# Лабораторная работа № 4-2:
# ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА КРИВИЗНЫ ПЛОСКОВЫПУКЛОЙ ЛИНЗЫ С ПОМОЩЬЮ КОЛЕЦ НЬЮТОНА

Студент:_____ группа:_____

Допуск_____Выполнение_____Защита_____

**Цель работы:**

1. ознакомиться с явлением интерференции в тонких прозрачных изотропных пластинках, измеряя радиусы колец Ньютона при интерференции в отраженном свете,
2. определить радиус кривизны линзы.

**Приборы и материалы:** установка для определения радиуса кривизны линзы.

## Кольца Ньютона

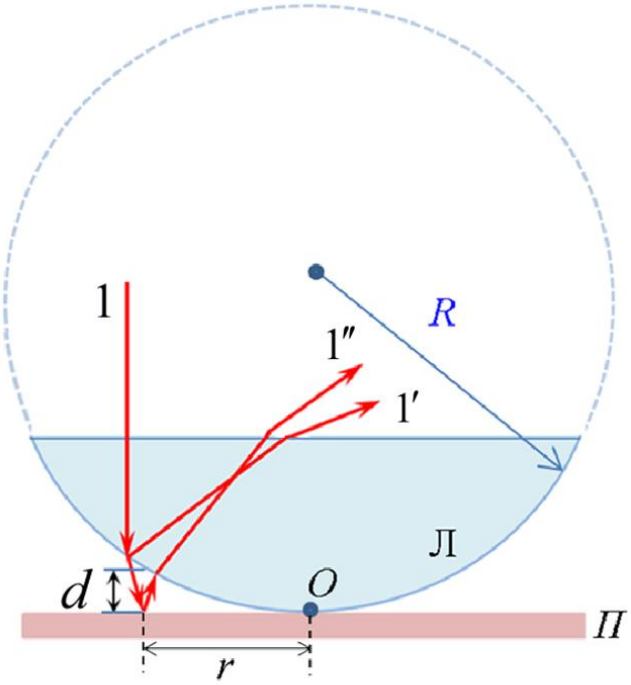



Рис. 1 Оптическая схема колец Ньютона

***Кольцами Ньютона*** *называется интерференционная картинка в виде чередующихся тёмных и светлых концентрических колец, которые возникают при отражении света от двух поверхностей, одна из которых плоская, а другая имеет относительно большой радиус кривизны и соприкасается с первой*
(например, стеклянная пластинка соприкасается с плосковыпуклой линзой).

Если на такую систему в направлении, перпендикулярном плоской поверхности линзы, падает пучок монохроматического света, то световые волны, отражённые от нижней границы линзы и верхней границы плоской поверхности пластинки, могут интерферировать между собой.

Оптическая схема для наблюдения колец Ньютона изображена на рис. 1.

Плосковыпуклая линза Л с большим радиусом кривизны $R$ выпуклой поверхностью обращена к плоской пластине $П$ и соприкасается с ней.

Параллельный пучок света падает нормально на плоскую поверхность линзы и частично отражается от верхней и нижней поверхностей воздушного промежутка между линзой и пластиной. Интерференция света возникает в результате появления оптической разности хода $\Delta$ между интерферирующими световыми лучами $1'$ и $1''$ в тонком зазоре толщиной $d$, разделяющем соприкасающиеся поверхности. Этот воздушный зазор играет роль тонкой плёнки переменной толщины.

При наложении множества отраженных волн $1'$ и $1''$ возникает интерференционная картина в виде чередующихся светлых и тёмных концентрических окружностей, в центре которых наблюдается тёмное пятно (минимум нулевого порядка), Ширина и интенсивность этих колец постепенно убывает по мере удаления от центрального пятна.

В проходящем свете наблюдается противоположная картина: центральное пятно - светлое, следующее кольцо - темное и т. д.

Оптическую разность хода $\Delta$ между лучами, отраженными от верхней и нижней поверхностей воздушного зазора на произвольном расстоянии $r$ от точки О, равна

$$\Delta = 2nd + \frac{\lambda}{2}, \qquad (1)$$

где $n$ – показатель преломления среды между линзой и пластинкой, а слагаемое $\frac{\lambda}{2}$ обусловлено возникновением дополнительной оптической разности хода при отражении света от поверхности пластины, которая имеет больший показатель преломления $n$, чем воздух.

