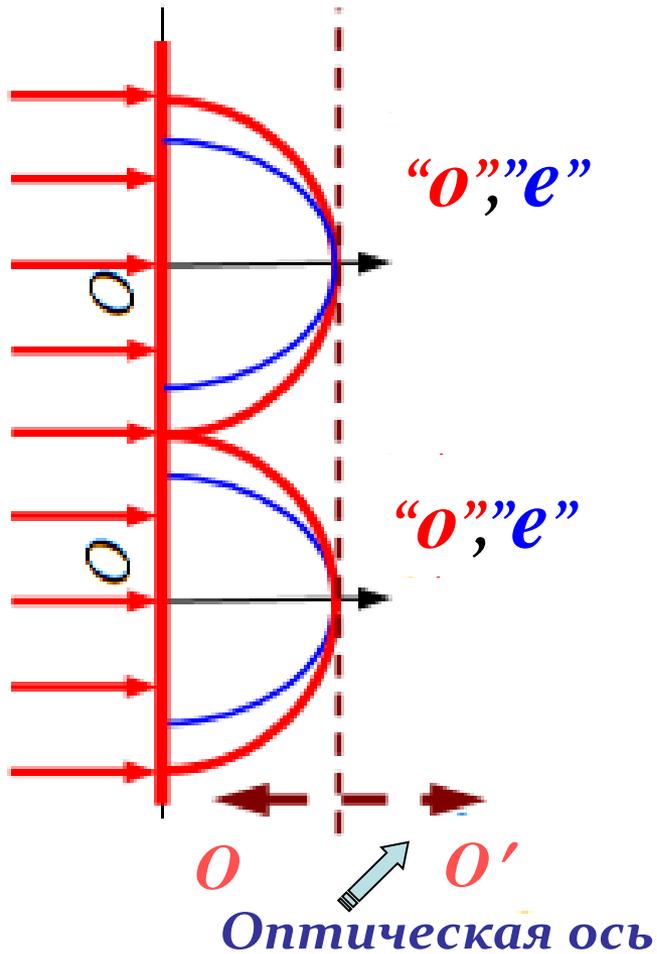
Природа двулучепреломления

Распространение поляризованных волн в анизотропной среде

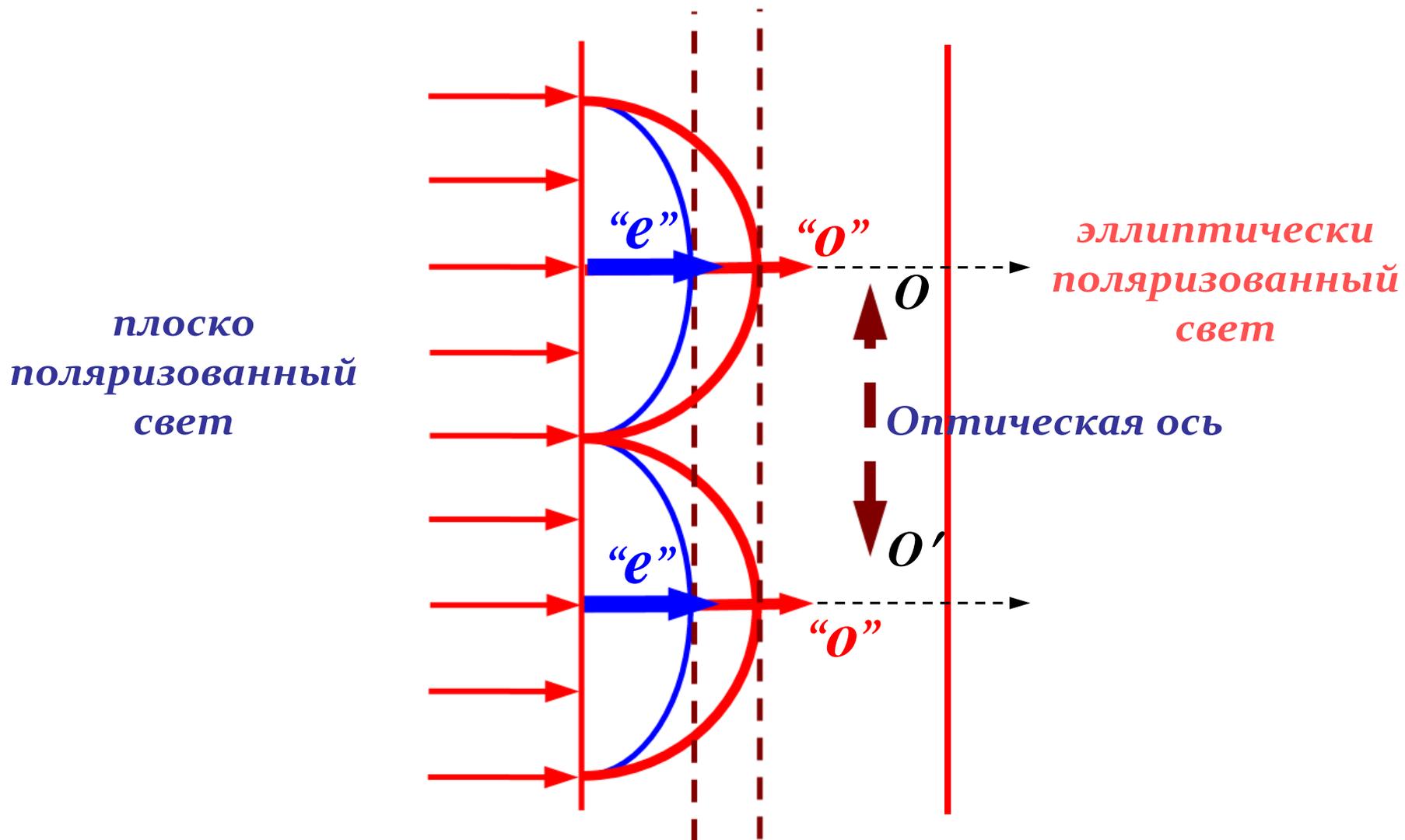


Возникновение двух лучей

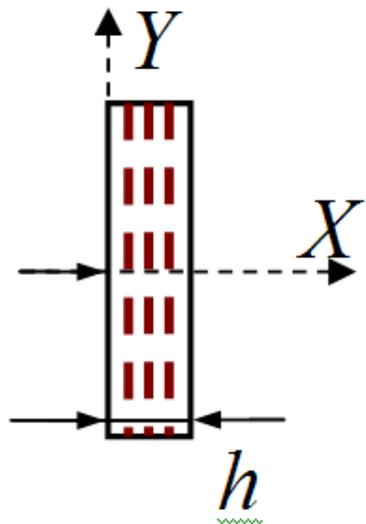
Нет разделения лучей



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



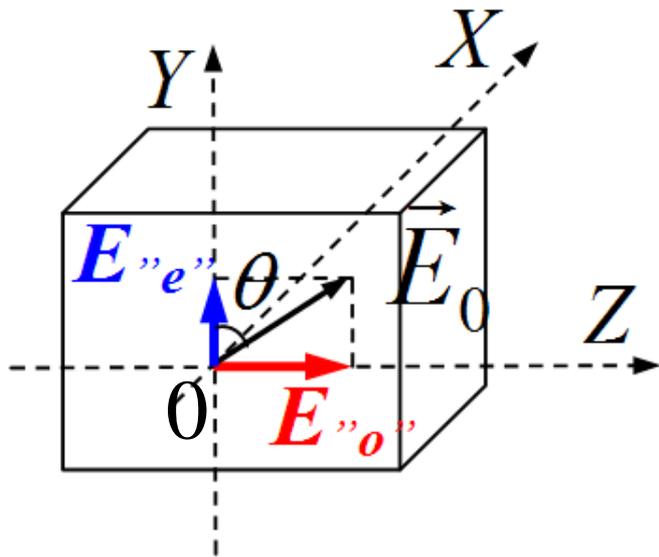
Кристаллические пластинки $\lambda/4$, $\lambda/2$, ...



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

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

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



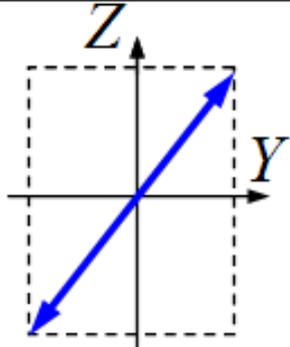
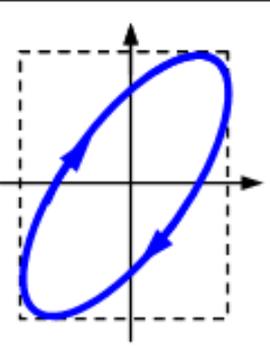
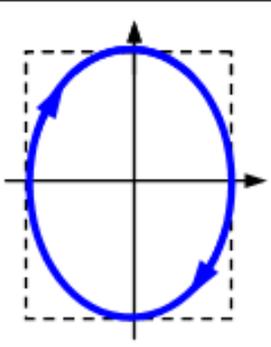
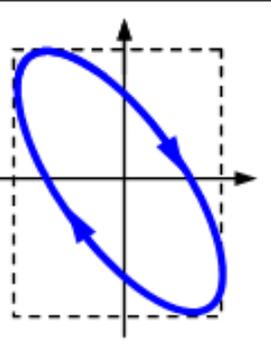
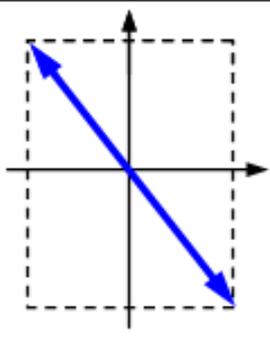
$$\Delta = \lambda/4 \Rightarrow \delta = \pi/2$$

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

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

Уравнения
Эллипса:

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

| | | | | | |
|----------|--|--|---|--|--|
| Δ | 0 | $\lambda_0/8$ | $\lambda_0/4$ | $3\lambda_0/8$ | $\lambda_0/2$ |
| δ | 0 | $\pi/4$ | $\pi/2$ | $3\pi/4$ | π |
| |  |  |  |  |  |

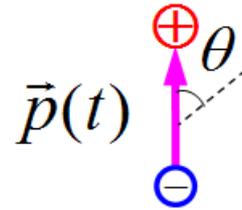
Излучение диполя

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

“сила тока”:

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

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

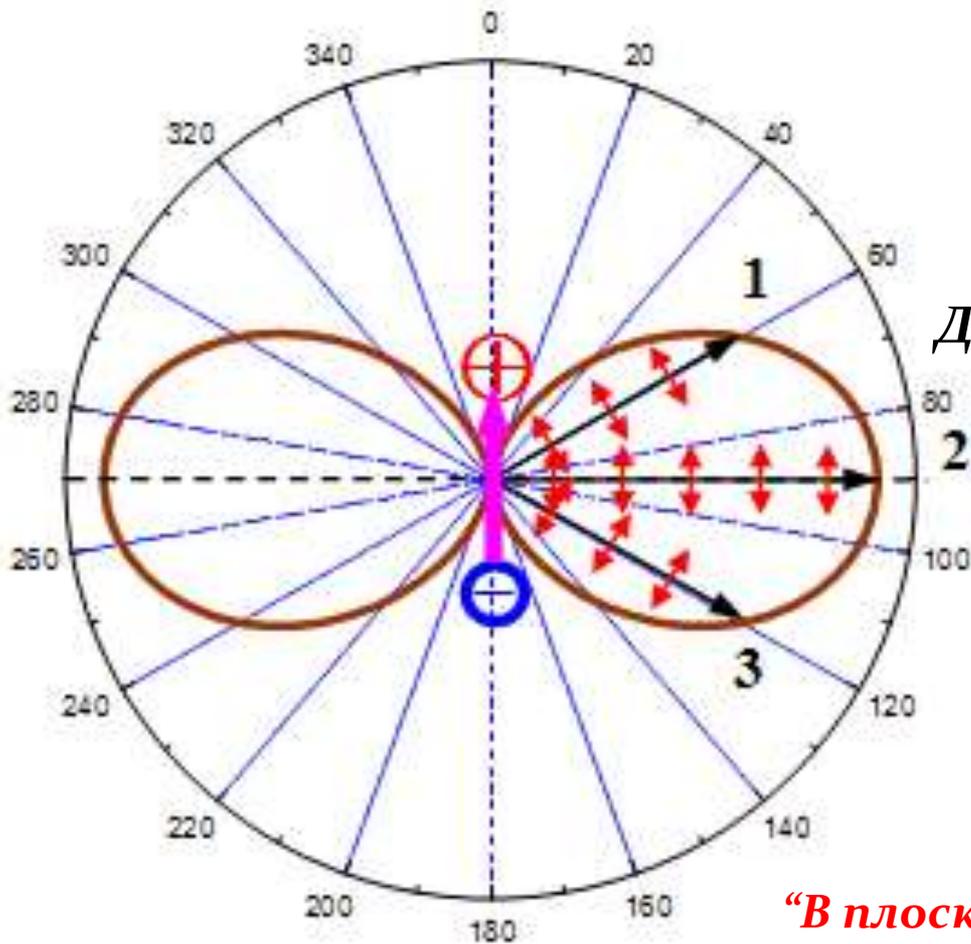


$$E \sim \frac{\partial B}{\partial t} \Rightarrow E \sim \ddot{\xi} \sim \Omega^2 \sin \theta$$

Интенсивность излучения:

