Лекция 23

5. Оптика

5.2. Волновая оптика

Интерференция света. Принцип суперпозиции волн. Монохроматичность и когерентность. Опыт Юнга. Бипризма Френеля. Оптическая длина пути. Расчет интерференционной картины от двух источников. Интерференция в тонких пленках. Полосы равной толщины. Кольца Ньютона. Полосы равного наклона. Интерференционный рефрактометр. Интерферометр Маха-Цендера, Майкельсона. Просветление оптики.

Интерференция

Интерференция (от лат. *inter* — межу собой, взаимно, и *ferio*- касаюсь, ударяю) (наложение) волн – явление усиления амплитуды колебаний в одних точках пространства и ее ослабления в других в результате наложения двух или более приходящих туда волн.

Интерференция света

Интерференция света – такое его перераспределение в пространстве, в результате которого появляются максимумы и минимумы освещенности.

Гюйгенс: "*Одно из чудеснейших свойств света состоит в том, что когда он приходит из разных или даже противоположных сторон, лучи его производят свое действие, проходя один сквозь другой без всякой помехи. Этим вызывается то, что несколько зрителей могут одновременно видеть через одно и то же отверстие различные предметы*".

$$E = E_m \cos(\omega t - kx) \qquad H = H_m \cos(\omega t - kx)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{\mathrm{v}}$$

Поскольку фотохимическое, фотоэлектрическое и физиологическое действие оказывает вектор электрической напряженности, то его и стали называть световым.

По принципу суперпозиции амплитуды волн должны складываться, поэтому в некоторых точках волны могут и погасить друг друга.

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \ldots$$

Необходимые условия интерференции:

1) волны монохроматичны; 2) волны когерентны.

Монохроматичность света

Для наблюдения постоянной интерференционной картины необходимы волны одинаковой частоты (длины волны).

Это условие и называется монохроматичностью излучения.

Сложим две волны одного направления. По теореме косинусов:

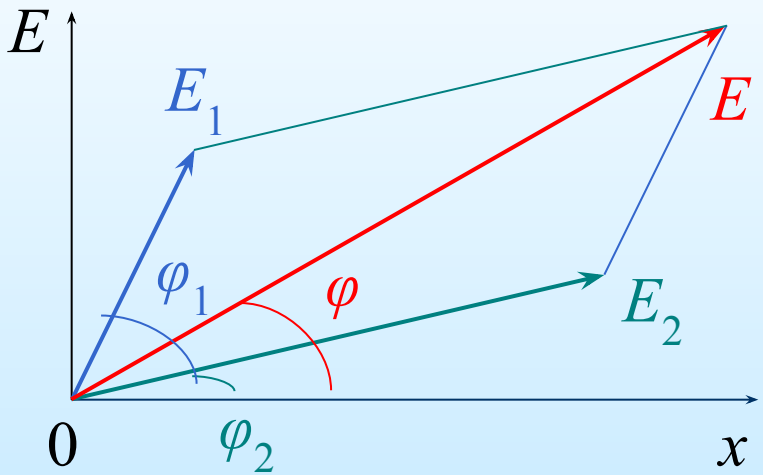
$$\left.\begin{aligned} &E_1 \cos(\omega t + \varphi_1) \\ &E_2 \cos(\omega t + \varphi_2) \end{aligned}\right\} \Rightarrow \quad E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1)$$

Интенсивность света

Интенсивность света – среднее по времени значение светового потока.

$$I \sim E^2$$

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos(\varphi_2 - \varphi_1)$$



$$\boxed{I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos(\varphi_2 - \varphi_1)}$$

Излучение светящегося тела слагается из волн, испускаемых атомами тела. Излучение отдельного атома ~10^{-8} сек. За это время образуется цуг волн длиной ~ 3 м. Через некоторое время атом испускает новый цуг волн уже с другой фазой. Одновременно излучает очень много атомов. Их излучение, накладываясь друг на друга, образует световую волну, фаза колебаний которой хаотически изменяется.

У излучения в каждой точке пространства <u>разность фаз</u> колебаний $\varphi = (\varphi_2 - \varphi_1)$ непрерывно меняется хаотическим образом !

$$\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = 0 \quad \Rightarrow \quad \boxed{I = I_1 + I_2}$$

Когерентность света

Волны, разность фаз колебаний которых остается постоянной во времени, называются когерентными. Источники таких волн тоже когерентны.

$$-1 < \cos(\varphi_2 - \varphi_1) < 1$$

$$I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} < I < I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$$

$$I_1 = I_2 = I$$

$$0 < I < 4I$$

Интерференция света

Интерференция света – такое перераспределение светового потока в пространстве, в результате которого появляются максимумы и минимумы интенсивности света.

Единственный способ получить когерентные волны – разделить каким-либо способом (с помощью преломления, отражения, etc.) волну на две части. Если затем снова наложить их друг на друга, то получится интерференция. Новый способ – лазерное излучение.

Условие максимумов и минимумов

Пусть после разделения и до встречи волна *1* пройдет путь S_1 в среде с показателем преломления n_1, волна *2* – путь S_2 в среде с показателем преломления n_2.

$$A\cos\omega t \;\rightarrow\; A\cos\omega\left(t-\frac{S_1}{\mathrm{v}_1}\right),\quad A\cos\omega\left(t-\frac{S_2}{\mathrm{v}_2}\right) \;\rightarrow\; \delta=\omega\left(\frac{S_2}{\mathrm{v}_2}-\frac{S_1}{\mathrm{v}_1}\right)=\frac{\omega}{c}\left(S_2n_2-S_1n_1\right)$$

Sn — оптическая длина пути

$\Delta=\left(S_2n_2-S_1n_1\right)$ — оптическая разность хода

$$\frac{\omega}{c}=\frac{2\pi\nu}{c}=\frac{2\pi}{\lambda} \quad \Rightarrow \quad \delta=\frac{\omega}{c}\left(S_2n_2-S_1n_1\right)=\frac{\omega}{c}\Delta=\frac{2\pi}{\lambda}\Delta$$

Условие интерференционного максимума

1) Если оптическая разность хода составит четное число полуволн:

$$\boxed{\Delta=2m\frac{\lambda}{2}} \quad \Rightarrow \quad \delta=\frac{2\pi}{\lambda}\Delta=\frac{2\pi}{\lambda}2m\frac{\lambda}{2}=2\pi m \quad \Rightarrow \quad \cos\delta=1$$

— наблюдается максимум интенсивности.