Оптическая разность хода между лучами, отраженными от верхней и нижней поверхностей воздушного зазора на произвольном расстоянии $r$ от точки О можно так же найти из геометрических соображений. В случае колец Ньютона можно получить следующее уравнение:

$$\Delta = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2}. \qquad (2)$$

Радиусы светлых $r_m^{св}$ и темных $r_m^{темн}$ колец Ньютона с номером $m$ в отраженном свете можно определить по формулам:

$$r_m^{св} = \sqrt{(2m-1)R\frac{\lambda}{2}} \qquad (m = \pm 1, \pm 2, ...), \qquad (3)$$

$$r_m^{темн} = \sqrt{mR\lambda} \qquad (m = 0, \pm 1, \pm 2, ...). \qquad (4)$$

В тех точках, для которых оптическая разность хода волн $\Delta$ кратна чётному числу полуволн $2k\frac{\lambda}{2}$, наблюдаются светлые кольца, а в точках, для которых оптическая разность хода волн $\Delta$ кратна нечётному числу полуволн $(2k+1)\frac{\lambda}{2}$, наблюдаются темные кольца.

Таким образом, приравнивая (1) и (3), а так же (1) и (4) получим следующие соотношения:

- для светлых колец Ньютона имеем $$\frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2} = 2k\frac{\lambda}{2} \qquad (5)$$

- для темных колец Ньютона имеем $$\frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2} = (2k+1)\frac{\lambda}{2}. \qquad (6)$$

Теоретически из условий (5) и (6) можно определить радиусы k-го светлого или тёмного кольца. Однако на практике вследствие упругой деформации стекла или возможного попадания пылинки между линзой и пластинкой между интерферирующими лучами $1'$ и $1''$ набегает дополнительная оптическая разность хода лучей $\Delta d$, которую экспериментально определить невозможно. Однако при вычислениях исключить её можно.

Действительно, для тёмных колец, номера которых $m$ и $n$, равенство (6) дает:

$$\frac{r_m^{\ 2}}{R}+\frac{\lambda}{2}+\Delta d=\left(2m+1\right)\frac{\lambda}{2}\ . \qquad (7)$$

$$\frac{r_n^{\ 2}}{R}+\frac{\lambda}{2}+\Delta d=\left(2n+1\right)\frac{\lambda}{2}. \qquad (8)$$

Вычитая (8) – (7), получим:

$$R=\frac{r_m^2-r_n^2}{\lambda\left(m-n\right)} \qquad (9)$$

Таким образом, уравнение (9) позволяет определить радиус кривизны линзы, зная радиусы тёмных колец Ньютона.

Так как в этой работе Вы будете определять не радиусы, а диаметры тёмных колец Ньютона, то уравнение (9) удобнее переписать через диаметры колец, то есть:

$$R=\frac{D_m^2-D_n^2}{4\lambda\left(m-n\right)} \qquad (10)$$

Если на линзу падает белый свет, то в отраженном свете наблюдается центральное темное пятно, окруженное системой цветных радужных колец, соответствующих интерференционным максимумам отражённого света с различными длинами волн $\lambda$.

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

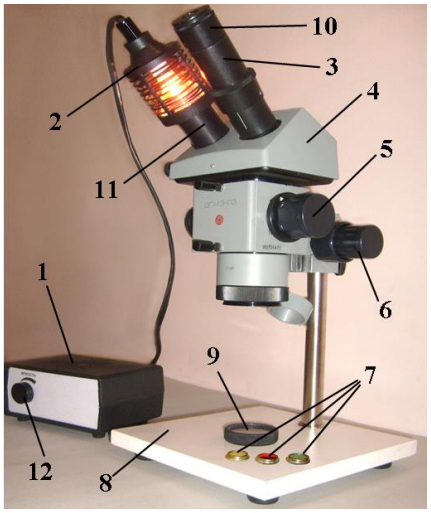



Рис.2

Установка состоит из оптической головки для микроскопа **4**, установленной на основании со стойкой **8**, линзы с пластиной **9** и комплекта светофильтров **7**.