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

Диаграмма направленности излучения диполя

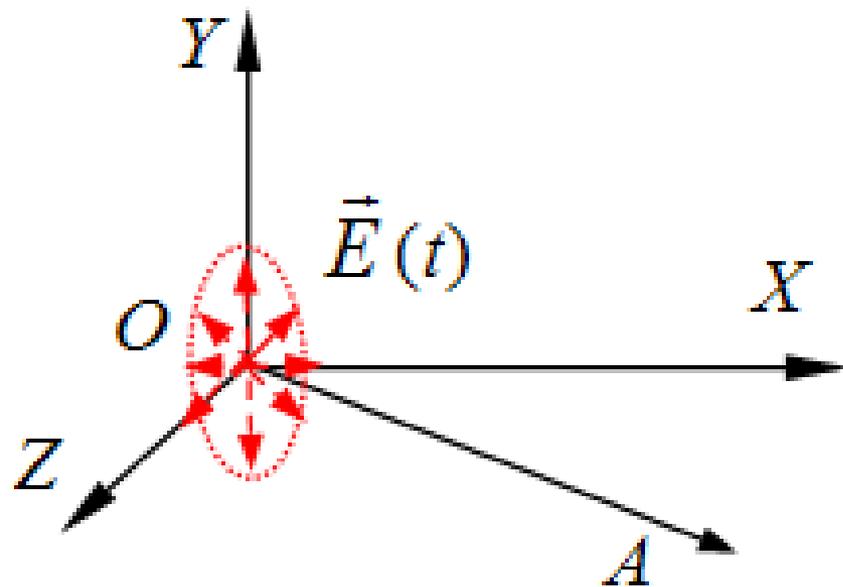
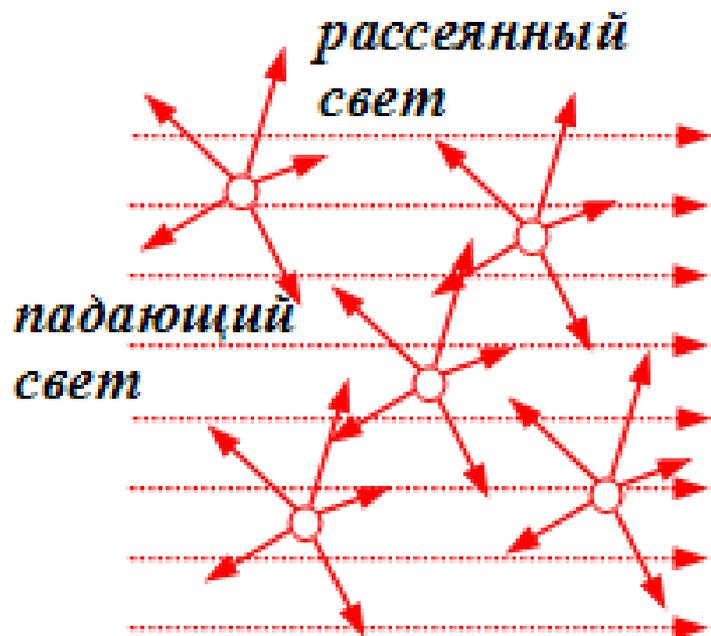


Длина стрелки = интенсивности

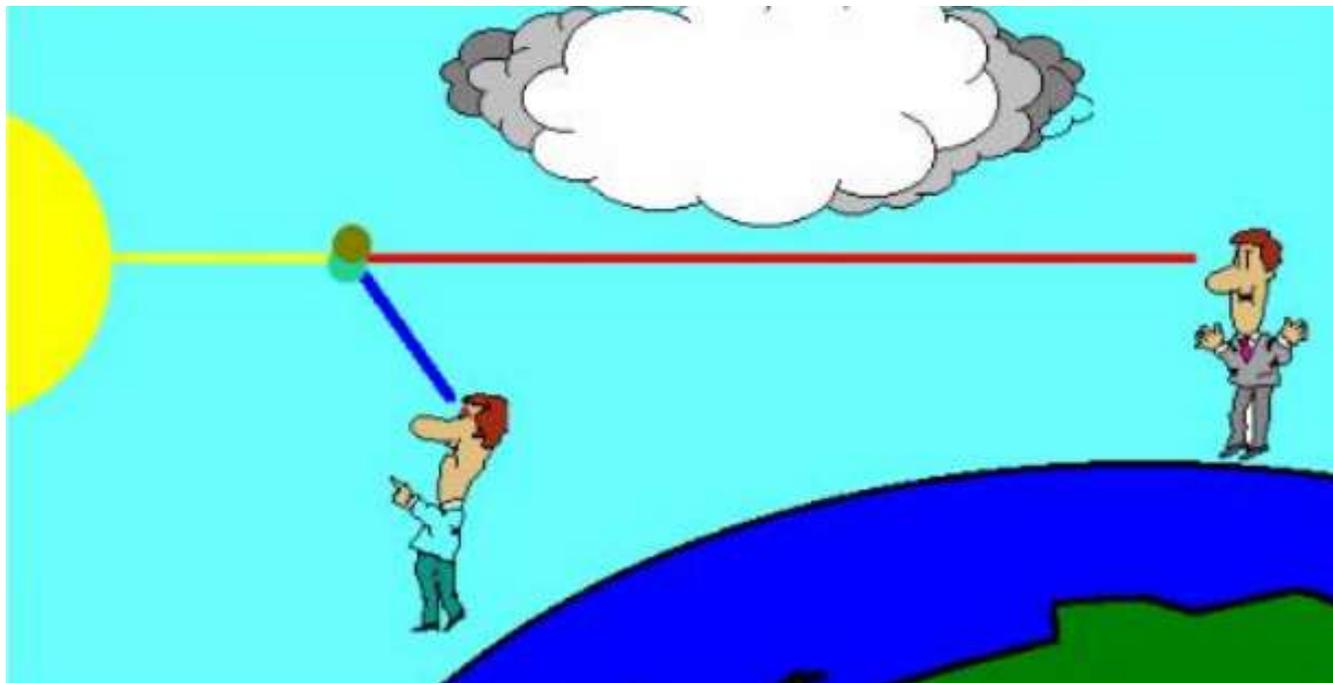
“В плоскости диполя”

Зависимость интенсивности излучения от направления

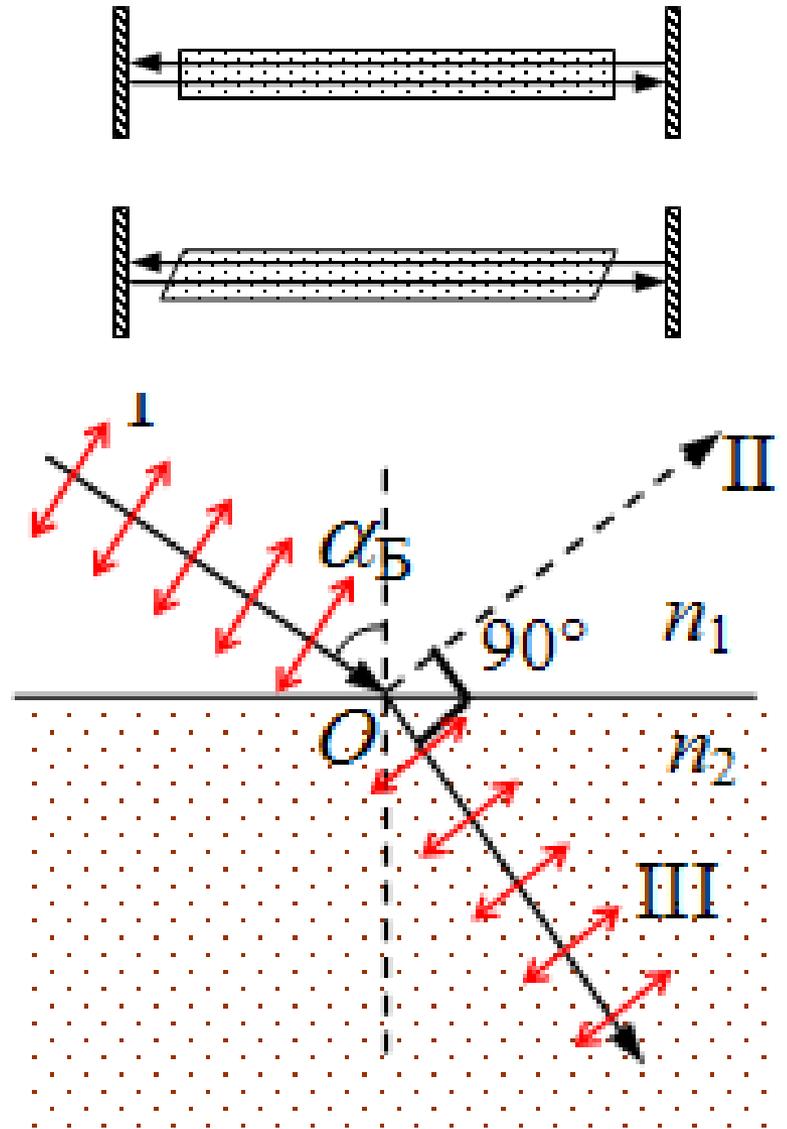
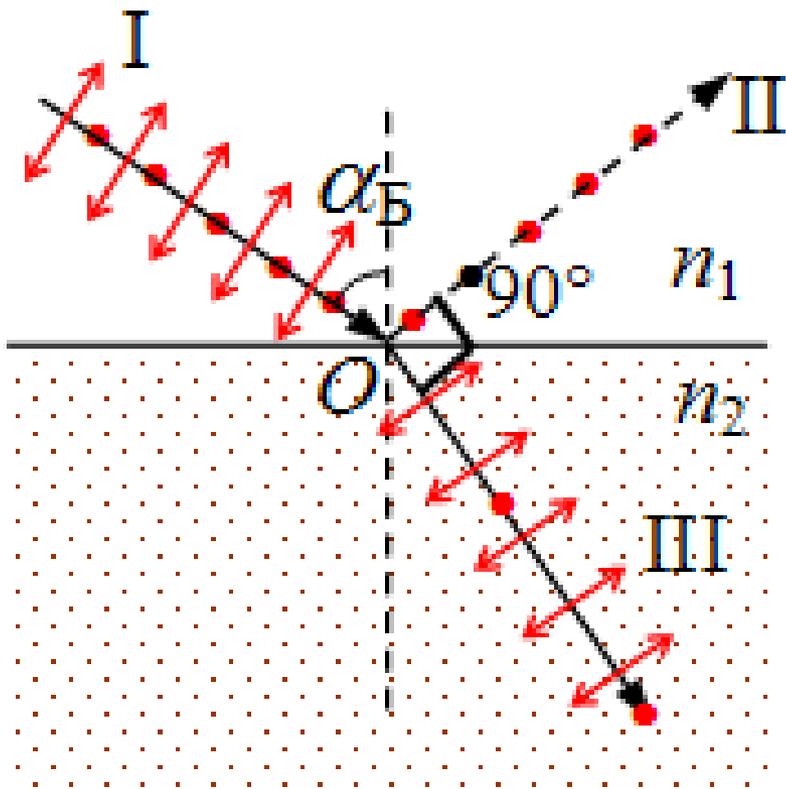
Поляризация при рассеянии света



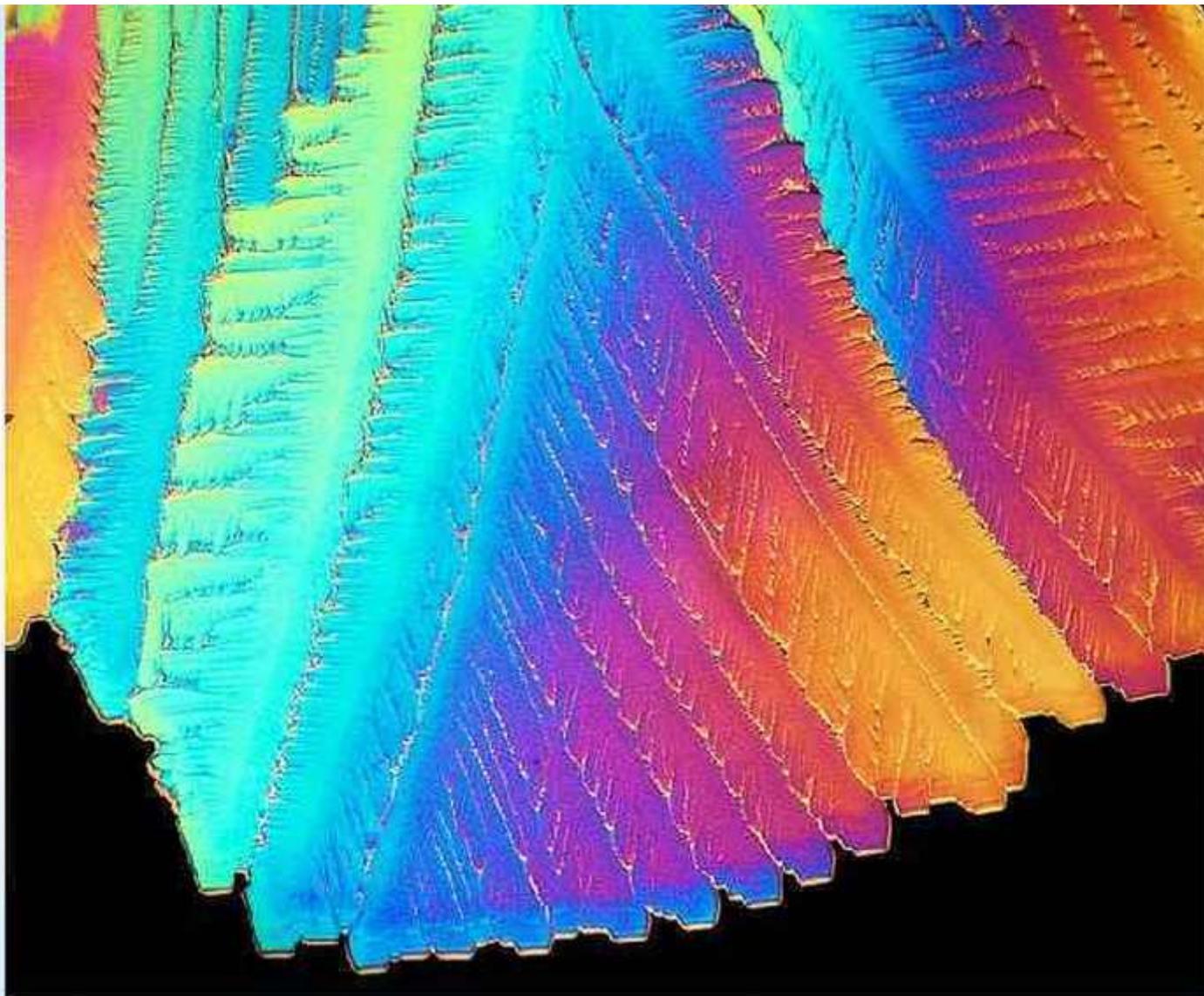
Рассеяние Рэля и рассеяние Ми (G. Mie)