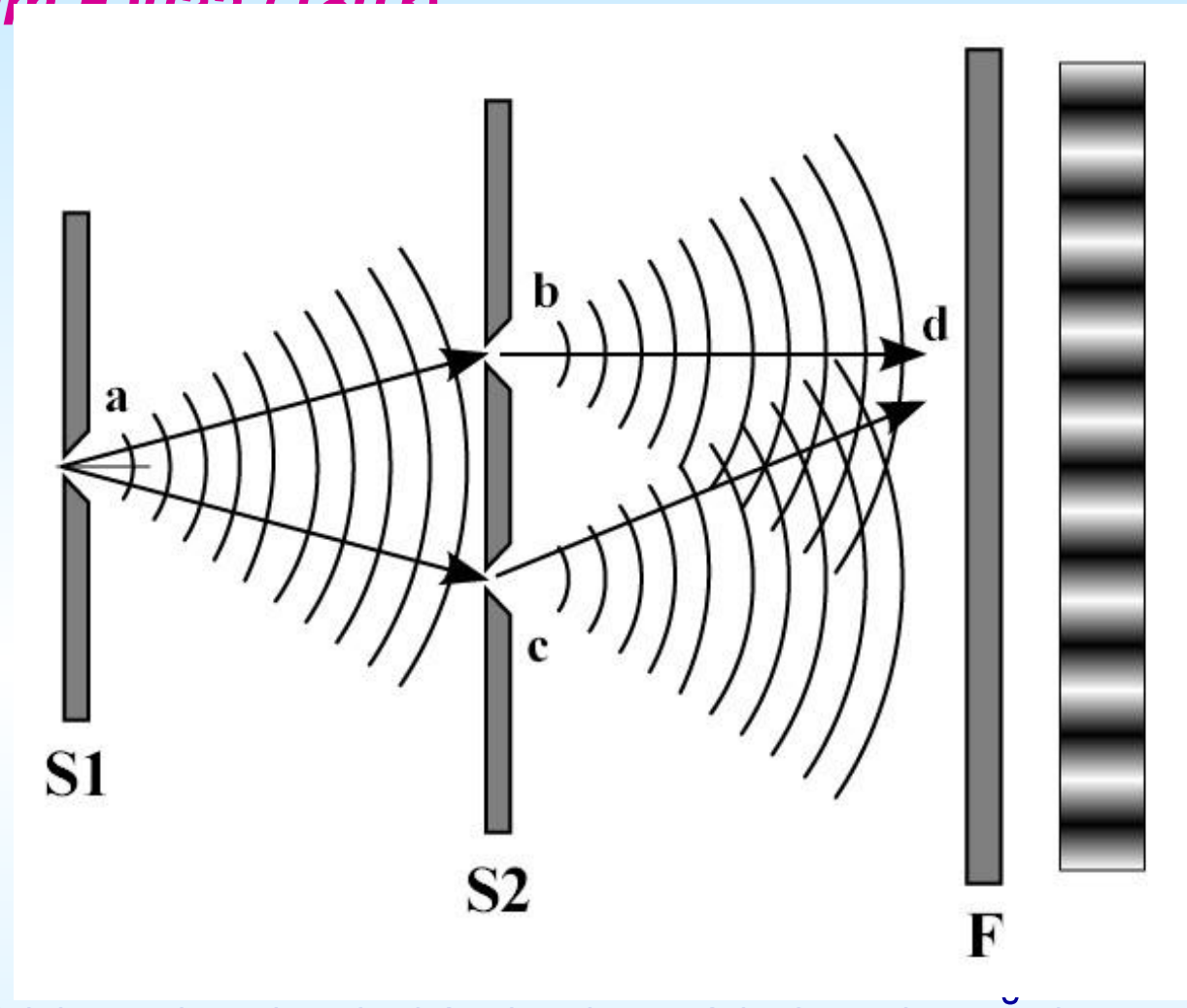
Условие интерференционного минимума

2) Если оптическая разность хода составит нечетное число полуволн:

$$\boxed{\Delta=\left(2m+1\right)\frac{\lambda}{2}} \quad \Rightarrow \quad \delta=\frac{2\pi}{\lambda}\Delta=\frac{2\pi}{\lambda}\left(2m+1\right)\frac{\lambda}{2}=2\pi m+\pi \quad \Rightarrow \quad \cos\delta=-1$$

— наблюдается минимум интенсивности.

Опыт Юнга (1803)

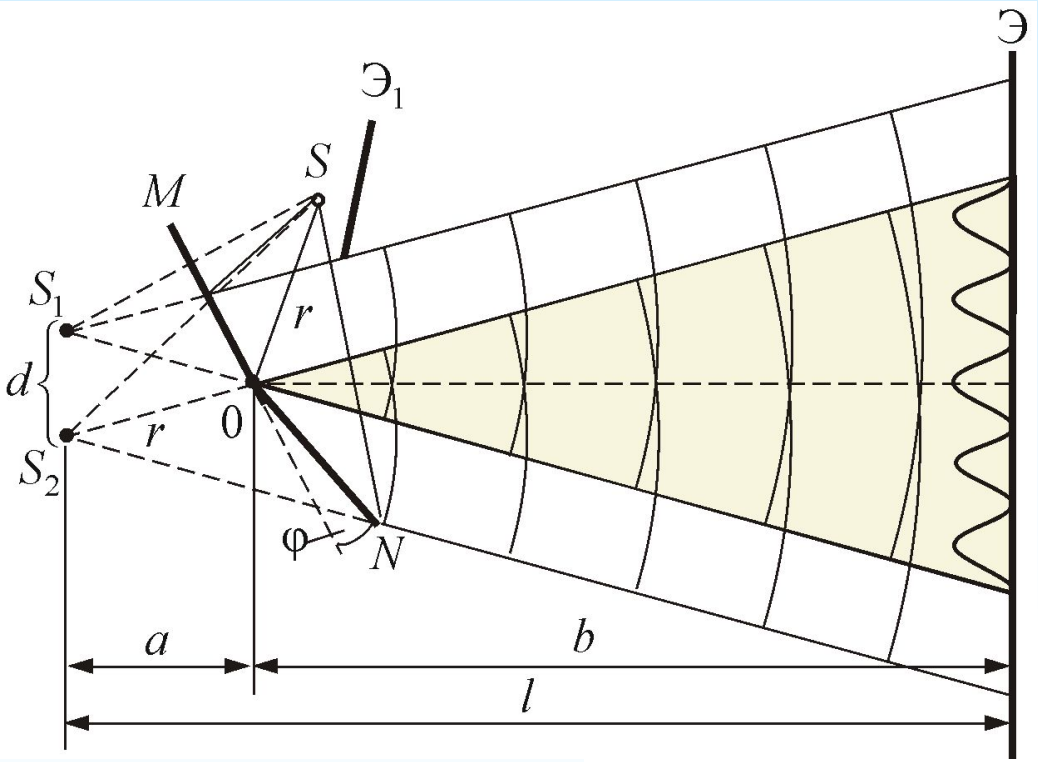


Томас
Юнг
1773-1829

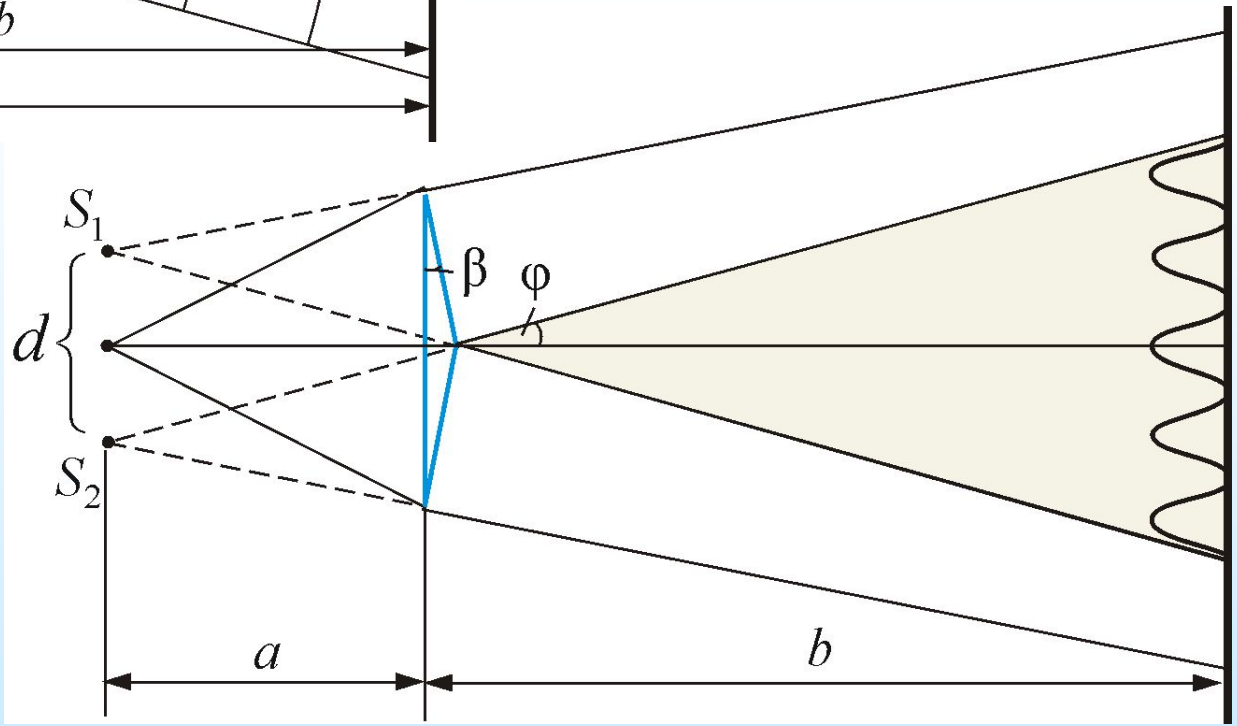
На проекционном экране получается целый ряд чередующихся интерференционных полос.

Особенность прорезей в том, что их ширина приблизительно равна длине волны излучаемого света. Корпускулярная теория света является неверной, когда прорези достаточно тонкие.