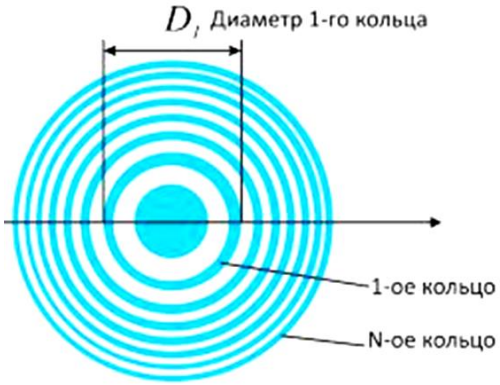
Линза с пластиной **9** представляет собой оправу, в которую помещены стеклянная пластинка и плосковыпуклая линза с большим радиусом кривизны $R$. Устройство предназначено для изучения интерференционной картины "колец Ньютона". Насадка для микроскопа **11** представляет собой трубку с разрезом и резьбой, позволяющую крепить её на место одного из окуляров. Внутренний диаметр насадки предусматривает возможность установки интерференционных светофильтров **7** и крепления осветителя микроскопа **2**.

Комплект светофильтров состоит из 4 интерференционных светофильтров **7** в оправе, позволяющей вставлять их в насадку для микроскопа, они используются для вырезания определенной длины волны из излучения лампы микроскопа при измерении диаметров колец Ньютона.

Для измерения радиусов колец Ньютона используется головка оптическая для микроэлектроники **4** (в дальнейшем микроскоп). Для нормального падения света на линзу с пластиной **9** необходимо осветитель **2** при помощи насадки для микроскопа **11** закрепить на место одного из окуляров. Освещение колец производится монохроматическим светом, вырезаемым одним из светофильтров **7**, устанавливаемых в насадку для микроскопа **11**.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. В правую окулярную трубку **3** оптической головки **4** установите окуляр **10** с отсчётной шкалой.
2. Вместо левого окуляра оптической головки **4** установлена насадка для микроскопа **11**, в которую необходимо установить один из 4-х интерференционных светофильтров **7** (задаётся преподавателем), длина волны которого указана на оправе.
3. В эту же насадку для микроскопа **11** установите осветитель микроскопа **2**.
4. Подключите осветитель **2** к блоку питания **1** с тыльной стороны и включите его. Добейтесь нужной интенсивности, вращая ручку «яркость» **12**.
5. Установите на предметный столик микроскопа **8** линзу с пластинкой в оправе **9**.
6. Вращая ручку **6**, добейтесь отчётливой (резкой) картины в окуляре **10**.
7. Переключателем **5** установите увеличение объектива микроскопа $Z$ на $0,6^X$ и, постепенно меняя увеличение микроскопа $Z$ (с помощью переключателя **5**) в сторону увеличения, отрегулируйте микроскоп до заполнения интерференционными кольцами всего поля окуляра.
   Передвигая рукой линзу с пластинкой, добейтесь совпадения центрального темного пятна интерференционной картины с центром поля зрения микроскопа (см. рис. 2).
8. Измерьте расстояние $D$ (то есть диаметры колец) между внешними и внутренними краями пяти первых тёмных колец ($k = 1; 2; 3; 4; 5$) как показано на рис. 2. Нумерация колец производится от центра ($k = 0$ - центральное тёмное кольцо). Полученные результаты занесите в таблицу 1.




9. Поверните окуляр **10** на $90^\circ$ и повторите измерения, в результате которых получите ещё один диаметр этого же кольца $D'$. Полученные результаты занесите в таблицу 1.
10. По формуле $\langle D_{0i} \rangle = \dfrac{D_i + D_i'}{2}$ определите средние значения диаметров колец (в делениях шкалы) и значения занесите в таблицу 1.
11. Отключите установку от сети.
12. Найдите средние значения диаметров тёмных колец $\langle D_i \rangle$ с учётом цены деления шкалы окуляра $a_0 = 0.1 \dfrac{мм}{дел}$ и множителя $Z$ обозначенного на переключателе **5**:

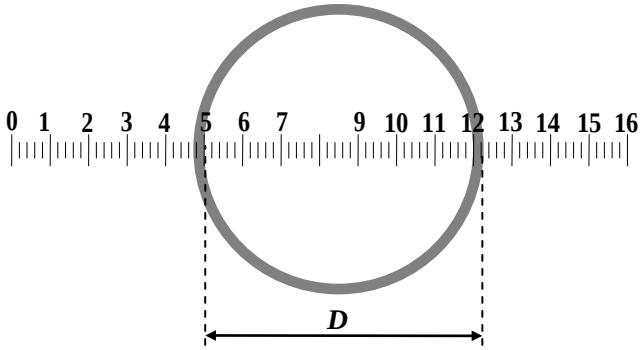



*Рис. 2*

$$\langle D_i \rangle = \frac{\langle D_{0i} \rangle a_0}{Z}.$$

**12.** Комбинируя попарно диаметры больших $\langle D_m \rangle$ и меньших $\langle D_n \rangle$ колец, по формуле

$$R = \frac{D_m^2 - D_n^2}{4\lambda(m-n)}$$

определите радиусы кривизны линзы $R_i$, где $m$ - номер большего кольца, а $n$ - номер меньшего кольца,
$\lambda$ - длина световой волны, пропускаемой светофильтром (указана на оправе светофильтра).

13.. Вычислите среднее значение радиуса кривизны линзы

$$\langle R \rangle = \frac{\sum R_i}{n},$$ где $n$ - число измерений.

15. Погрешность измерений определите по формуле $\Delta R = t_{pk} S_{\langle R \rangle}$,

где среднеквадратичное отклонение $S_{\langle R \rangle}$ определяется по формуле

$$S_{\langle R \rangle} = \sqrt{\frac{\sum \left(R_i - \langle R \rangle\right)^2}{n(n-1)}},$$

а коэффициент Стьюдента $t_{pk} = 2{,}8$ для вероятности доверительного интервала $p = 0{,}95$ и числа измерений $n = 5$.

16. Конечный результат запишите в виде: $R = \langle R \rangle \pm t_{pk} S_{\langle R \rangle}$.

***Таблица 1***

| Номера колец | $D_i$, *дел* | $D'_i$, *дел* | $\langle D_{0i} \rangle$, *дел* | $\langle D_i \rangle$, $10^{-3}$ *м* | $\lambda$, *нм* | $\Delta\lambda$, *нм* | $R_i$, *м* | $\langle R \rangle$, *м* | $\Delta R$, *м* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | |

## Контрольные вопросы

1. Свет и его природа.
2. Что называется интерференцией света? Дайте понятие о монохроматических и когерентных волнах.
3. Оптическая длина пути $L$ и оптическая разность хода волн $\Delta$.
4. Сформулируйте условия усиления (максимума) и ослабления (минимума) света при интерференции.
5. Объясните причину интерференции.
6. Интерференция света в тонких плёнках. Кольца Ньютона.

## Замеры для выполнения лабораторной работы по бригадам

***Бригада 1 и 6*** ***Z=2*** ***Таблица 1***

| Номера колец | $D_i$, *дел* | $D'_i$, *дел* | $\langle D_{0i} \rangle$, *дел* | $\langle D_i \rangle$, $10^{-3}$ *м* | $\lambda$, *нм* | $\Delta\lambda$, *нм* | $R_i$, *м* | $\langle R \rangle$, *м* | $\Delta R$, *м* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 54 | 52 | | | | | | | |
| 2 | 76 | 74 | | | | | | | |
| 3 | 91 | 93 | | | 700 | | | | |
| 4 | 107 | 105 | | | | | | | |
| 5 | 120 | 118 | | | | | | | |

***Бригада 2 и 7*** ***Z=2*** ***Таблица 1***

| Номера колец | $D_i$, *дел* | $D'_i$, *дел* | $\langle D_{0i} \rangle$, *дел* | $\langle D_i \rangle$, $10^{-3}$ *м* | $\lambda$, *нм* | $\Delta\lambda$, *нм* | $R_i$, *м* | $\langle R \rangle$, *м* | $\Delta R$, *м* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 52 | 50 | | | | | | | |
| 2 | 73 | 71 | | | | | | | |
| 3 | 89 | 87 | | | 650 | | | | |
| 4 | 103 | 101 | | | | | | | |
| 5 | 113 | 115 | | | | | | | |

***Бригада 3 и 8*** ***Z=2*** ***Таблица 1***

| Номера колец | $D_i$, *дел* | $D'_i$, *дел* | $\langle D_{0i} \rangle$, *дел* | $\langle D_i \rangle$, $10^{-3}$ *м* | $\lambda$, *нм* | $\Delta\lambda$, *нм* | $R_i$, *м* | $\langle R \rangle$, *м* | $\Delta R$, *м* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 50 | 48 | | | | | | | |
| 2 | 70 | 68 | | | | | | | |
| 3 | 86 | 84 | | | 600 | | | | |
| 4 | 97 | 99 | | | | | | | |
| 5 | 111 | 109 | | | | | | | |