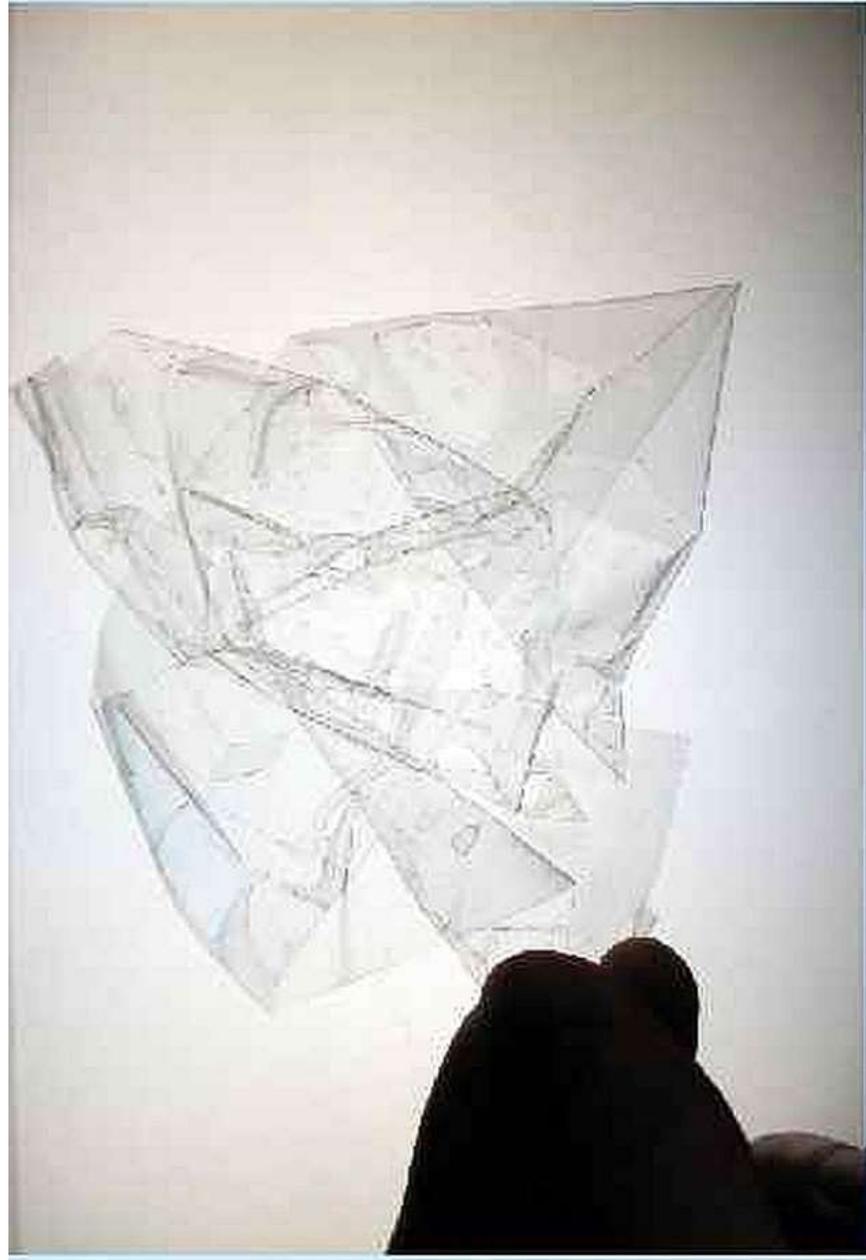
Поляризация при отражении и преломлении света

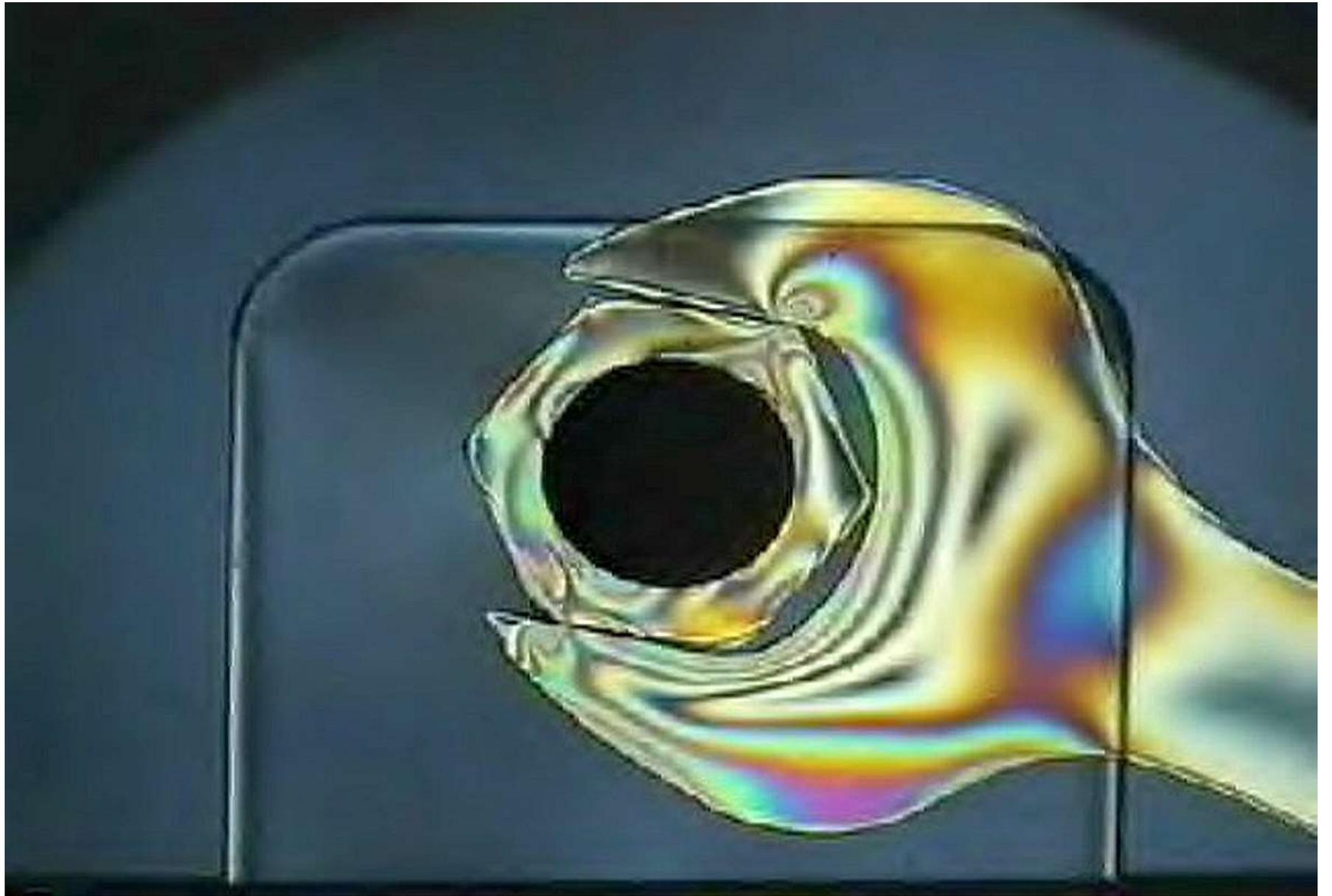


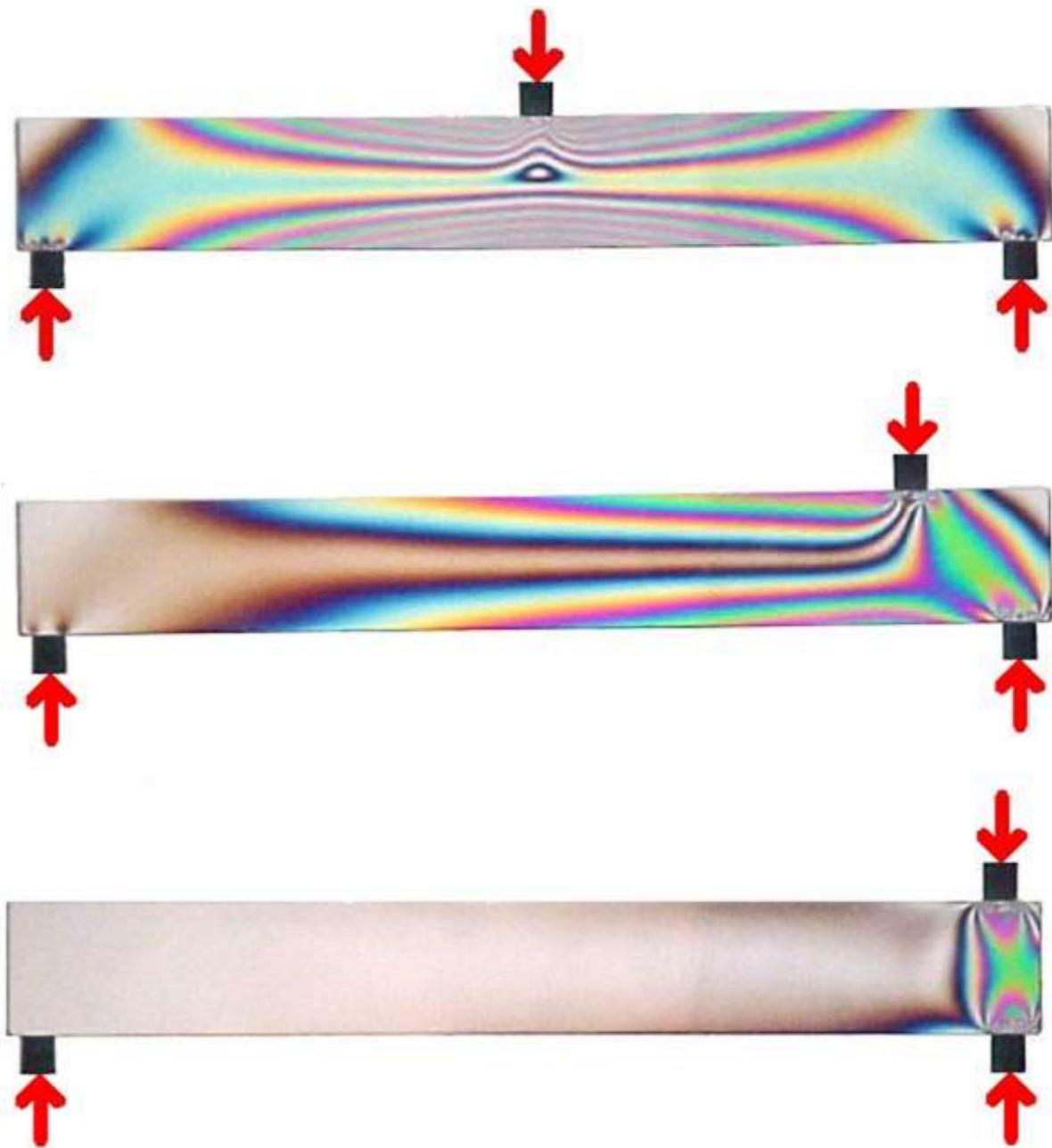
Лекция 14. Искусственная анизотропия и Оптическая активность

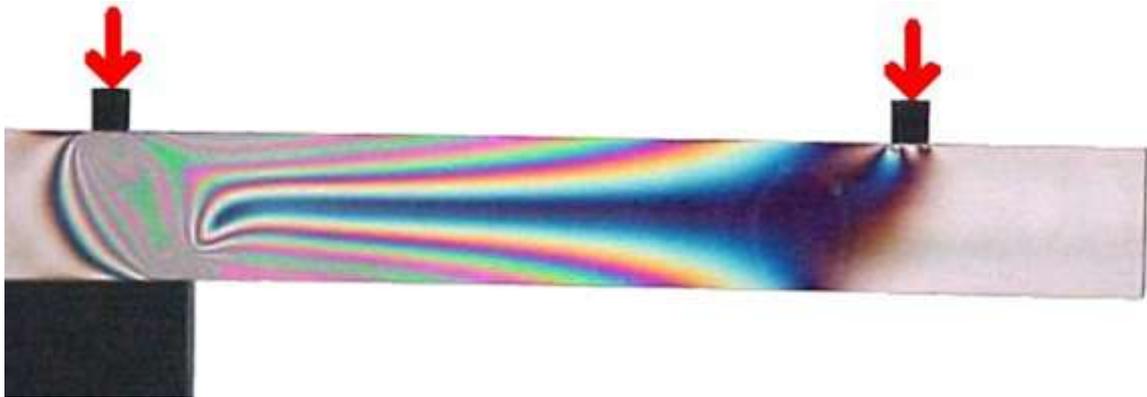
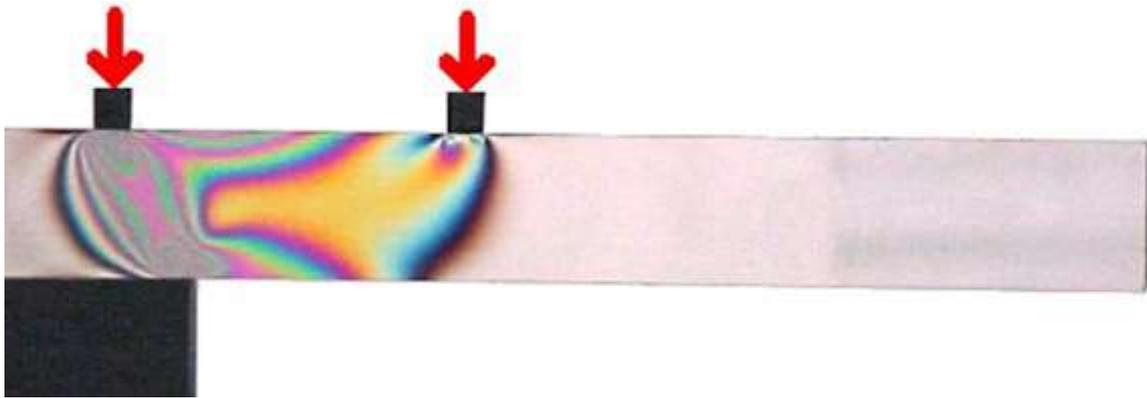
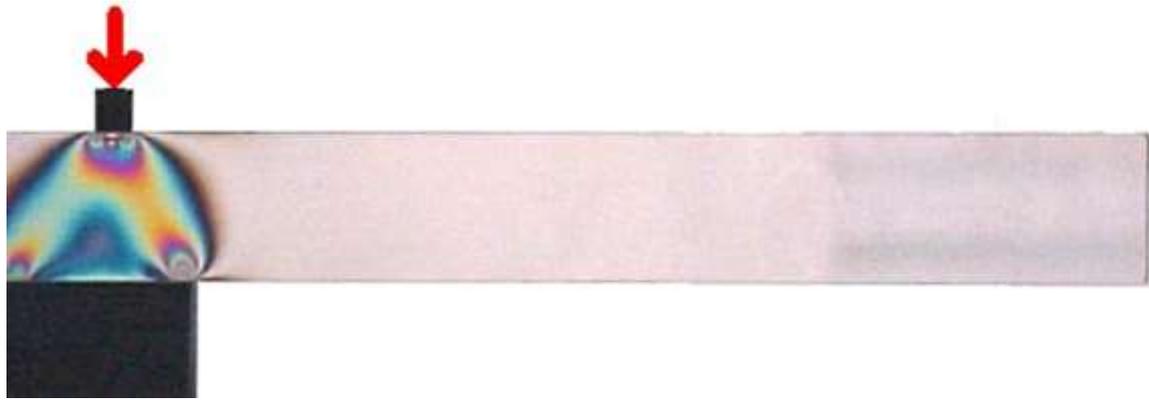


Анизотропный кристалл лимонной кислоты (увеличение 200×).