Бизеркало и бипризма Френеля (1815)



Огюстен Жан Френель
1788-1827

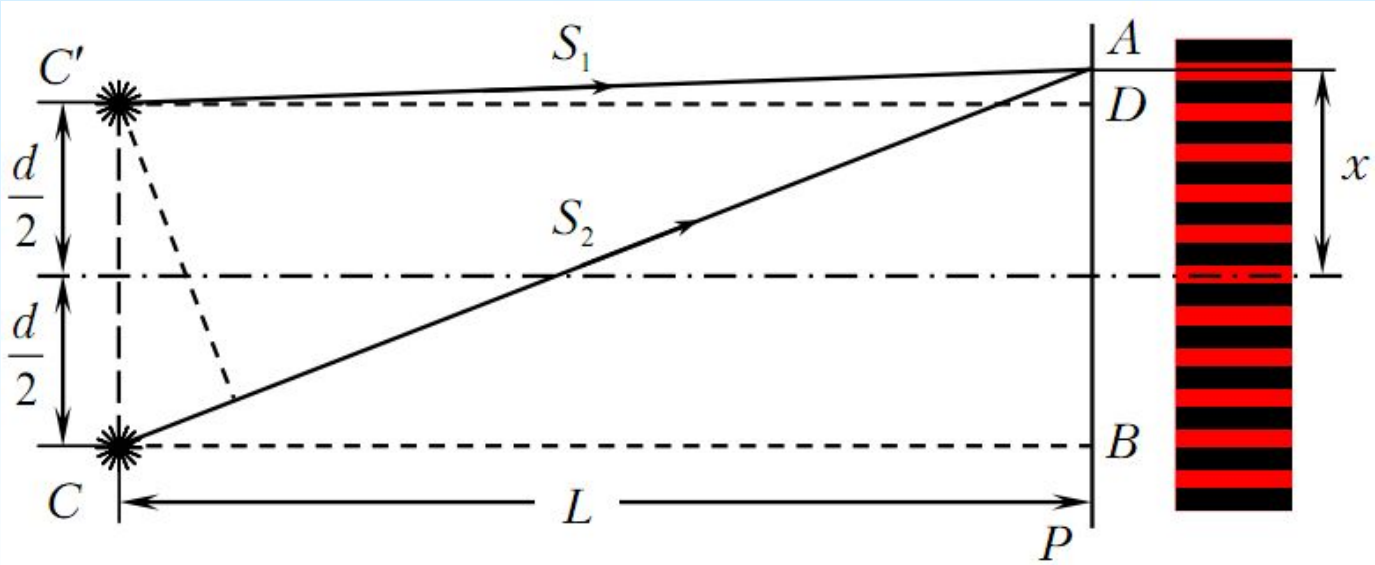


Расчет интерференционной картины от 2 источников

Воздух:

$n = 1$

$d << L$



$$S_1^2 = L^2 + (x - d/2)^2$$

$$S_2^2 = L^2 + (x + d/2)^2$$

$$\Rightarrow \quad S_2^2 - S_1^2 = (S_2 - S_1)(S_2 + S_1) = 2xd$$

$$d << L \quad \Rightarrow \quad (S_2 + S_1) \cong 2L \quad \Rightarrow \quad \boxed{\Delta = (S_2 - S_1) \cong xd / L}$$

Условие интерференционного максимума:

$$\boxed{\Delta = (2m)\frac{\lambda}{2} = m\lambda}$$

$$m\lambda = x\frac{d}{L} \quad \Rightarrow \quad \boxed{x_{\max} = \pm m\frac{L}{d}\lambda}$$

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

Расчет интерференционной картины от 2 источников

Условие интерференционного минимума:

$$\Delta = (2m+1)\frac{\lambda}{2}$$

$$(2m+1)\frac{\lambda}{2} = x\frac{d}{L} \quad \Rightarrow \quad x_{\min} = \pm\left(m+\frac{1}{2}\right)\frac{L}{d}\lambda$$

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

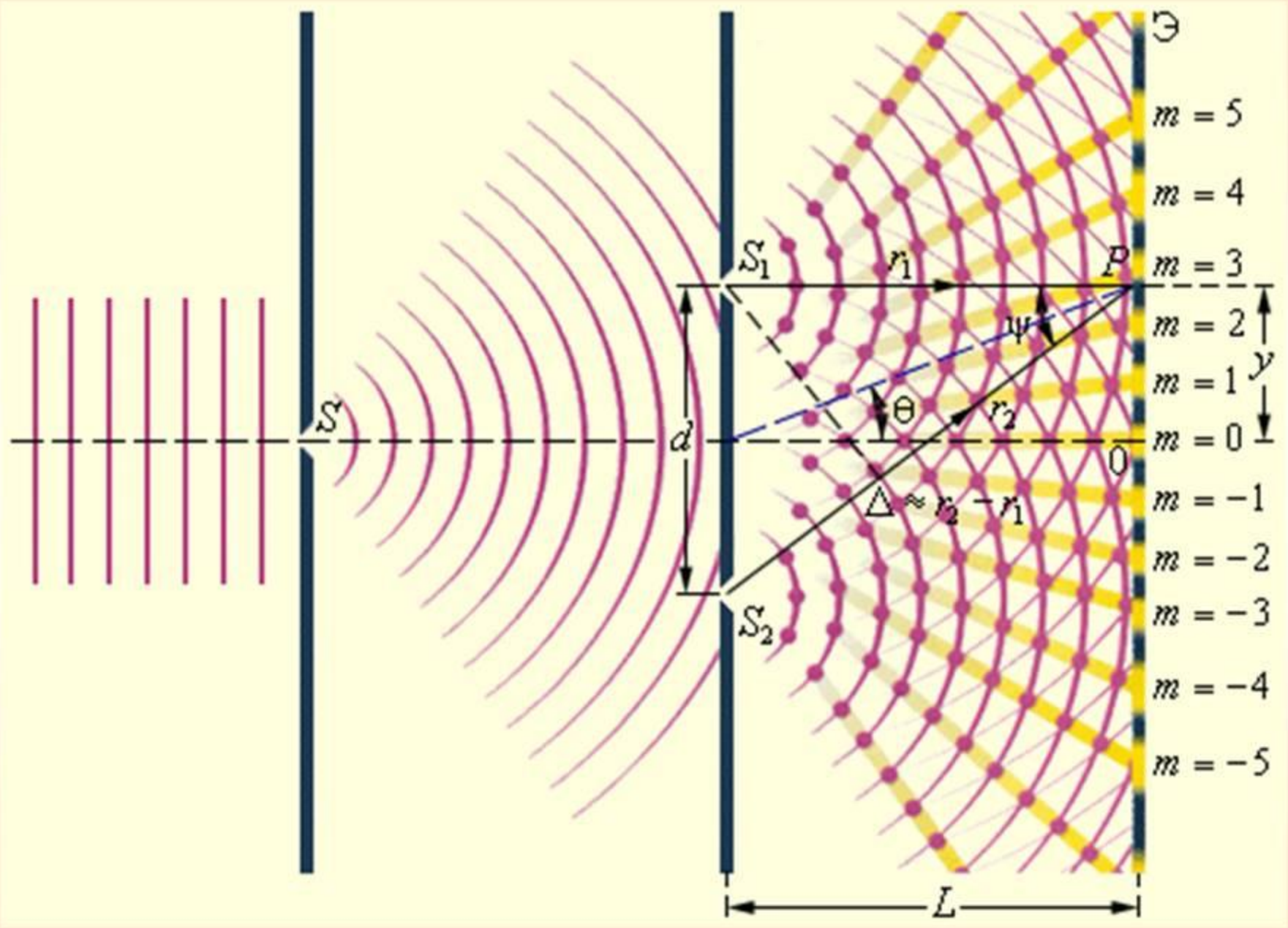
Если интерференция происходит не в вакууме, а в среде с показателем преломления *n*:

$$\lambda = \lambda_0 / n$$

Расстояние между соседними максимумами интенсивности называется расстоянием между интерференционными полосами, а шириной интерференционной полосы называется расстояние между соседними минимумами интенсивности:

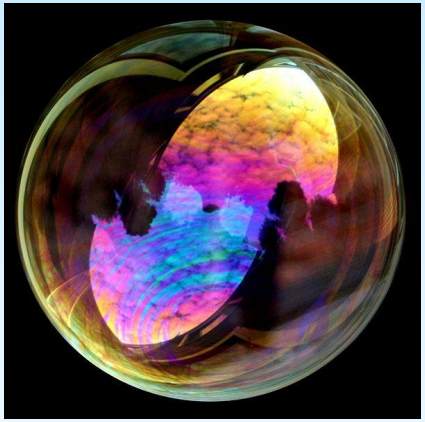
$$\Delta x = \frac{L}{d}\lambda$$

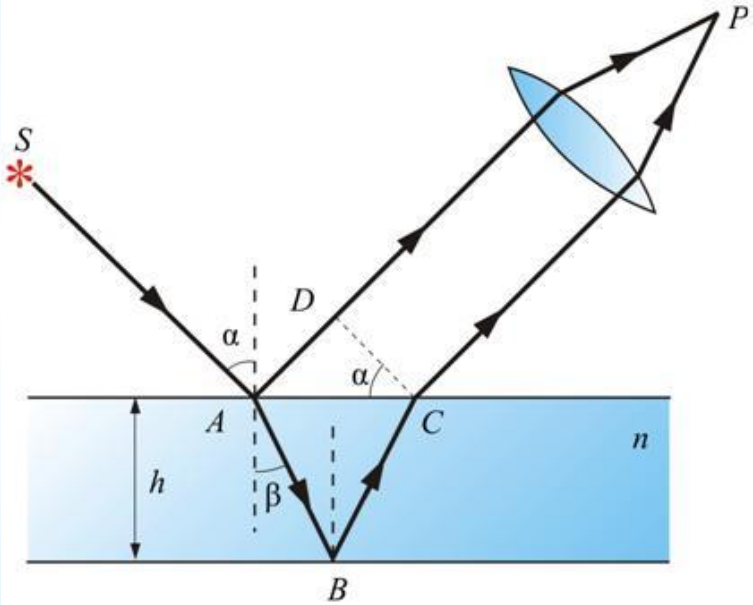
Видно, что с ростом *d* ширина интерференционной полосы уменьшается, и при $d \sim L$ становится $\sim\lambda$, т.е несколько десятых микрона. В этом случае отдельные полосы становятся совершенно неразличимы.


Э
m = 5
m = 4
m = 3
m = 2
m = 1
m = 0
m = −1
m = −2
m = −3
m = −4
m = −5
S
S1
S2
r1
r2
P
O
ψ
θ
d
y
L
Δ ≈ r2 − r1

Интерференция в тонких пленках

При падении световой волны на тонкую прозрачную пленка или пластинку происходит отражение от обеих поверхностей пленки, т.е. возникают две когерентные волны, которые при определенных условиях могут интерферировать.





$$\Delta = nS_2 - S_1$$

$$\Delta = 2hn\frac{1}{\cos\beta} - 2h\frac{1}{\cos\beta}\sin\beta\sin\alpha$$

$$\Delta = \frac{2h}{\cos\beta}\left(n - \sin\beta\sin\alpha\right)$$

$$\boxed{\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n} \rightarrow \Delta = \frac{2h}{\cos\beta}\left(n - n\sin^2\beta\right) = \frac{2hn}{\cos\beta}\cos^2\beta$$

$$\boxed{\Delta = 2hn\cos\beta} \rightarrow \cos\beta = \sqrt{1 - \sin^2\alpha / n^2} \rightarrow \boxed{\Delta = 2h\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha}}$$

Экспериментально установлено, что когда свет отражается от более оптически плотной среды, то фаза луча изменяется на π.
Это можно учесть, добавив к разности хода половину длины волны.

$$\boxed{\Delta' = \Delta + \frac{\lambda}{2} = 2hn\cos\beta + \frac{\lambda}{2}}$$

$$\boxed{\Delta' = 2h\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha} + \frac{\lambda}{2}}$$

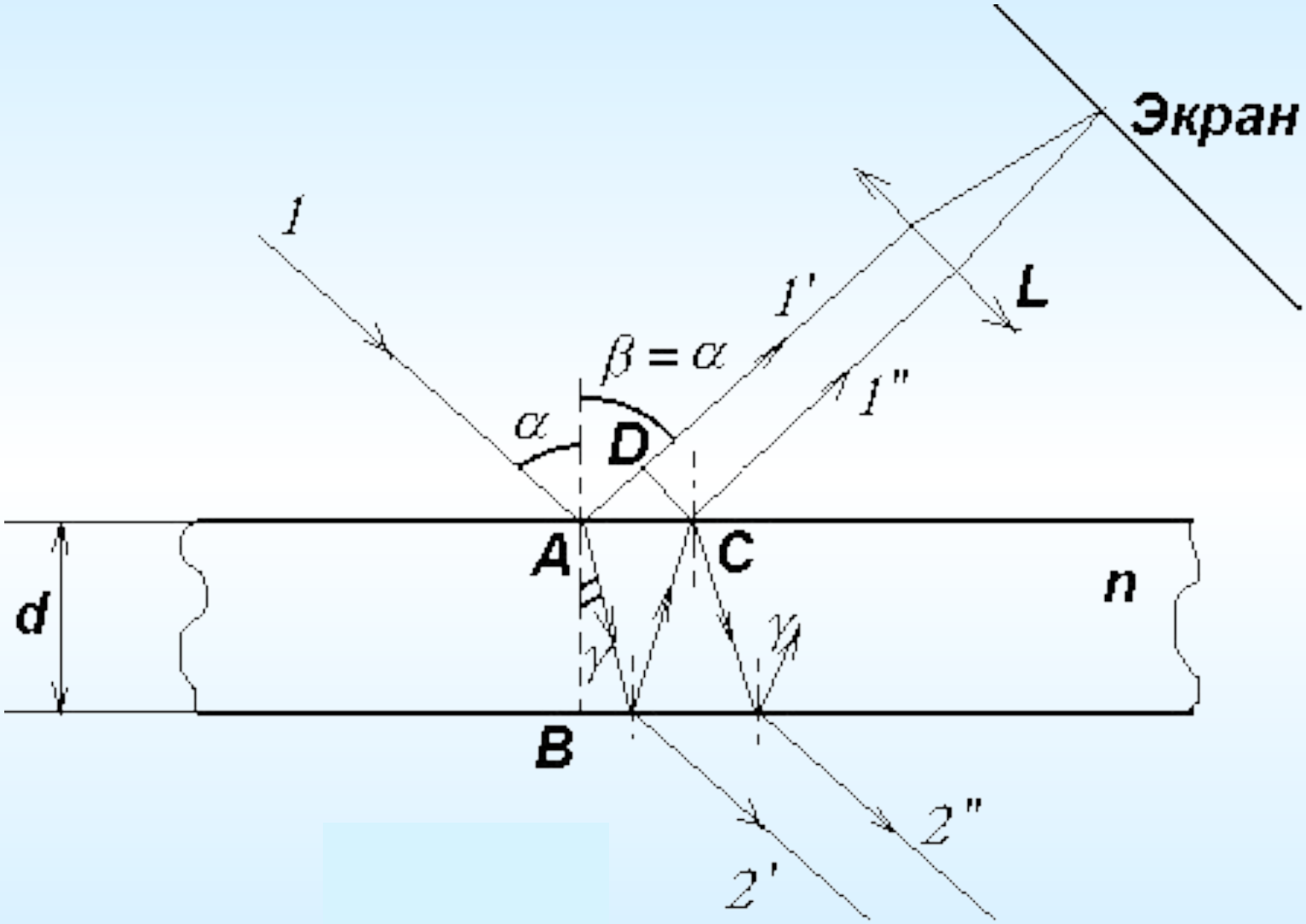
Условие интерференционного максимума: $\Delta' = (2m)\frac{\lambda}{2} = m\lambda$

$$2hn\cos\beta + \frac{\lambda}{2} = m\lambda \quad \Rightarrow \quad \boxed{2hn\cos\beta = \left(m - \frac{1}{2}\right)\lambda}$$

Условие интерференционного минимума: $\Delta' = (2m+1)\frac{\lambda}{2}$

$$2hn\cos\beta + \frac{\lambda}{2} = (2m+1)\frac{\lambda}{2} \quad \Rightarrow \quad \boxed{2hn\cos\beta = m\lambda}$$

Число m = 1, 2, … называют порядок интерференции. В очень тонких пленках условию *max* удовлетворяет только значение m =0, с увеличением толщины порядок интерференции возрастает.


Экран
1
1'
L
β = α
1"
α
D
A
C
d
n
γ
γ
B
2"
2'

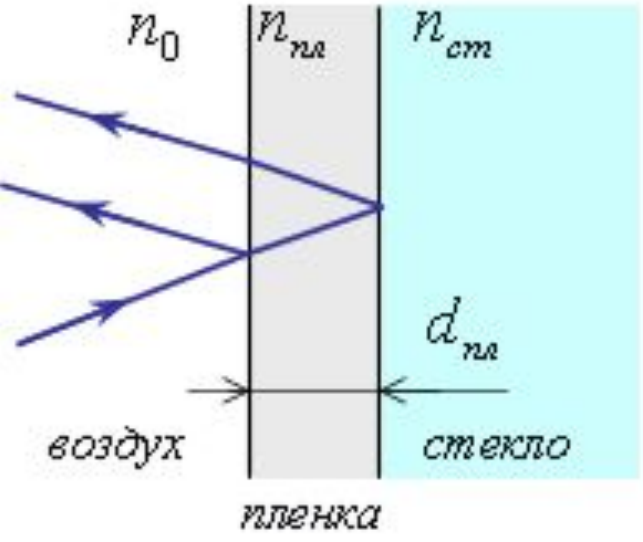
В прошедшем свете также наблюдается интерференция. Однако один луч не претерпевает изменения, а второй дважды отражается от оптически менее плотной среды, т.е. волна уже не теряется :

В проходящем свете условия max и min меняются местами !