***Бригада 4 и 9*** ***Z=2*** ***Таблица 1***

| Номера колец | $D_i$, *дел* | $D'_i$, *дел* | $\langle D_{0i} \rangle$, *дел* | $\langle D_i \rangle$, $10^{-3}$ *м* | $\lambda$, *нм* | $\Delta\lambda$, *нм* | $R_i$, *м* | $\langle R \rangle$, *м* | $\Delta R$, *м* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 46 | 48 | | | | | | | |
| 2 | 65 | 67 | | | | | | | |
| 3 | 82 | 80 | | | 550 | | | | |
| 4 | 95 | 93 | | | | | | | |
| 5 | 106 | 104 | | | | | | | |

***Бригада 5 и 10*** ***Z=2*** ***Таблица 1***

| Номера колец | $D_i$, *дел* | $D'_i$, *дел* | $\langle D_{0i} \rangle$, *дел* | $\langle D_i \rangle$, $10^{-3}$ *м* | $\lambda$, *нм* | $\Delta\lambda$, *нм* | $R_i$, *м* | $\langle R \rangle$, *м* | $\Delta R$, *м* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 46 | 44 | | | | | | | |
| 2 | 61 | 63 | | | | | | | |
| 3 | 79 | 77 | | | 500 | | | | |
| 4 | 89 | 91 | | | | | | | |
| 5 | 101 | 99 | | | | | | | |

# Ответы на контрольные вопросы

## 1. Свет и его природа

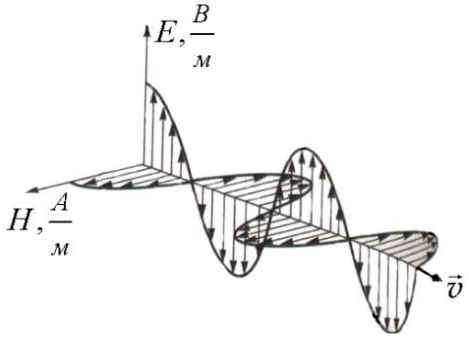



Рис.1 Распределение величины проекции векторов $\vec{E}$ и $\vec{H}$ на направление распространения волны

***Светом*** называются электромагнитные волны с длиной от 380 нм до 760 нм, воспринимаемые органами зрения человека.

(1 нм (нанометр) = $10^{-10}$ м).

***Электромагнитной волной*** называется распространяющееся в пространстве переменное электромагнитное поле.

Из электромагнитной теории света английского физика Дж. Максвелла следует, что в электромагнитной волне вектора напряжённости электрического поля $\vec{E}$ и напряжённости магнитного поля $\vec{H}$ колеблются в одинаковых фазах во взаимно перпендикулярных плоскостях и одновременно перпендикулярно вектору скорости распространения волны $\vec{v}$ (перпендикулярно лучу). Причём в любой момент времени выполняется условие

$$\varepsilon\varepsilon_0 E^2 = \mu\mu_0 H^2 .$$

## 2. Что называется интерференцией света? Дайте понятие о монохроматических и когерентных волнах

***Интерференцией света*** *называется явление перераспределения световой энергии в пространстве, то есть усиление света в одних точках пространства и ослабление света в других точках пространства, в результате наложения когерентных световых волн.*

***Монохроматическими*** называются волны какой - либо одной частоты (или длины волны).

***Когерентными*** называются волны, разность фаз между которыми не изменяется с течением времени (когерентными могут быть только волны одинаковой частоты).

Интерференция – одно из проявлений волновой природы света. Это явление наблюдается при наложении двух или нескольких когерентных световых волн. Интенсивность света в области перекрытия световых пучков имеет характер чередующихся светлых и темных полос, причем в максимумах интенсивность света больше, а в минимумах меньше суммы интенсивностей отдельных пучков.