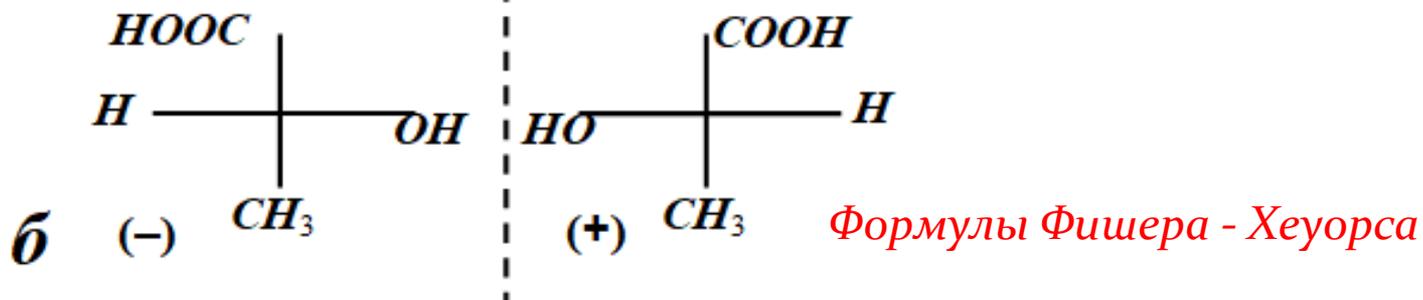
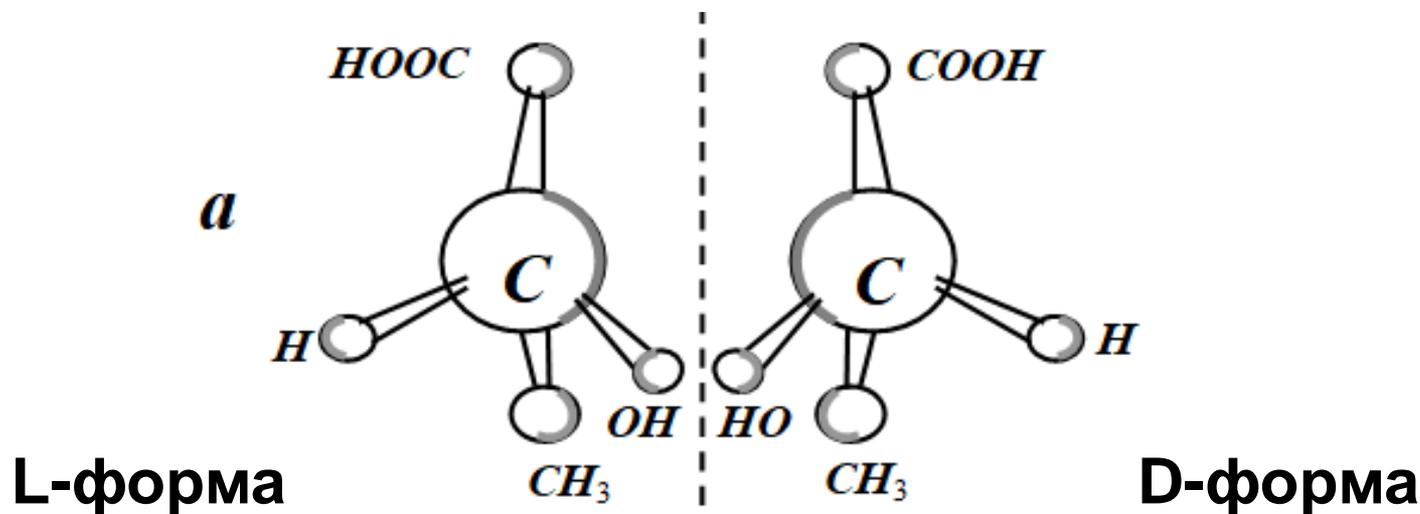






Оптическая активность

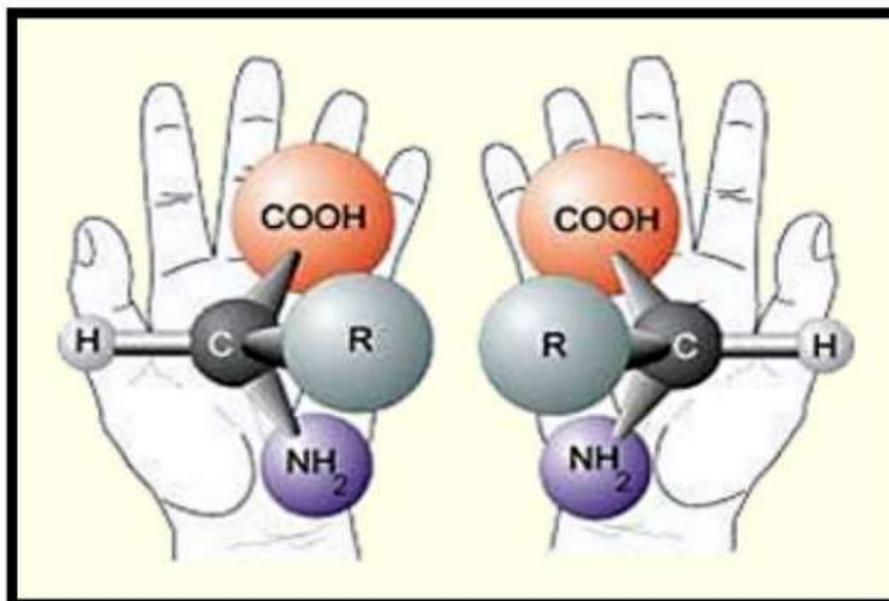
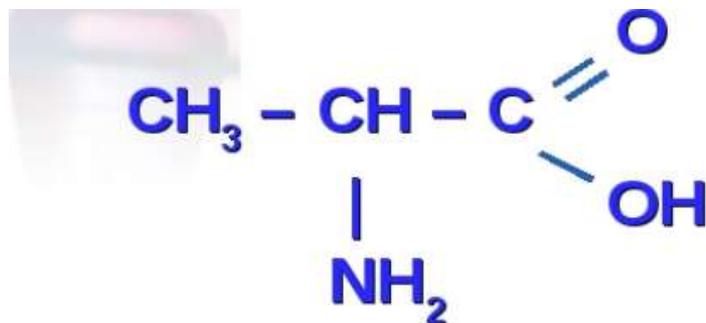
Молочная кислота: $\text{CH}_3 - \text{CHOH} - \text{COOH}$



Оптические изомеры

Оптическая активность

α -Аминопропионовая кислота – аланин



L - Аланин

D - Аланин

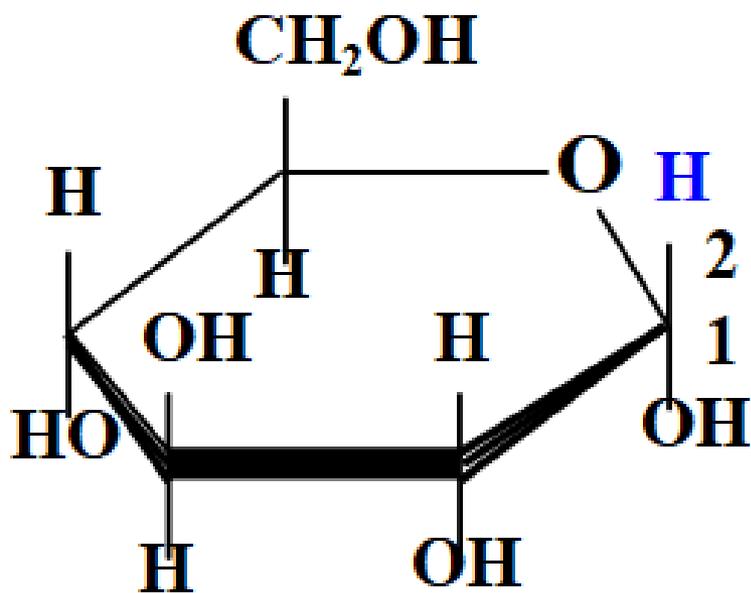
Оптическая активность

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

$[\alpha]$ – удельная оптическая активность

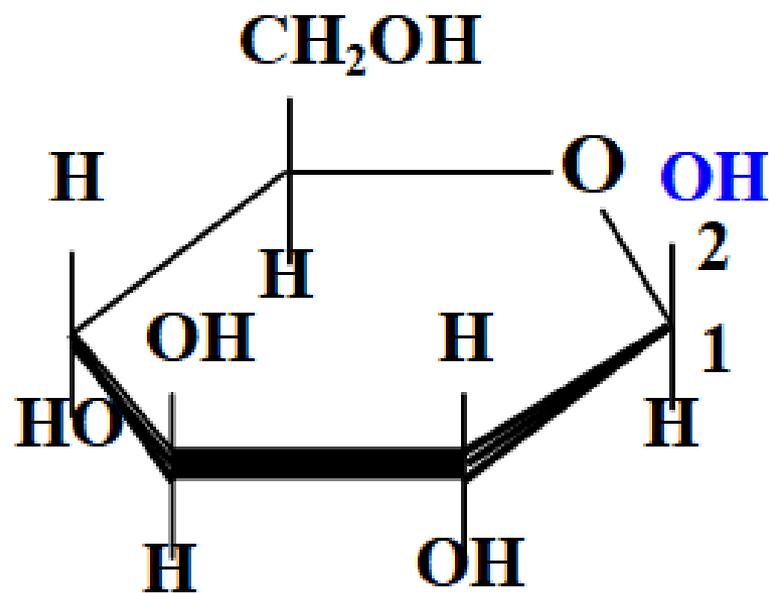
| Вещество | Удельное вращение $[\alpha]^D$ |
|---|--------------------------------|
| Молочная кислота | $\pm 3,82^\circ$ |
| Сахар тростниковый $C_{12}H_{22}O_{11}$ | $+66,4^\circ$ |
| Сахар виноградный $C_6H_{12}O_6$ | $+52,6^\circ$ |
| Сахар фруктовый $C_6H_{12}O_6$ | $-91,9^\circ$ |

Поляриметрия, стереохимия, ...



***α* - глюкоза**

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

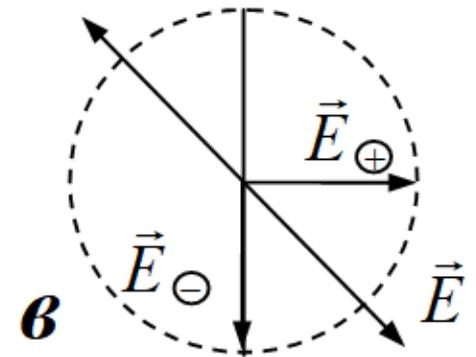
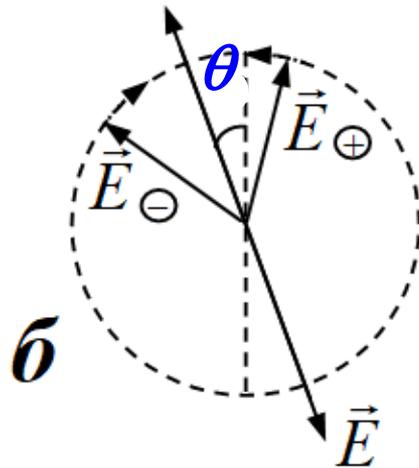
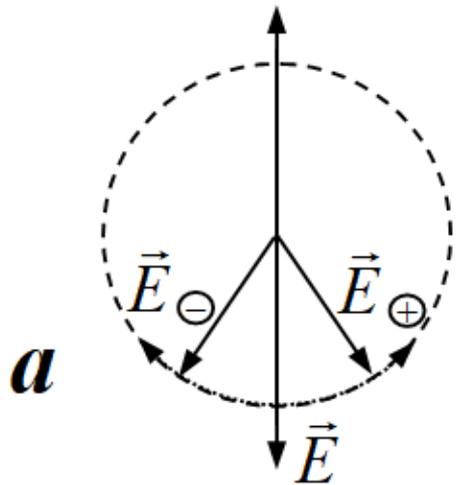


***β* - глюкоза**

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

Удельное вращение

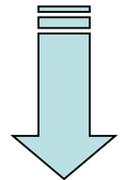
Объяснение оптической активности – гипотеза Френеля



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

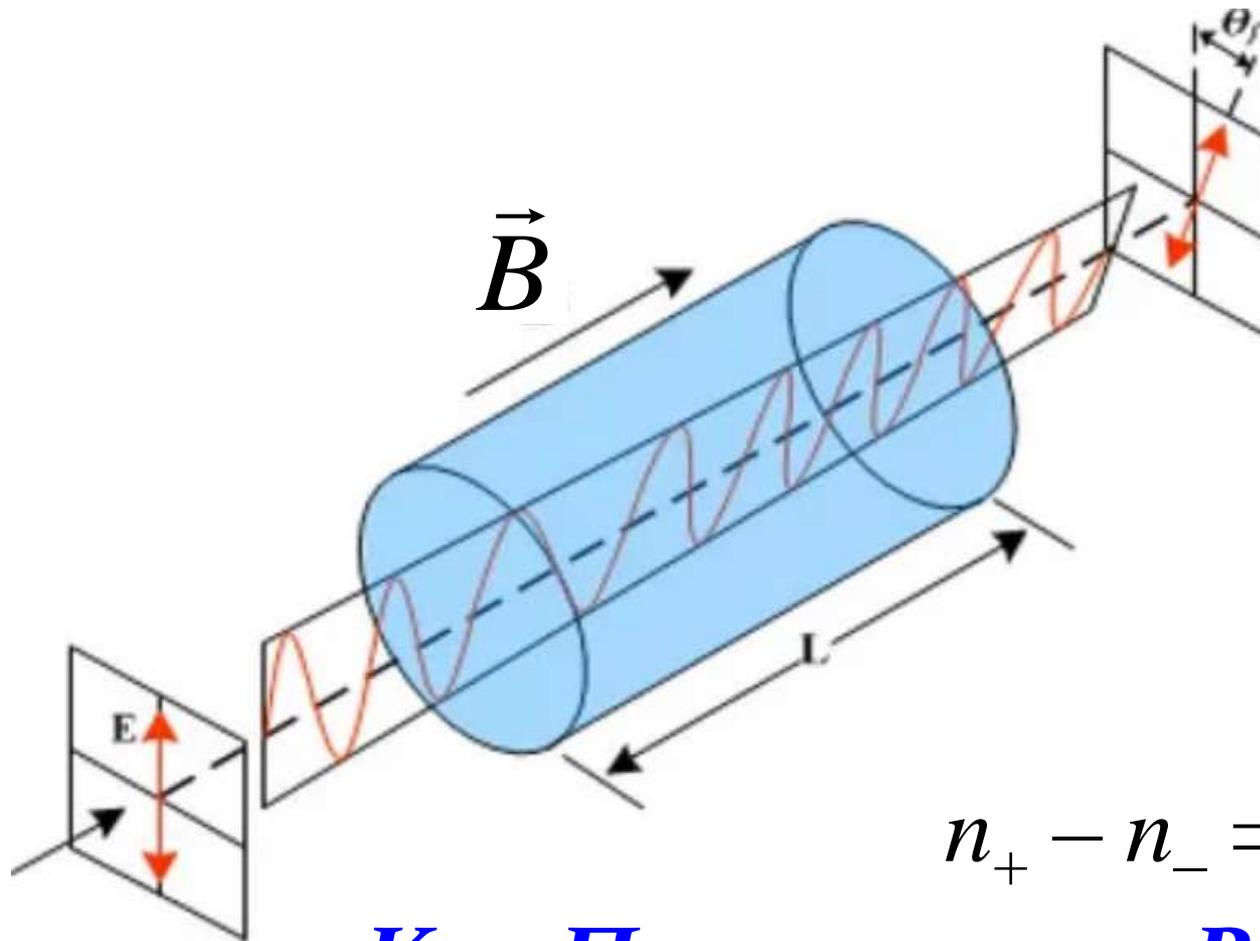
$$\theta = \frac{\Delta}{\lambda} \cdot \pi$$