Если осветить белым, естественным светом, то при одинаковой всюду толщине условие *max* будет выполняться только для какой-то определенной длины волны (например, красной λ = 700 нм). Тогда пластинка равномерно окрасится в этот свет. В прошедшем свете, наоборот, этого света будет не хватать (весь отразится).

Просветление оптики

На поверхность объектива наносится тонкий слой прозрачного вещества: фторида кальция CaF_2 или фторида магния MgF_2.



$$n_{среды} < n_{пленки} < n_{стекла} \Rightarrow \boxed{n_{пленки} = \sqrt{n_{стекла}}}$$

$$\boxed{2hn\cos\beta = (2m+1)\frac{\lambda}{2}}$$ – условие минимума

$$\cos\beta = 1 \qquad m = 0$$

$$\boxed{hn = \frac{\lambda}{4}} \qquad \lambda = 550\ нм$$

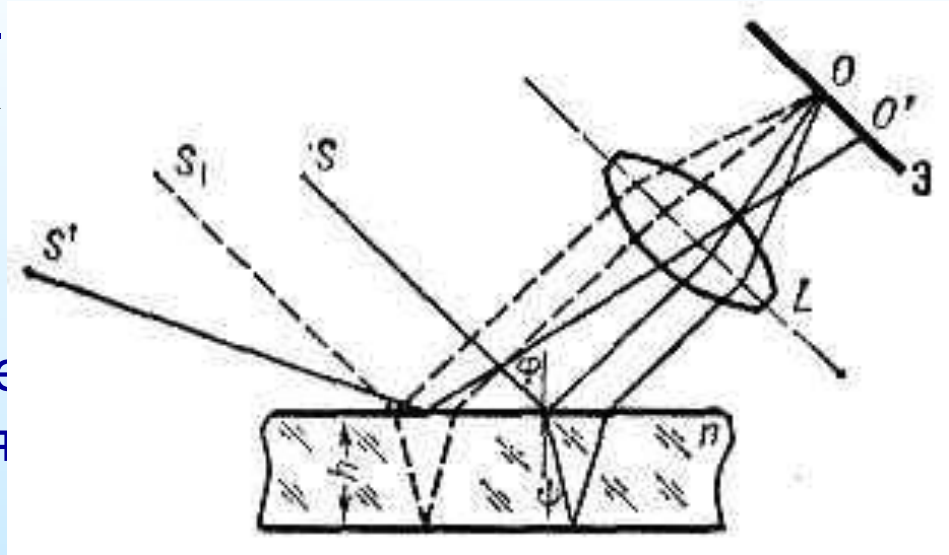
При падении лучей на пластинку различают два случая:

1) Свет падает под определенным углом, а толщина пластинки в разных местах разная – полосы равной толщины. $\alpha = const$
2) Свет падает под различными углами (рассеянный), а толщина пластинки всюду одинакова – полосы равного наклона. $h = const$

Полосы равного наклона

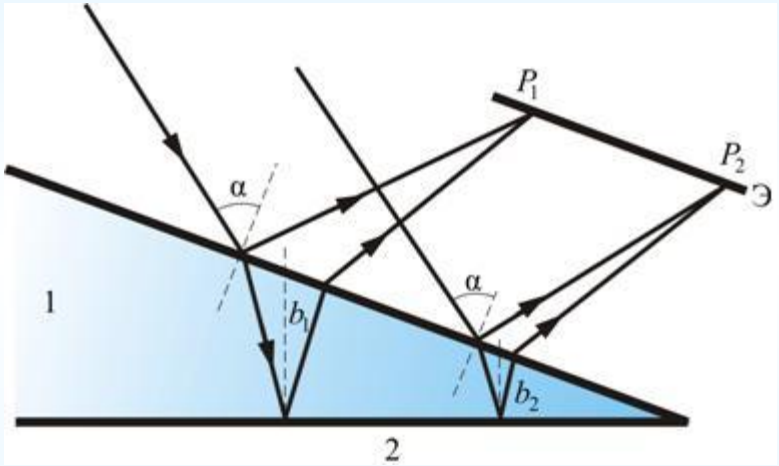
Полосы равного наклона – система чередующихся светлых и тёмных полос, наблюдаемая при освещении прозрачного слоя одинаковой толщины расходящимся или сходящимся пучком монохроматического света (либо непараллельным пучком лучей более сложного строения), причём каждая полоса проходит через те точки слоя, на которые лучи света падают под одним и тем же углом (под одинаковым наклоном).

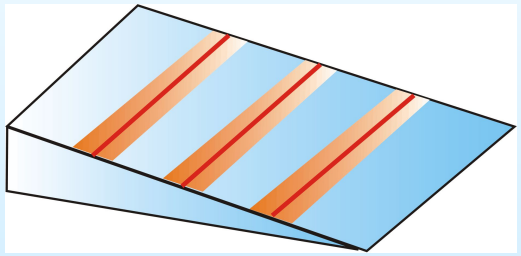
Могут наблюдаться и в пластинках сравнительно немалой толщины. Для сходящихся и расходящихся пучков – окружности или эллипсы в фокальной плоскости собирающе линзы. Используются для контроля плоско-параллельности пластин.



Полосы равной толщины

Пластинку нужно осветить параллельным пучком. В отличие от полос равного наклона, наблюдаются непосредственно на поверхности прозрачного слоя переменной толщины. Представляют собой изолинии равной толщины. Для двух соседних однотонных полос толщина отличаются на половину длины волны.



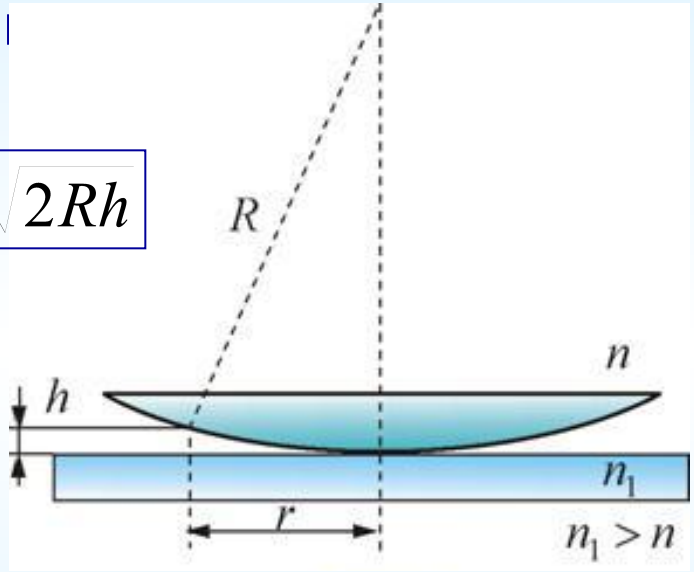


В белом свете – чередование радужных пятен разных цветов. Однако, когда длин волн много (интервал $\Delta\lambda$ широк), то происходит наложение интерференционных картин. Чем больше $\Delta\lambda$, тем меньше должен быть порядок интерференции.