## 3. Оптическая длина пути $L$ и оптическая разность хода волн $\Delta$

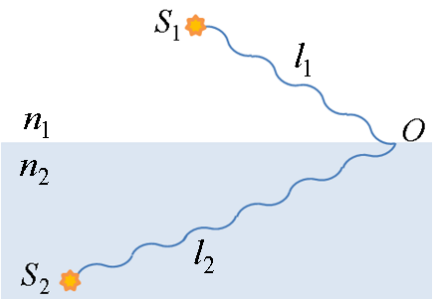



Рис. 2 Возникновение оптической разности хода лучей

Пусть две волны создаются когерентными источниками $S_1$ и $S_2$ и до точки О проходят разные ***геометрические длины путей*** $l_1$ и $l_2$ в средах с абсолютными показателями преломления $n_1$ и $n_2$ соответственно (рис. 2).

***Оптической длиной пути*** $L$ называется произведение геометрической длины пути $l$ световой волны на абсолютный показатель преломления вещества $n$, в котором она распространяется волны $L = nl$.

Величину $\Delta = L_1 - L_2 = n_2 l_2 - n_1 l_1$ называют ***оптической разностью хода*** интерферирующих волн, (Δ-дэльта, метр).

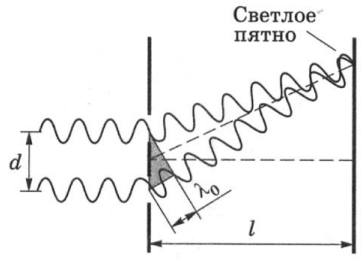
где $L = nl$ - оптическая длина пути светового луча, *м*,

$\Delta = L_1 - L_2 = n_2 l_2 - n_1 l_1$ - оптическая разность хода интерферирующих лучей, *м*,

$n_1$ и $n_2$ - абсолютные показатели преломления 1-ой и 2-й среды, в которых распространяются интерферирующие лучи.

$l_1$ и $l_2$ - геометрические длины путей 1-го и 2-го лучей, *м*.

## Условие максимума при интерференции света

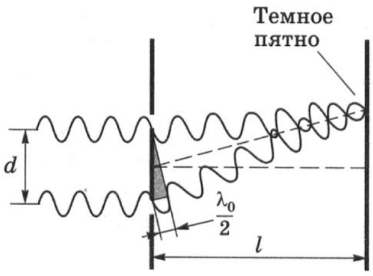



Если оптическая разность хода Δ интерферирующих лучей равна чётному числу полуволн $\frac{\lambda}{2}$, то будет наблюдаться **максимум** (в этом случае волны приходят в данную точку пространства в одинаковой фазе)

$$\Delta_{мах} = 2k\frac{\lambda}{2},$$

где $\Delta = L_1 - L_2 = n_2 l_2 - n_1 l_1$ - оптическая разность хода интерферирующих лучей, *м*

## Условие минимума при интерференции света




Если оптическая разность хода Δ интерферирующих лучей равна нечётному числу полуволн $\frac{\lambda}{2}$, то будет наблюдаться **минимум** (в этом случае волны приходят в данную точку пространства в противофазе)

$$\Delta_{min} = (2k+1)\frac{\lambda}{2},$$

где $\Delta = L_1 - L_2 = n_2 l_2 - n_1 l_1$ - оптическая разность хода интерферирующих лучей, *м*

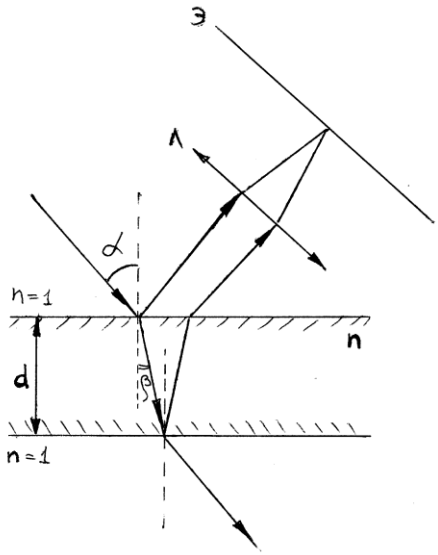
## 4. Причина интерференции световых волн

Для возникновения интерференции света необходимо выполнение сразу двух условий:
1. Световые волны должны быть когерентны,
2. интерферирующие волны должны иметь одинаковую плоскость поляризации, то есть одинаковые направления колебаний векторов напряжённости электрического поля $\vec{E}$.