$$\Delta = \lambda/4$$



$$\theta = \pi/4$$

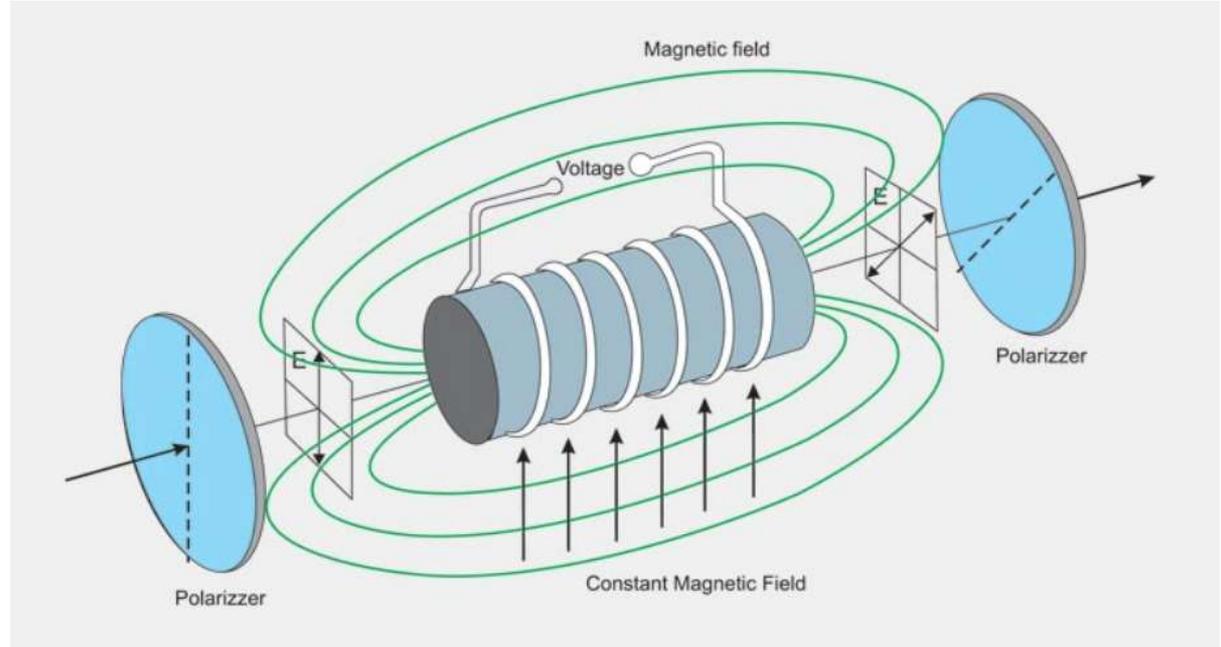
Наведённая оптическая активность - Эффект Фарадея



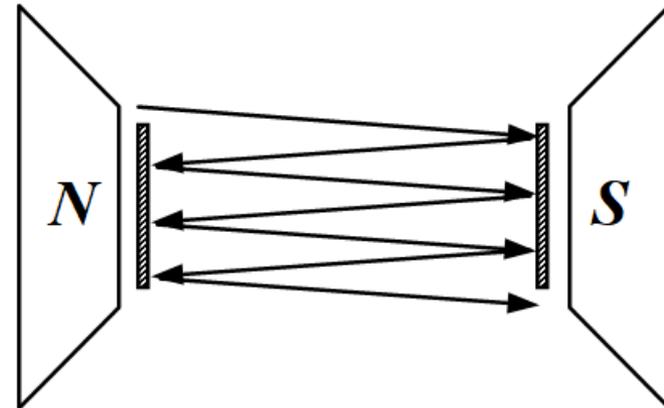
$$n_+ - n_- = K_5 \cdot B l$$

K_5 - Постоянная Верде

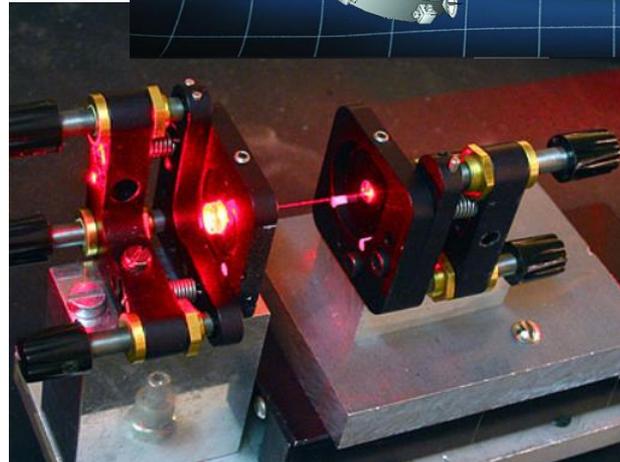
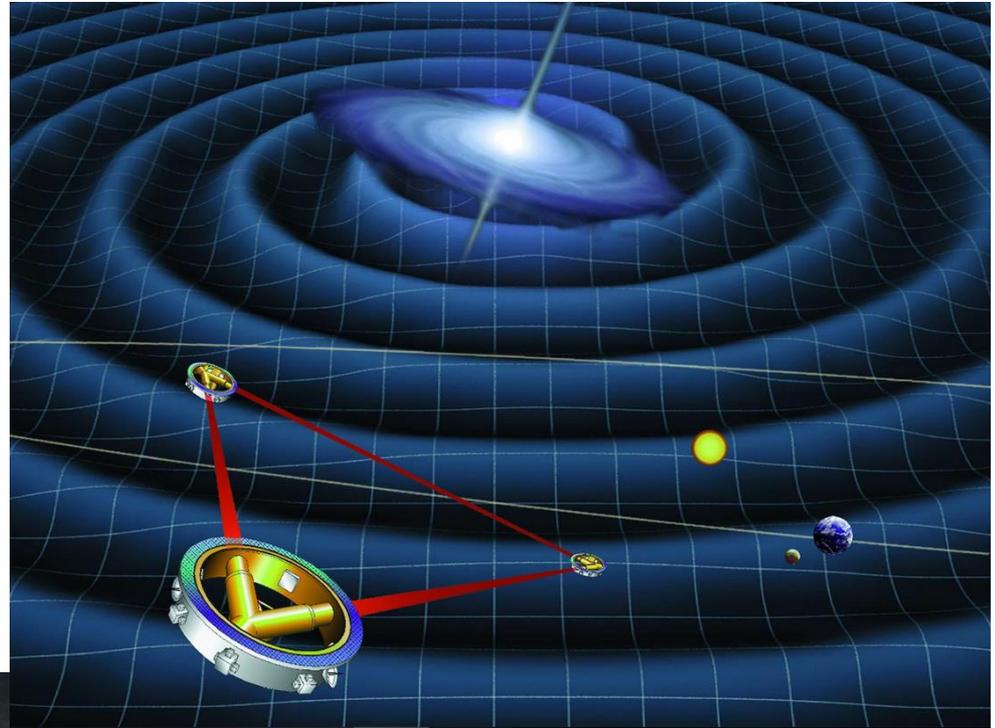
Наведённая оптическая активность Эффект Фарадея