Условие минимума: $2hn\cos\beta = m\lambda$ → $h \le 40$ *микрон*

Кольца Ньютона (1675)

Интерференционная картина в виде концентрических колец возникает между поверхностями, одна из которых плоская, а другая имеет большой радиус кривизны. Ньютон исследовав их в монохроматическом и белом свете обнаружил, что радиус колец возрастает с увеличением длины волны (от фиолетового к красному).



$$R^2 = (R-h)^2 + r^2 = R^2 - 2Rh + \cancel{h^2} + r^2 \qquad \boxed{r = \sqrt{2Rh}}$$

max: $$2hn\cos\beta = \left(m - \frac{1}{2}\right)\lambda$$

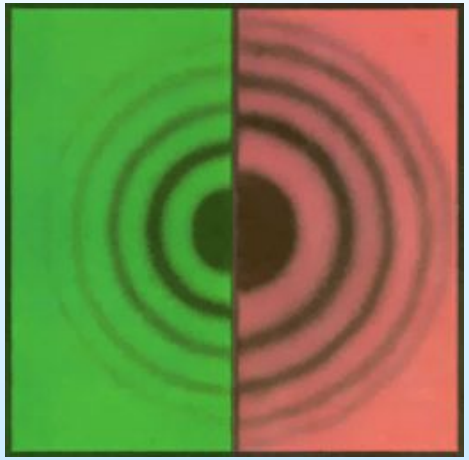
$$\boxed{\begin{aligned}\cos\beta &= 1\\ n &= 1\end{aligned}}$$

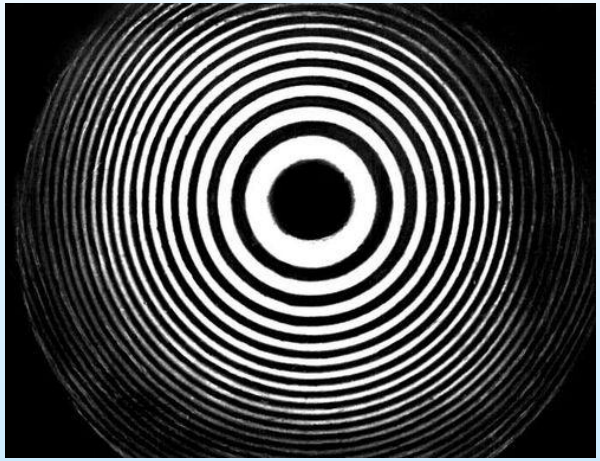
$$\rightarrow \boxed{r_{m\,св} = \sqrt{R(2m-1)(\lambda/2)}}$$

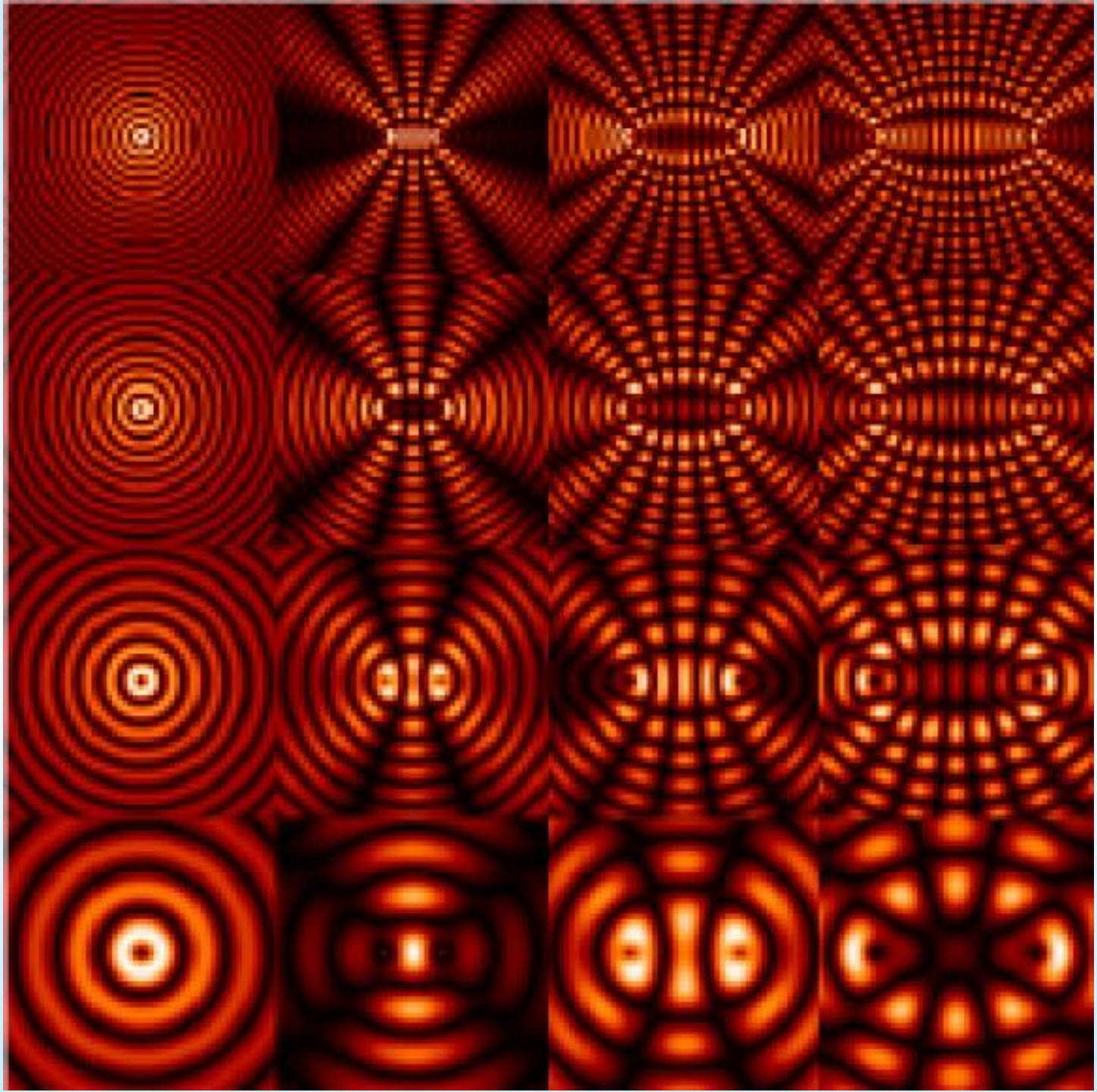
min: $$2hn\cos\beta = m\lambda$$

$$r_{m\,тем} = \sqrt{R(2m)(\lambda/2)}$$

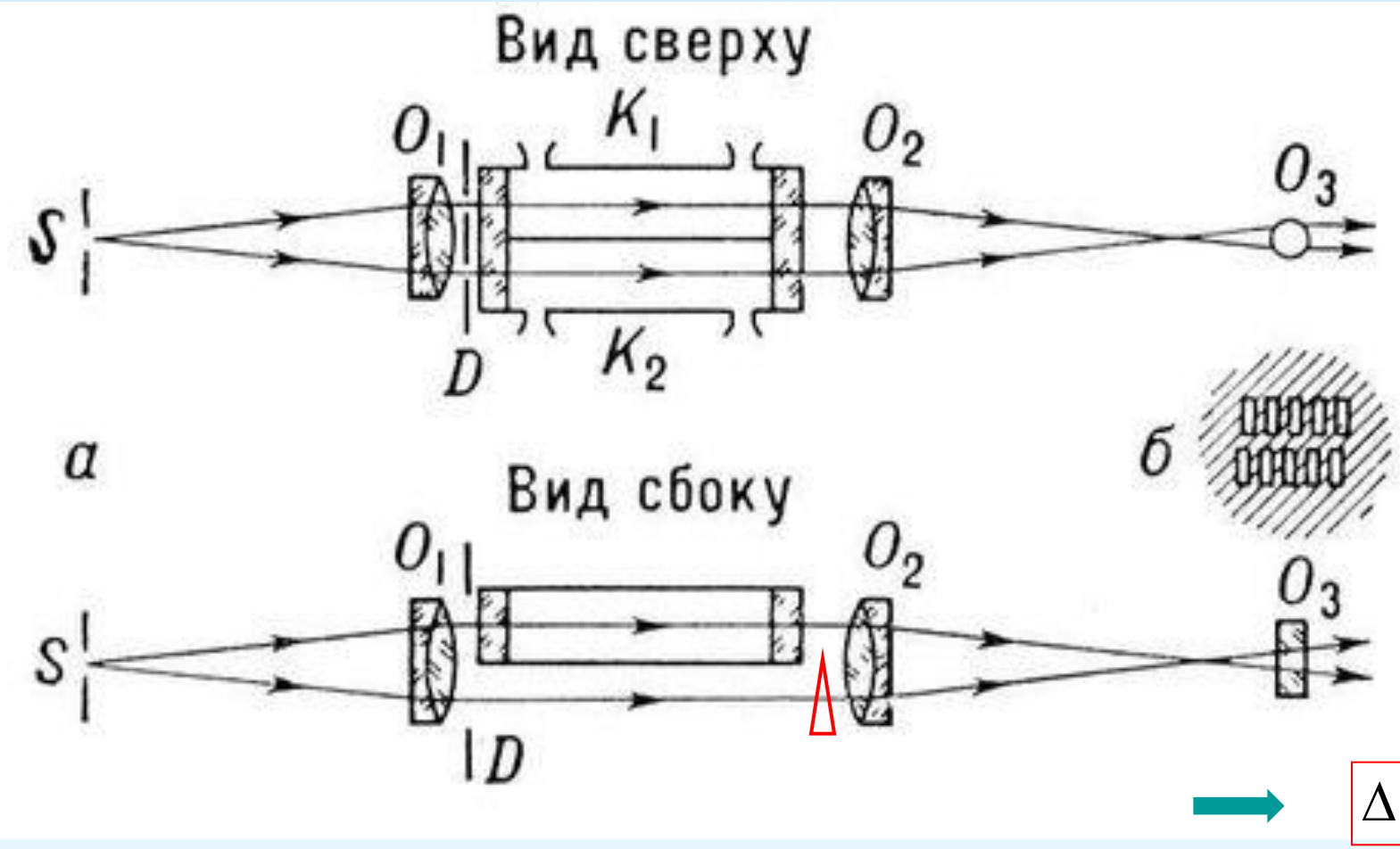
$$\rightarrow \boxed{r_{m\,тем} = \sqrt{Rm\lambda}}$$