В этом случае возможны две ситуации:
1. если в данную точку пространства волны приходят в одинаковой фазе, с одинаковой плоскостью поляризации, то направления колебаний векторов $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ оказываются сонаправленными. В этом случае согласно принципу суперпозиции результирующее поле равно $E_{рез} = E_1 + E_2$ и будет наблюдаться усиление света в этой точке пространства (то есть условие максимума),
2. если в данную точку пространства волны приходят в противофазе, с одинаковой плоскостью поляризации, то направления колебаний векторов $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ оказываются противоположно направленными. В этом случае согласно принципу суперпозиции результирующее поле равно $E_{рез} = E_1 - E_2$ и будет наблюдаться ослабление света в этой точке пространства (то есть условие минимума)

## 5. Интерференция света в тонких плёнках

***Тонкими*** *называются плёнки, в которых возможно наблюдение интерференции света.*
(их толщина обычно не превышает нескольких десятков длин волн)




При падении света на тонкую прозрачную плёнку происходит отражение от обеих поверхностей плёнки. В результате возникают две световые волны, которые при определённых условиях могут интерферировать.

Оптическую разность хода двух волн при отражении от тонкой плоскопараллельной пластинки в отражённом свете можно определить по формуле

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha} + \frac{\lambda}{2} = 2dn\cos\beta + \frac{\lambda}{2},$$

где
$\Delta$ - оптическая разность хода волн, *м*
$d$ - толщина плёнки, *м*
$n$ - показатель преломления плёнки
$\alpha$ - угол падения света на плёнку
$\beta$ - угол преломления света в плёнке
$\lambda$ - длина световой волны, падающей на плёнку, *м*.

## Кольца Ньютона

***Кольцами Ньютона*** *называется интерференционная картинка в виде чередующихся тёмных и светлых концентрических колец, которые возникают при отражении света от двух поверхностей, одна из которых плоская, а другая имеет относительно большой радиус кривизны и соприкасается с первой* (например, стеклянная пластинка соприкасается с плосковыпуклой линзой).

Если на такую систему в направлении, перпендикулярном плоской поверхности линзы, падает пучок ***монохроматического света***, то световые волны, отражённые от нижней границы линзы и верхней границы плоской поверхности пластинки, могут интерферировать между собой.

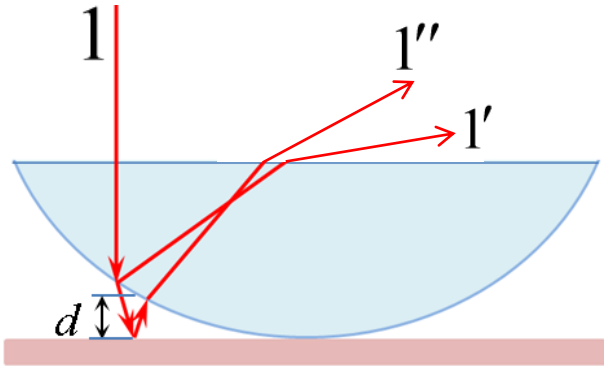


Рис.3. Оптическая схема колец Ньютона

Интерференция света возникает в результате возникновения оптической разности хода $\Delta$ между интерферирующими световыми лучами $1'$ и $1''$ в тонком зазоре (обычно воздушном), разделяющем соприкасающиеся поверхности. Этот воздушный зазор играет роль тонкой плёнки переменной толщины.

Оптическая разность хода между лучами $1'$ и $1''$, отраженными от верхней и нижней поверхностей воздушного зазора на произвольном расстоянии $r$ от точки О, равна

$$\Delta = 2nd + \frac{\lambda}{2},$$

где $n$ - показатель преломления воздуха можно принять равным единице,

$d$ - толщина воздушного зазора,

$\lambda$ - длина световой волны.

Оптическую разность хода между лучами, отраженными от верхней и нижней поверхностей воздушного зазора на произвольном расстоянии $r$ от точки О можно найти так же из геометрических соображений. В случае колец Ньютона можно получить следующее уравнение:

$$\Delta = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2}.$$

### Радиусы светлых колец Ньютона в отражённом свете

$$r_m^{светл} = \sqrt{(2m-1)\frac{\lambda}{2}R}, \quad \text{где} \quad m = 1,2,3\ldots$$

### Радиусы тёмных колец Ньютона в отражённом свете

$$r_m^{темн} = \sqrt{m\lambda R}, \quad \text{где} \quad m = 0,1,2\ldots,$$

$R$ - радиус кривизны линзы, *м*,

$\lambda$ - длина световой волны, *м*,

$m$ - номер кольца.