Установка Фарадея



Лекция 15. Интерференционные приборы и современная наука



Интерференционные приборы

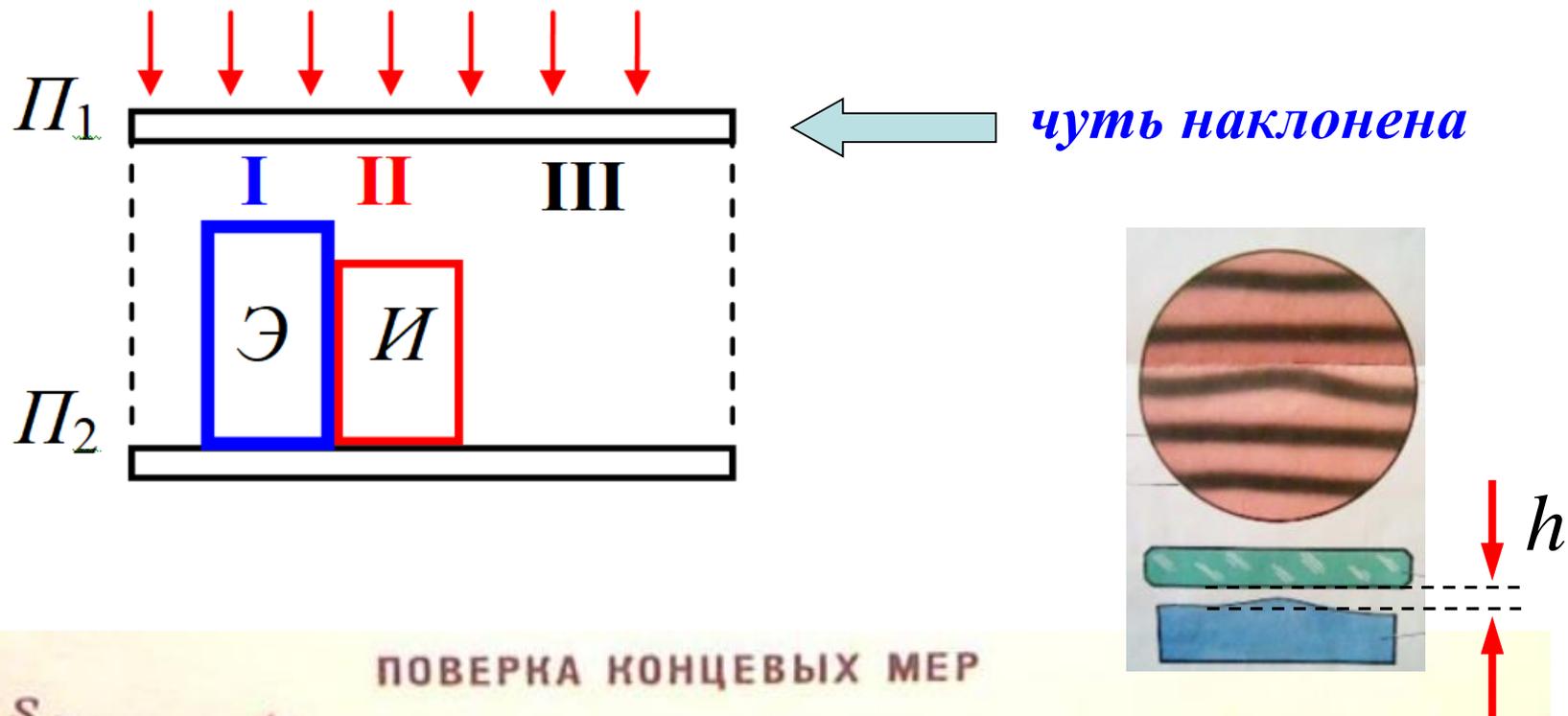
$$l_1 n_1 - l_2 n_2 = m \lambda$$

Компараторы
 $\Delta h - ?$

Рефрактометры
 $\Delta n - ?$

Спектральные аппараты
 $\lambda - ?$

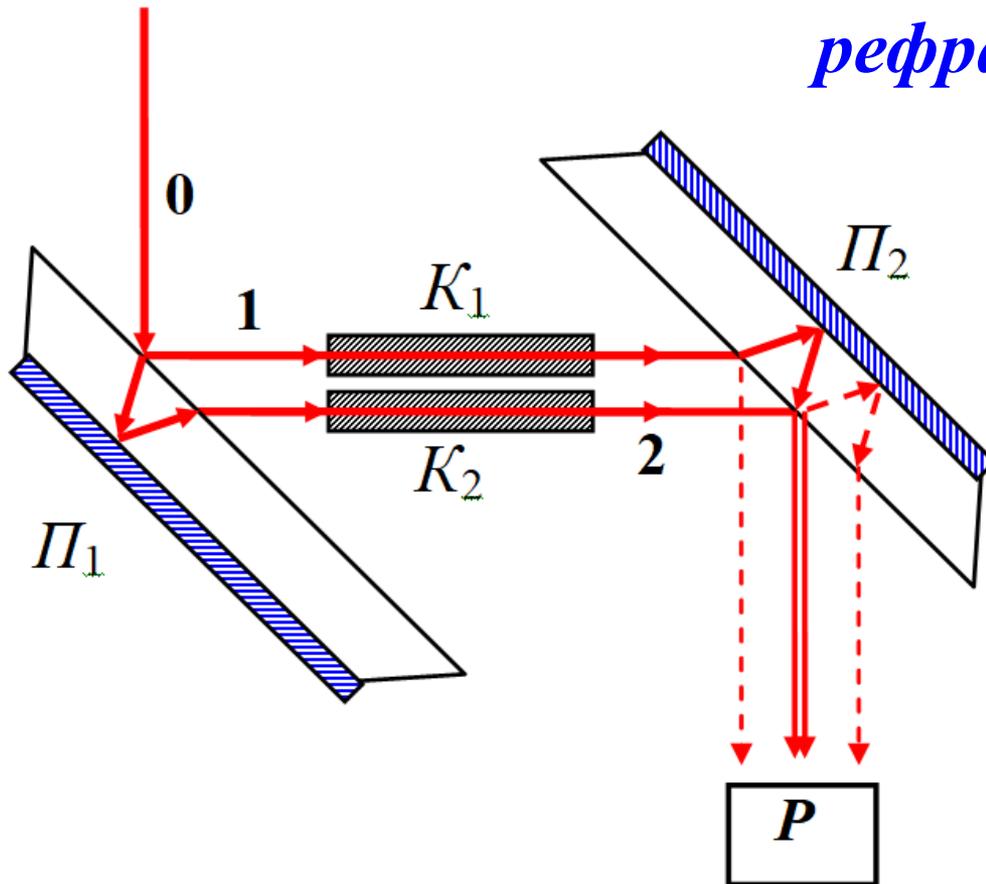
Интерференционные компараторы



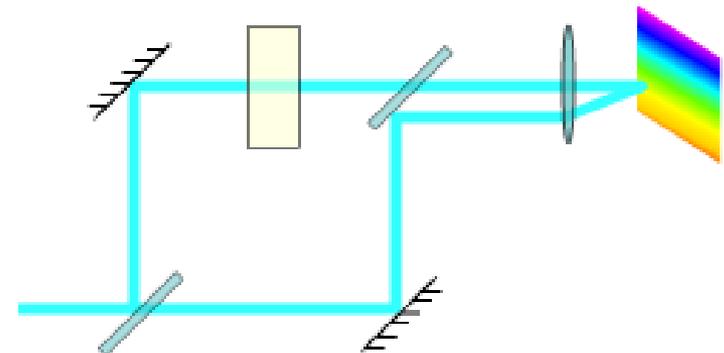
ПОВЕРКА КОНЦЕВЫХ МЕР



Интерференционный рефрактометр Жамена

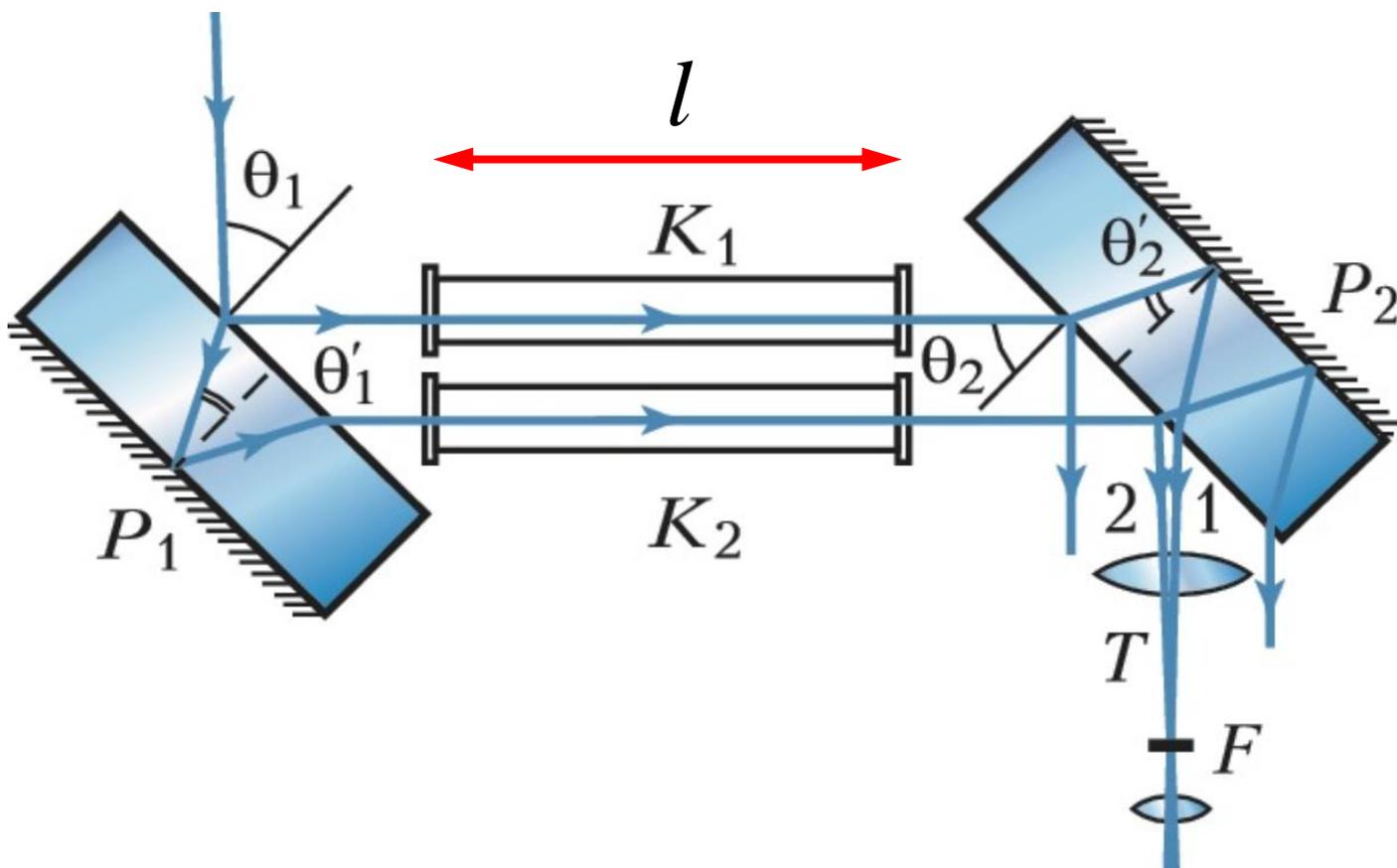


*рефрактометр
Маха - Цандера*

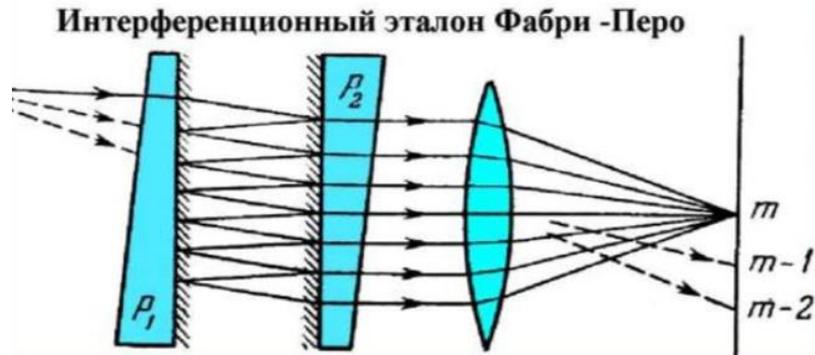


| | | | | |
|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| содержание сахарозы (по весу) | 0,000 % | 1,000 % | 2,000 % | 3,000 % |
| показатель преломления | 1,33299 | 1,33443 | 1,33588 | 1,33733 |

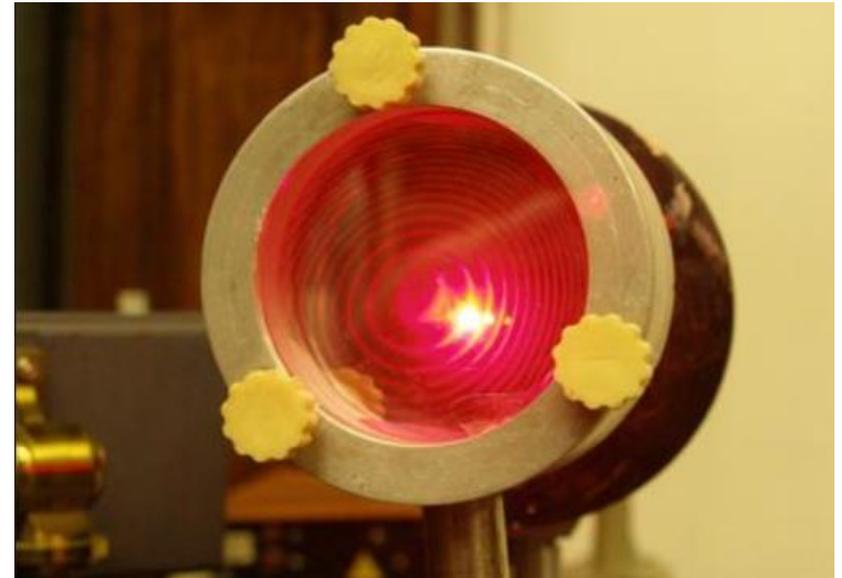
Интерферометр Жамена



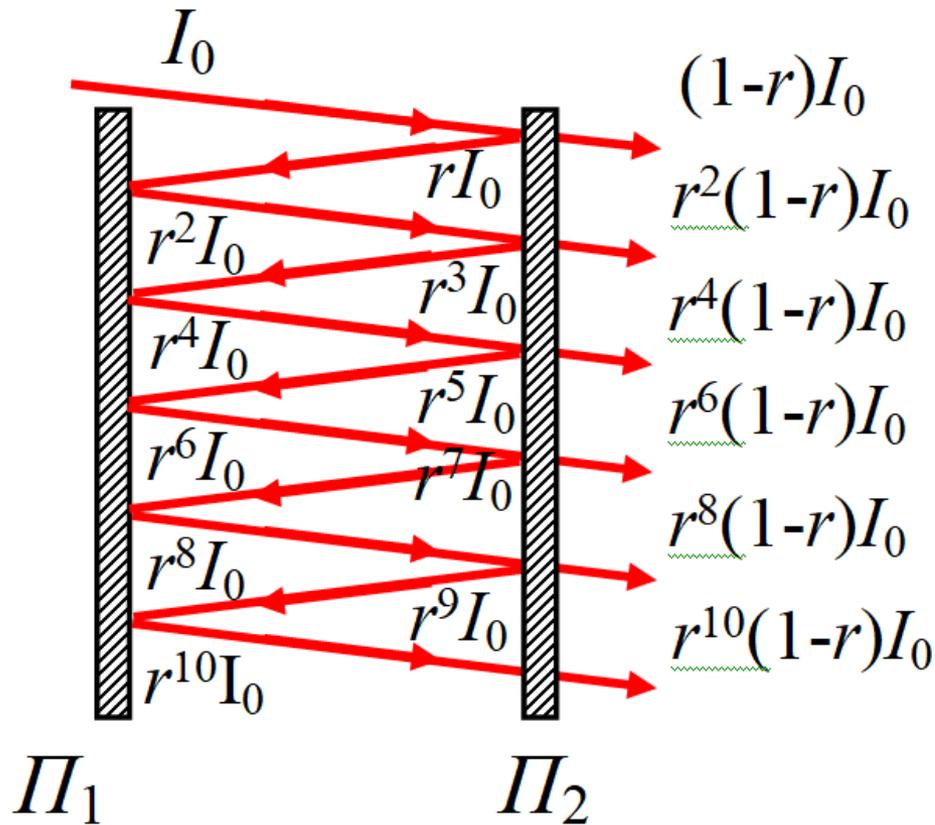
Спектральный аппарат - интерферометр Фабри - Перо



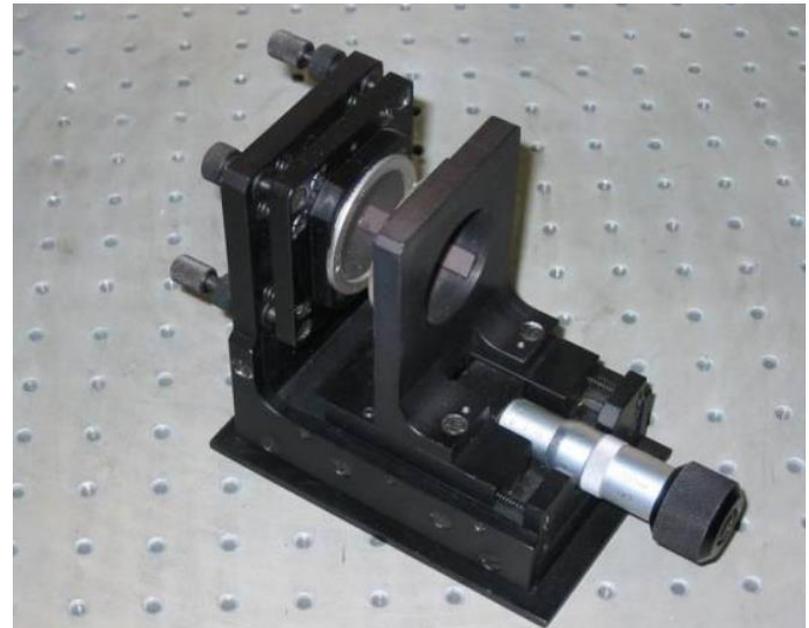
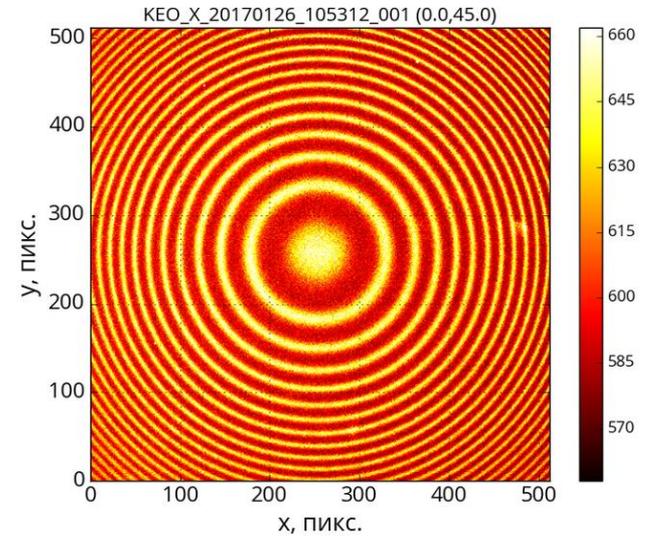
Отражение света от двух параллельных плоскостей приводит к образованию локализованных в бесконечности интерференционных полос равного наклона.