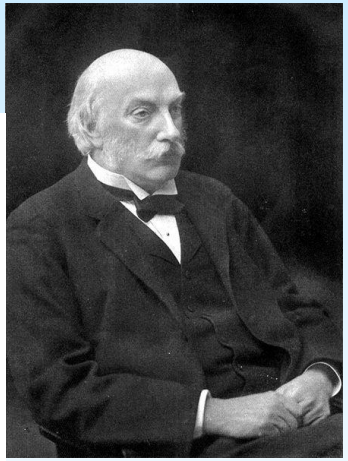






Интерференционный рефрактометр Рэлея





Джон Уильям Стретт лорд Рэлей 1842–1919 Ноб. лаур. 1904

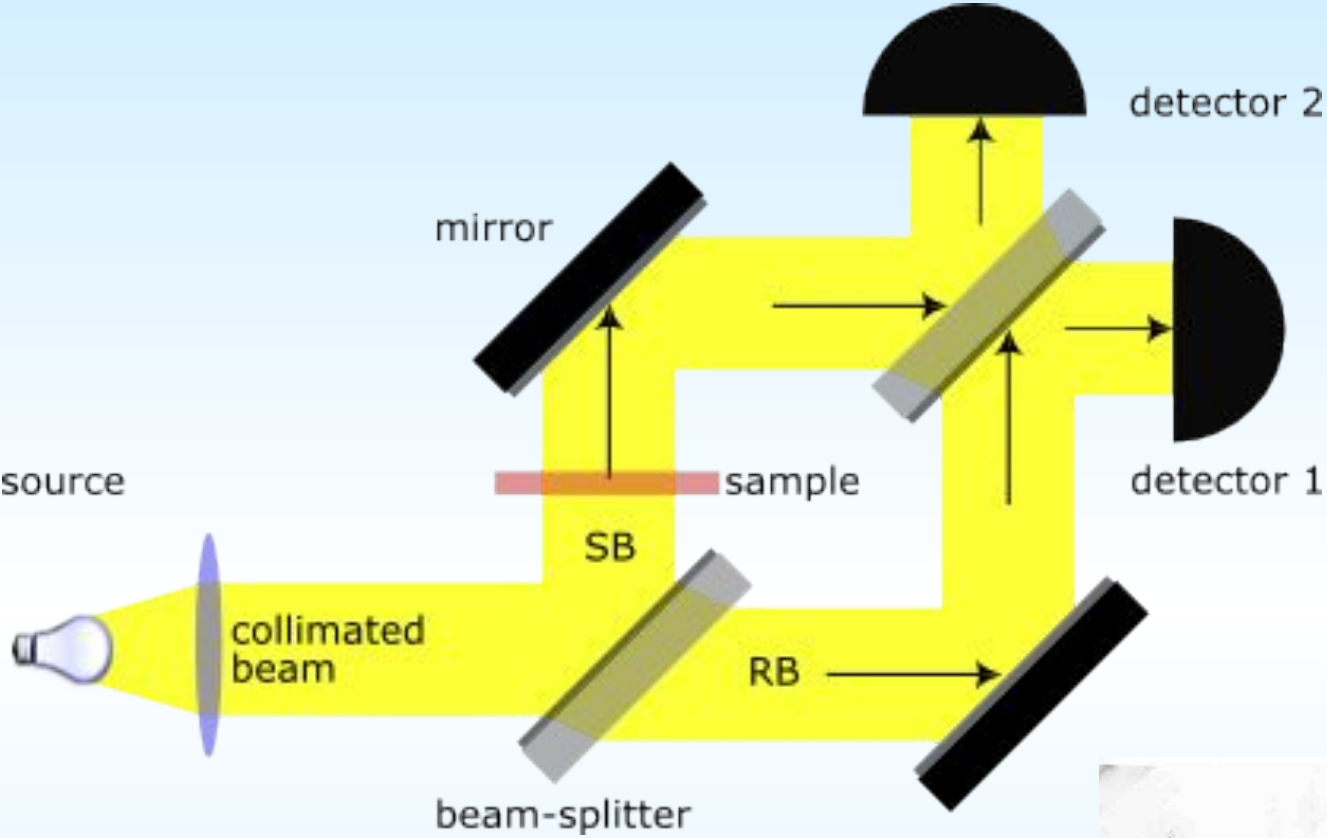
$$\Delta = l(n_2 - n_1)$$

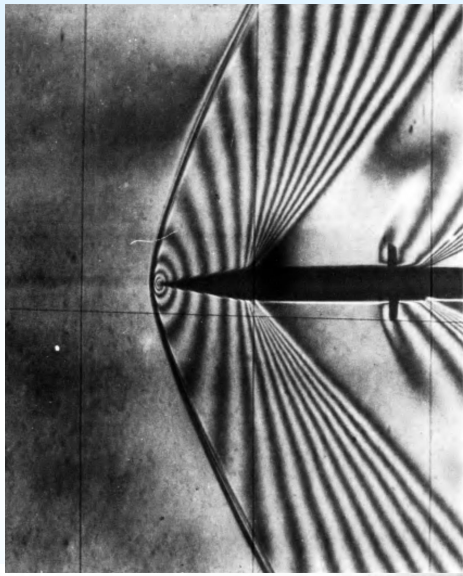
Рефрактометр Рэлея (1886) – двулучевой интерферометр, применяемый для определения показателей преломления газов. Разделяет свет от источника на два потока, разница фаз между которыми создаётся пропусканием света сквозь две одинаковые кюветы, заполненные разными газами.

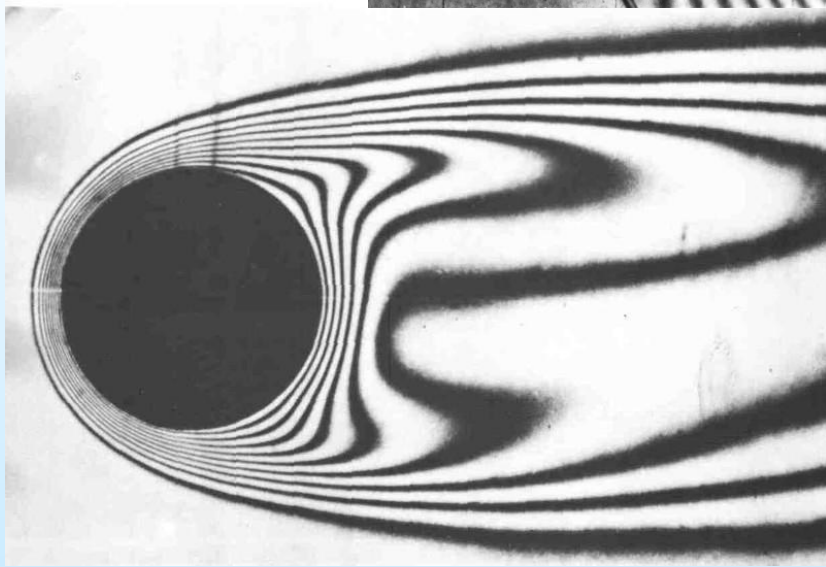
Интерферометр Маха-Цендера (1891-1892)