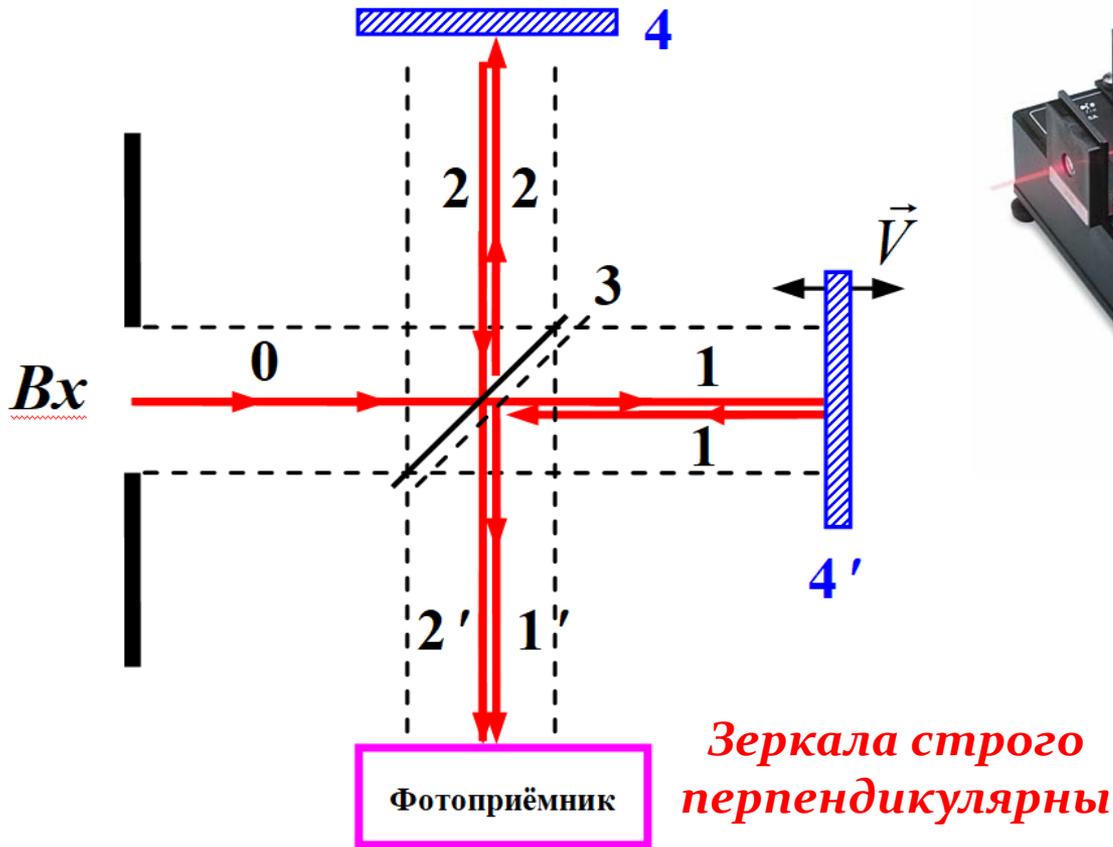
Интерферометр (эталон, резонатор) Фабри - Перо



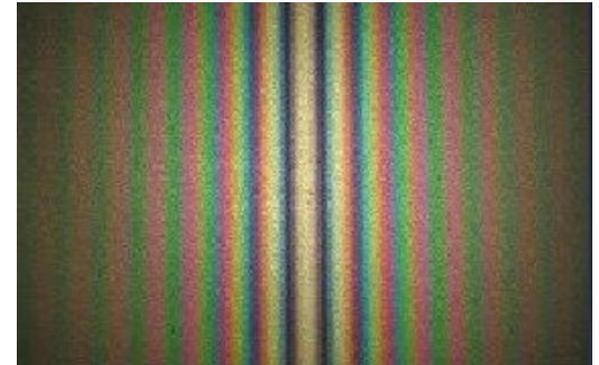
$$\left. \begin{array}{l} N \sim 10 \div 100 \\ m = 2h/\lambda \sim 10^5 \end{array} \right\} R = mN$$



Интерферометр Майкельсона



Зеркала НЕ строго перпендикулярны



Принципы Фурье-спектроскопии

Одна компонента в спектре (ω_1 и ω_2):

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

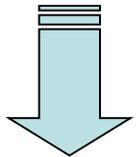
*переменная
составляющая:*

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

Две компоненты в спектре (ω_1 и ω_2):

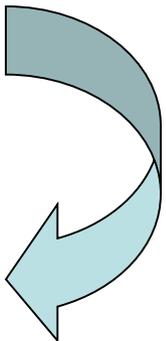
$$\tilde{I}(\tau) = I_1(\omega) \cos \omega_1\tau + I_2(\omega) \cos \omega_2\tau$$

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

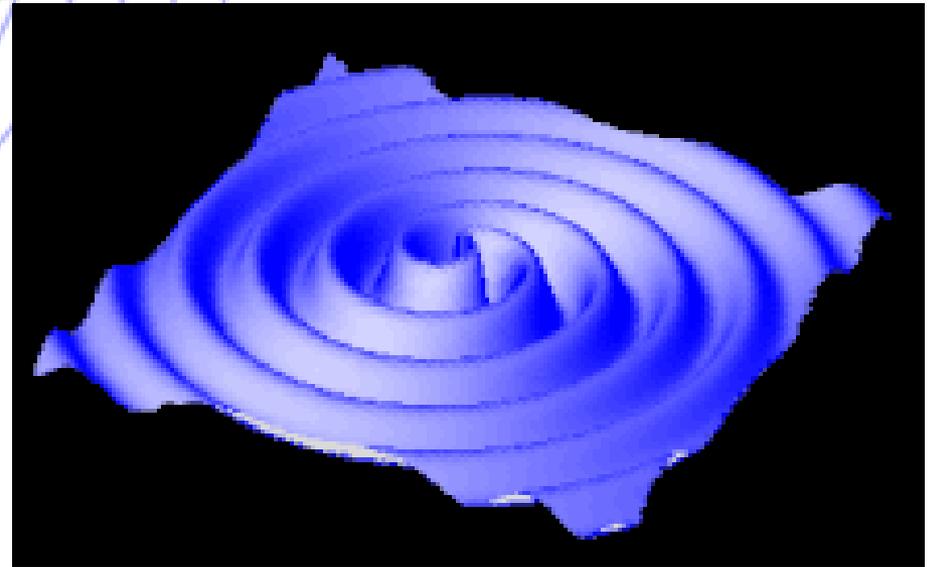
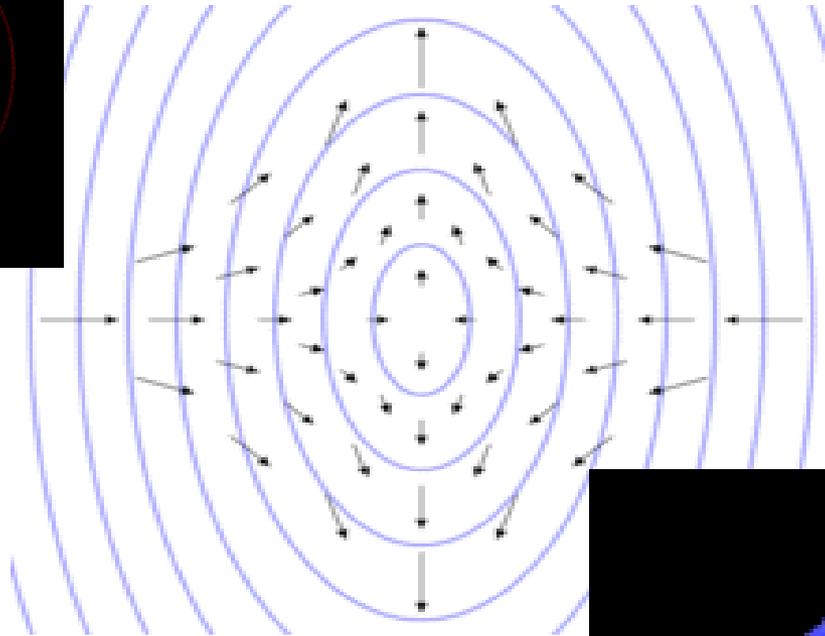
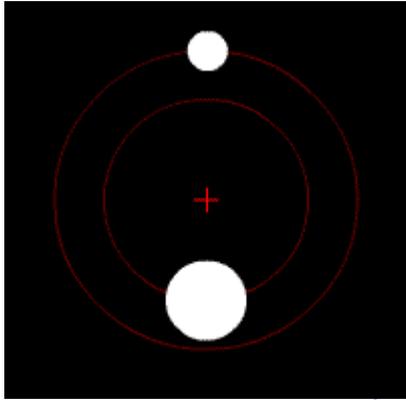


Спектр:

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

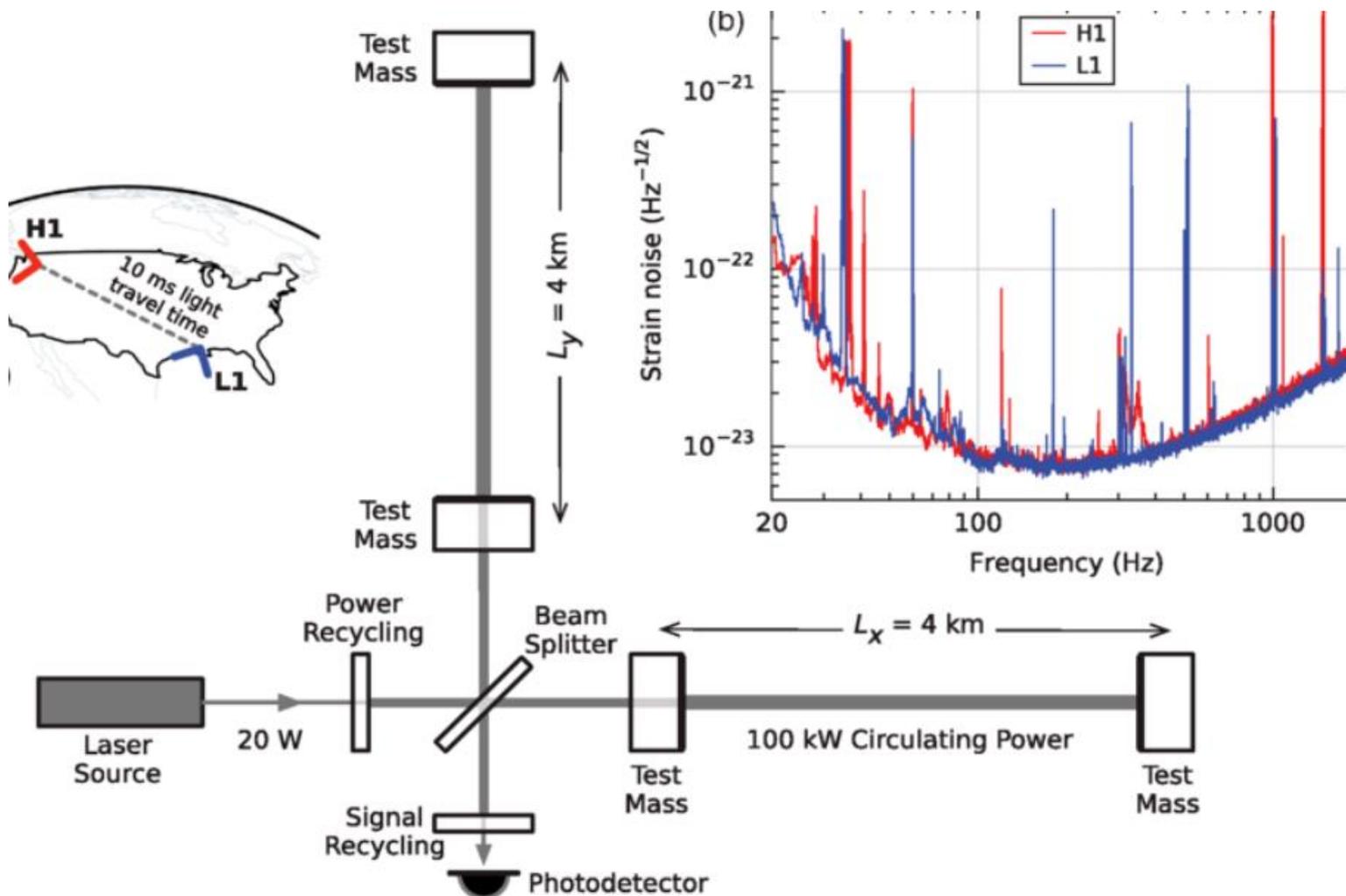


Источники гравитационных волн во вселенной



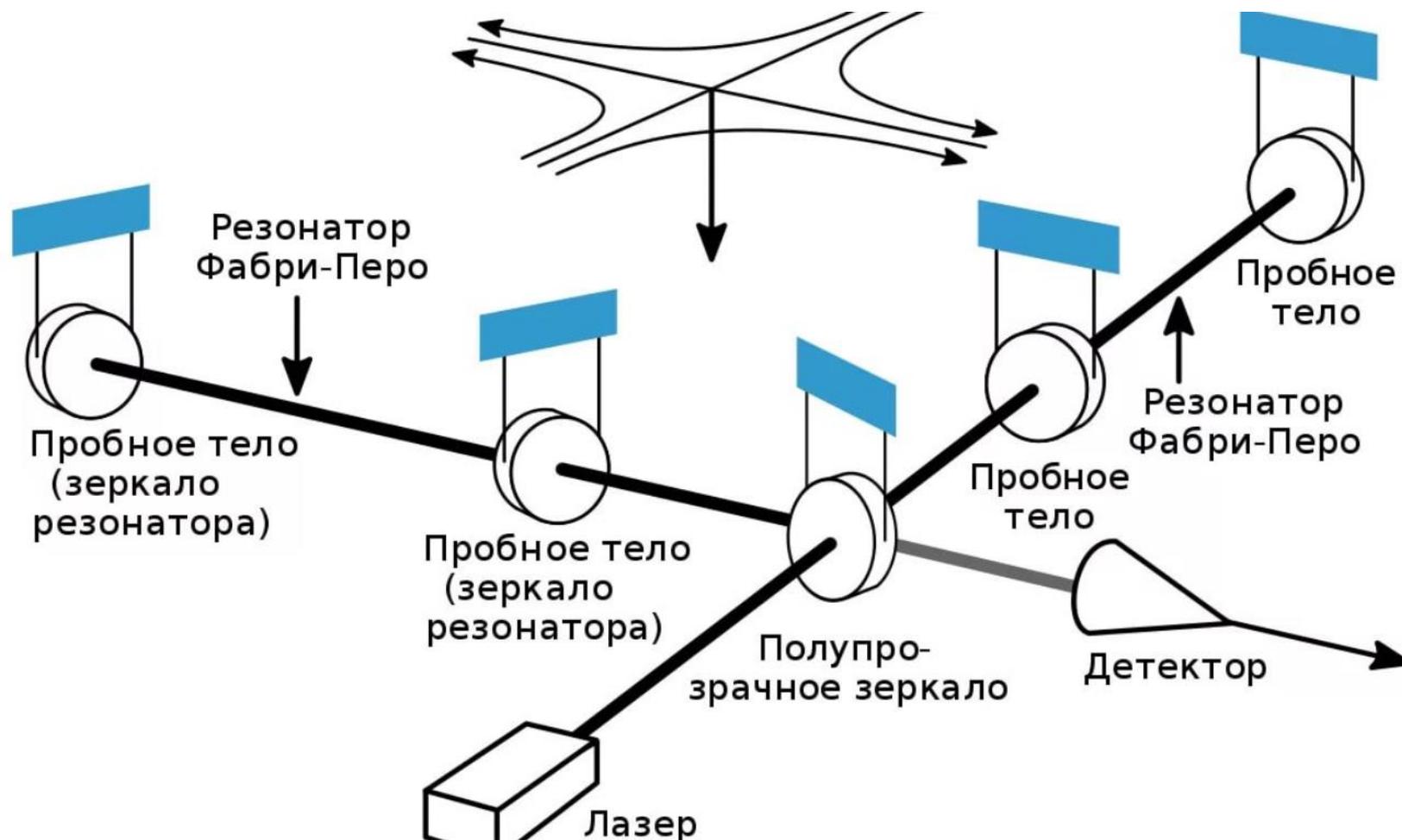
Проект LIGO – “поймаем гравитационные волны” ☺

Light Interferometer Gravitational-Wave Observatory



Принцип устройства гравитационной антенны проекта LIGO

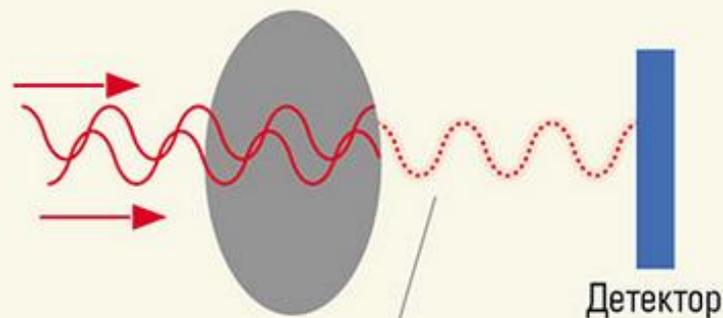
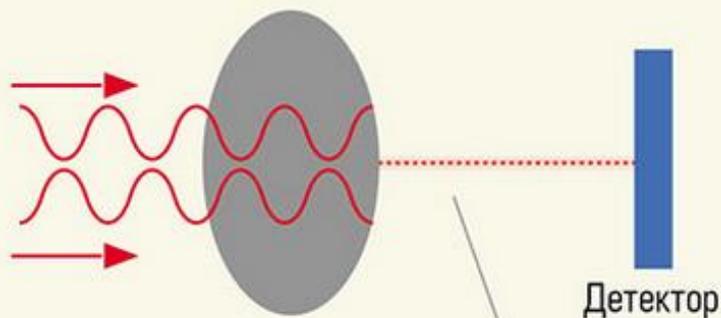
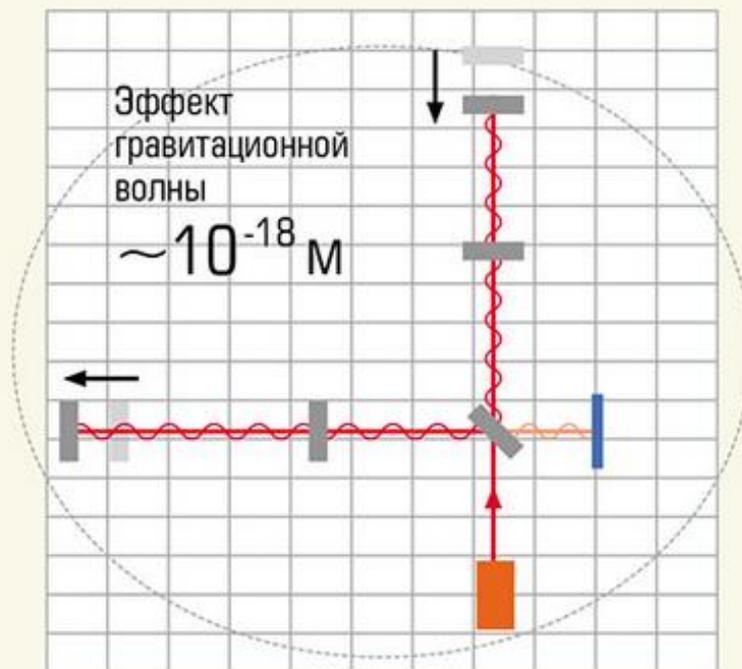
LIGO Antenna



Упрощённая оптическая схема антенны LIGO

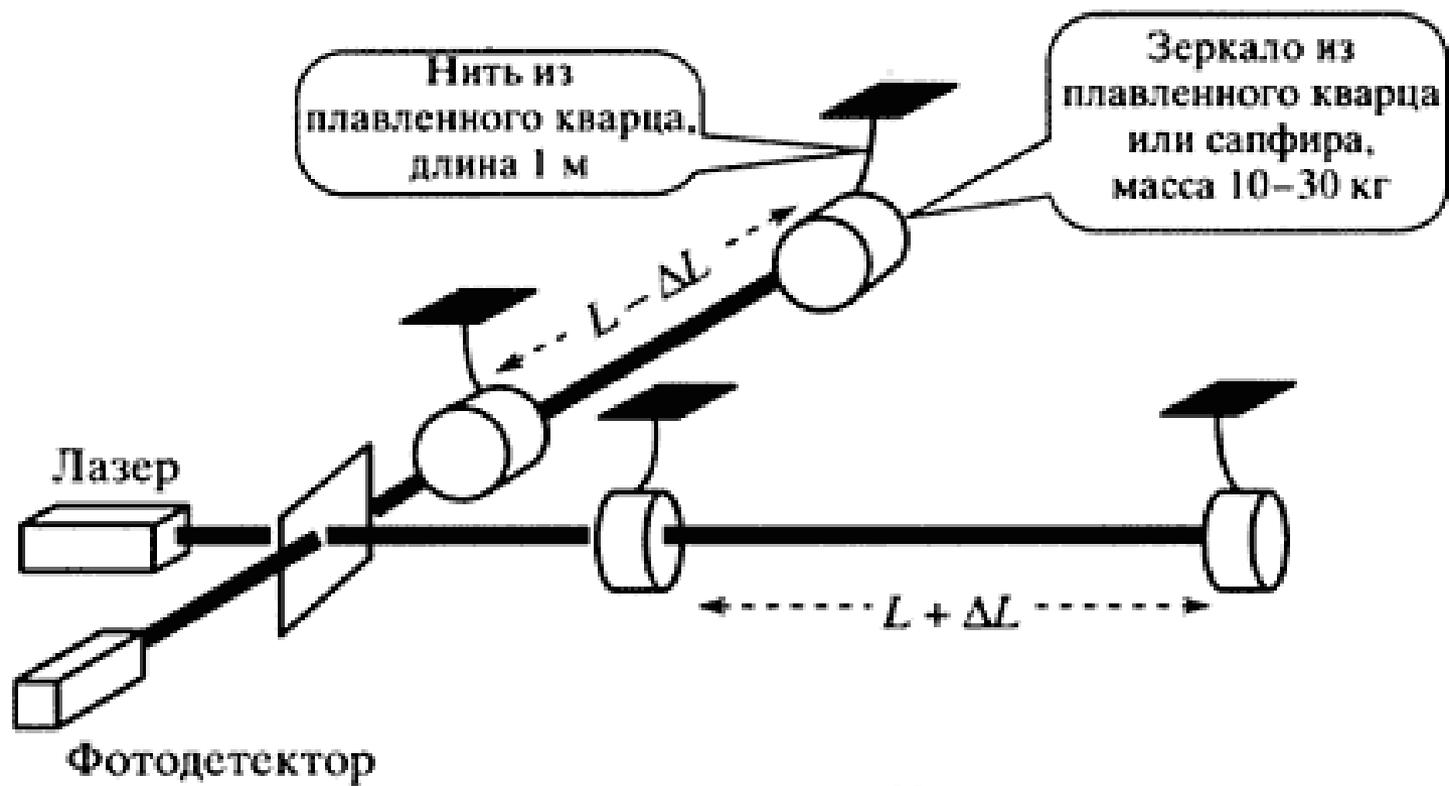
Влияние гравитационной волны на плечи интерферометра

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

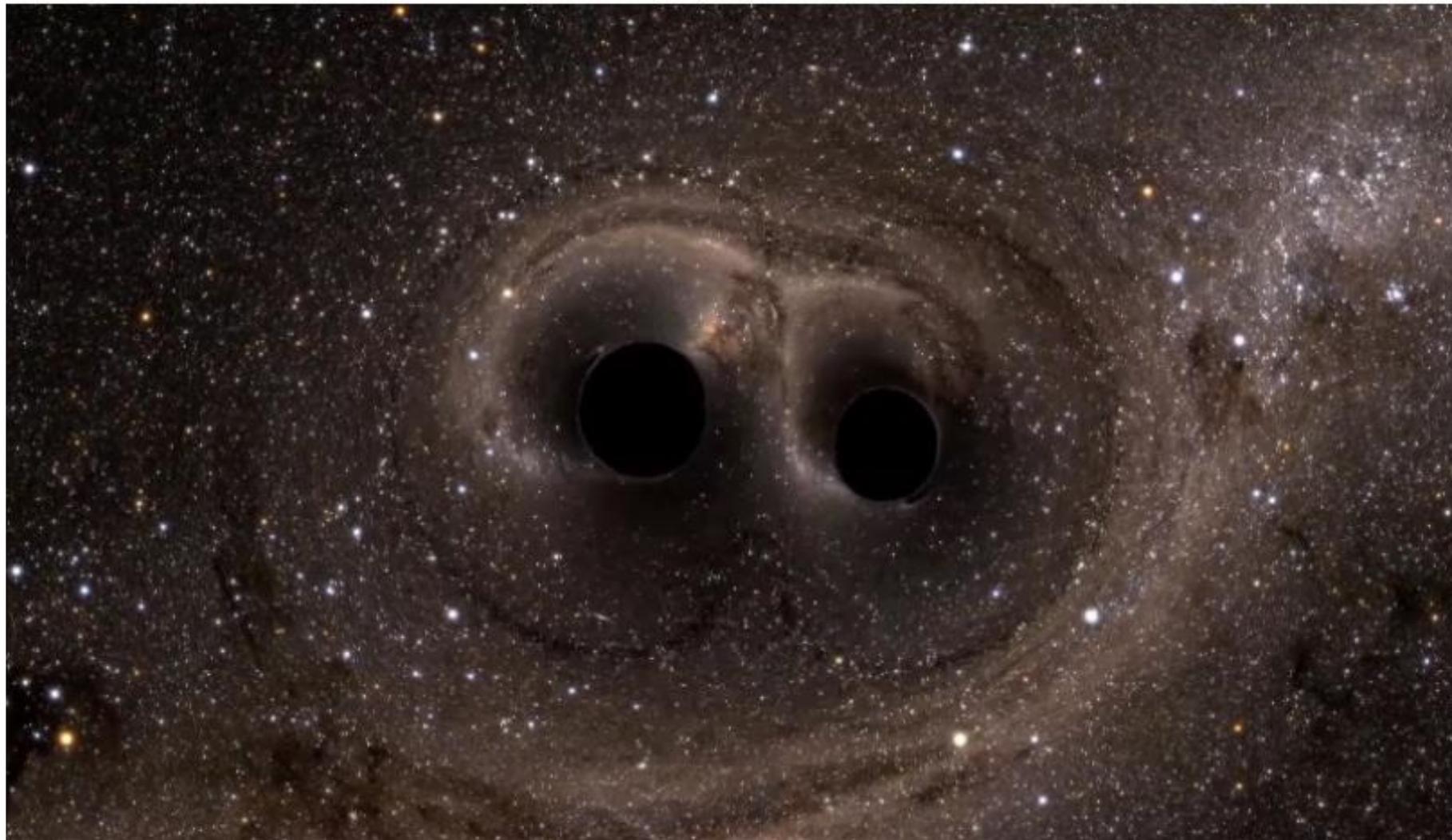
«Рукава» интерферометра LIGO



Пробное тело антенны LIGO



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



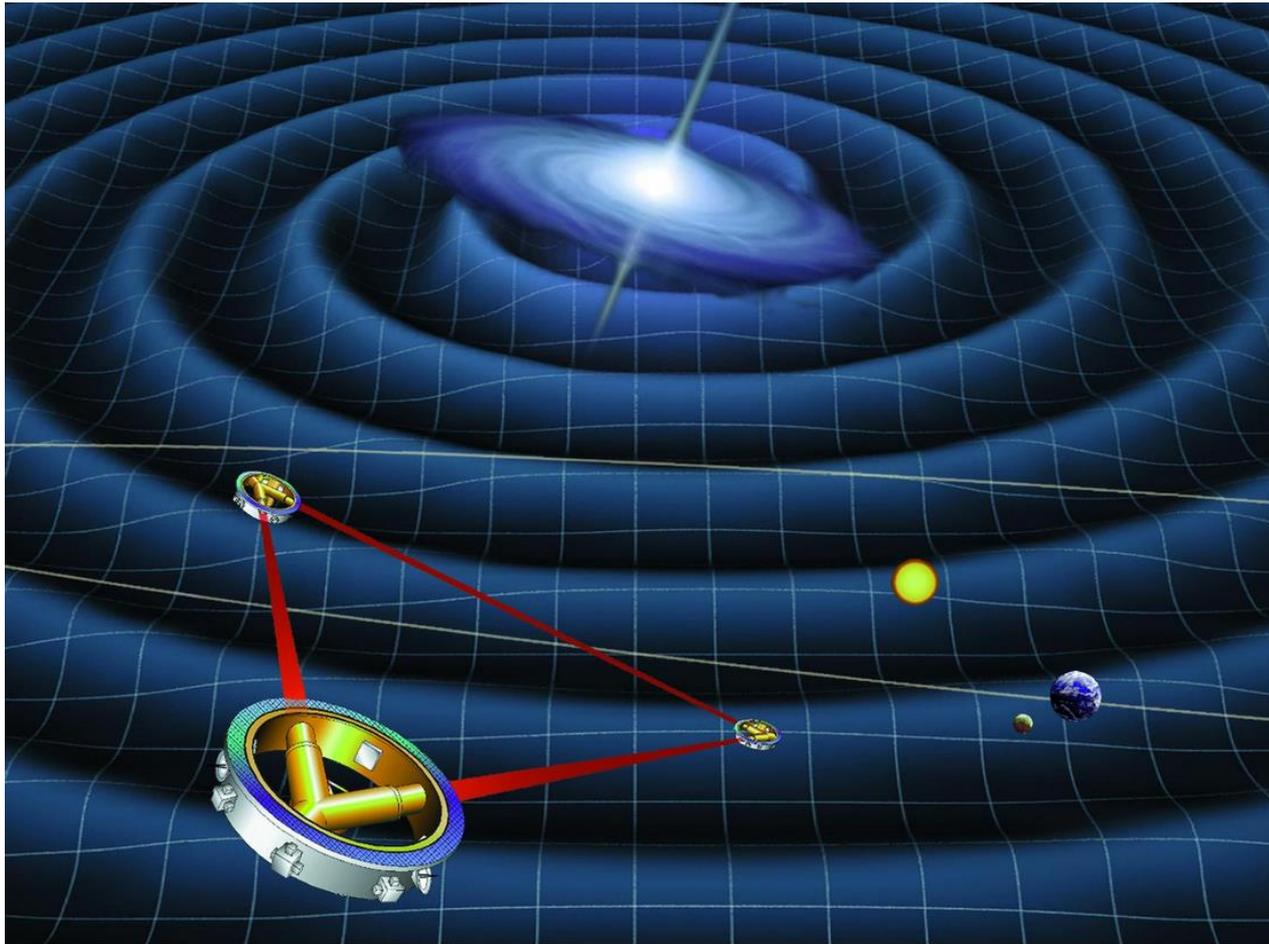
Северный X-рукав интерферометра LIGO (Хэнфорд)



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