Людвиг Мах

Людвиг Луи
Альберт Цендер
1854-1949

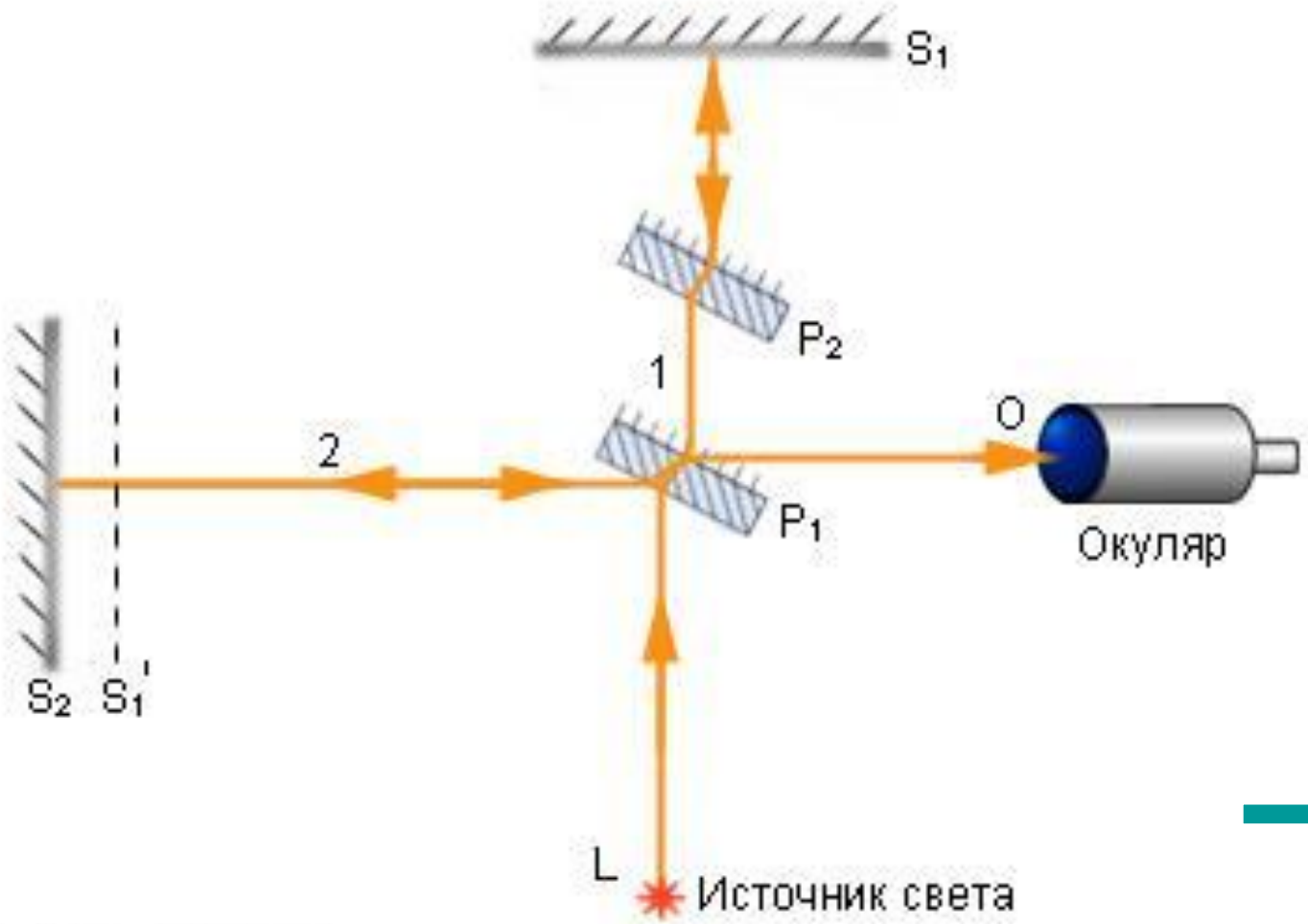




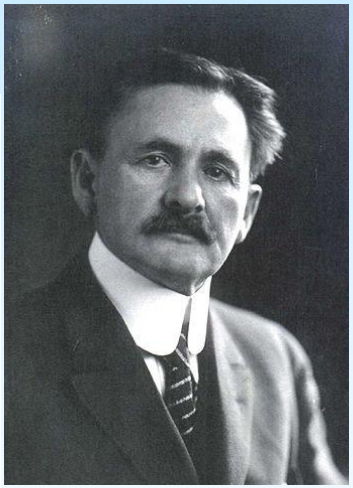


Широко применяется для изучения распределения плотности в газовых и воздушных потоках (например, обтекание моделей самолётов, ударные волны при взрывах и пр.).

Интерферометр Майкельсона (1881)



S_1 и S_2 – зеркала
P_1 и P_2 – разделительная и компенсационная пластинки

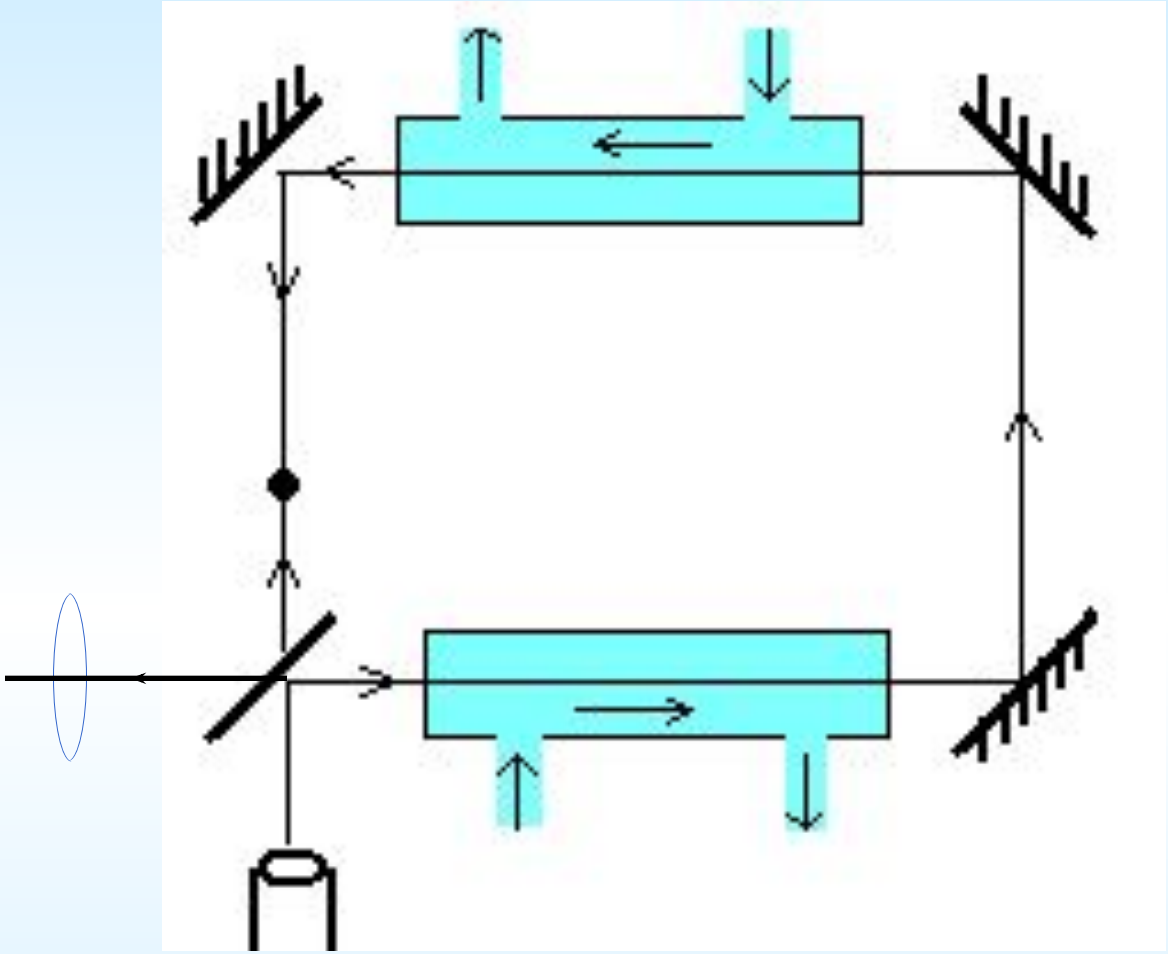


Альберт Абрахам Майкельсон 1852-1931 Ноб. лаур. 1907

$$\Delta = n(l_2 - l_1)$$

По смещению интерференционных полос определялась разность времён прохождения лучей, т.е. разница в их скоростях.

Опыт Физо (1851)



Арман Ипполит
Луи Физо
1819-1896

Один из двух лучей, отражаясь от зеркал, проходит через текущую в трубах воду по направлению её движения, а другой — против её движения. По смещению интерференционных полос определялась разность времён прохождения лучей в движущейся и неподвижной среде,