Лекция № 14

Оптика (часть I)

Когда-то под термином "оптика" понимали науку о зрении. Ныне оптика - раздел физики, изучающий процессы испускания света, его распространения в различных средах и взаимодействие с веществом.

I. О природе света

К концу XVII века сформировались две теории о природе света: 1) *Корпускулярная теория* (разработанная *Ньютоном*) утверждала, что свет есть поток частиц (*корпускул*), летящих от источника света; 2) *Волновая теория* (разработанная *Гюйгенсом*) утверждала, что свет есть продольная волна во всепроникающей упругой среде "эфире". Обе теории хорошо объясняли явления отражения и преломления света, но явления интерференции, дифракции и поляризации света не укладывались в рамки этих теорий. К началу XIX века волновая теория была значительно развита и усовершенствована. В основу волновой теории был положен *принцип Гюйгенса-Френеля*, состоящий из двух положений: а) все точки волнового фронта световой волны сами являются источниками вторичных волн (идентичных исходной); б) интенсивность световой волны является результатом интерференции (сложения) этих вторичных волн.

В 1865 г. *Джеймс Максвелл* теоретически доказал, что: 1) свет является поперечной электромагнитной волной с $\lambda = 0{,}38 \div 0{,}77$ мкм; 2) для распространения света не нужна среда (эфир). Опыты *И. Физо* (1849г.) и *А. Майкельсона* (1881г.) подтвердили, что скорость света действительно $\approx 3 \cdot 10^8$ м/с, как это и следовало из теории Максвелла. А в 1899 г. русский физик *П.Н. Лебедев* измерил давление света, существование которого также следовало из этой теории.

Казалось, волновая теория возобладала, но она не могла объяснить такие явления, как: 1) процесс излучения и поглощения света; 2) внешний фотоэффект, открытый *Г. Герцем* в 1887 г.; 3) дискретность (линейчатость) спектров излучения и поглощения газов и др.

PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com

В начале XX века получила развитие обновлённая корпускулярная теория света. В 1900 г. немецкий физик *Макс Планк* выдвинул *квантовую гипотезу* электромагнитного поля, согласно которой энергия поля может изменяться только дискретно (т.е. порциями, а не непрерывно). Эти порции энергии ($\Delta E = \mathrm{h} \cdot n$) Планк назвал *квантами.* В 1905 г. *А. Эйнштейн*, объясняя явление внешнего фотоэффекта, разработал *фотонную теорию* света, согласно которой свет - это поток особых световых частиц - *фотонов*, скорость которых одинакова и в свободном пространстве $\approx 3 \cdot 10^8$ м/с, а масса покоя равна нулю.

Таким образом, по современным представлениям свет имеет двойственную природу. В одних явлениях (интерференция, дифракция, поляризация) свет проявляет себя как волна, в других явлениях (фотоэффект, люминесценция, излучение и поглощение света) - как поток особого вида частиц.

II. Геометрическая оптика

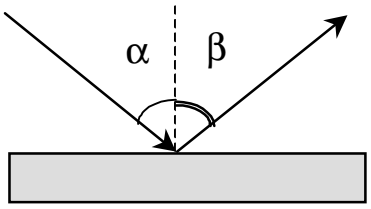
В случае если размеры предметов, рассматриваемых в задаче, значительно (т.е. не менее чем в 10 раз) больше длины волны λ света, то волновые свойства света почти не проявляются и его можно представлять в виде прямолинейно распространяющихся *лучей* – линий, перпендикулярных фронту волны.

При распространении в веществе свет взаимодействует с молекулами, в результате чего его скорость уменьшается. Для характеристики скорости света в веществе ввели понятие *показателя преломления*, являющегося оптической характеристикой вещества (среды).

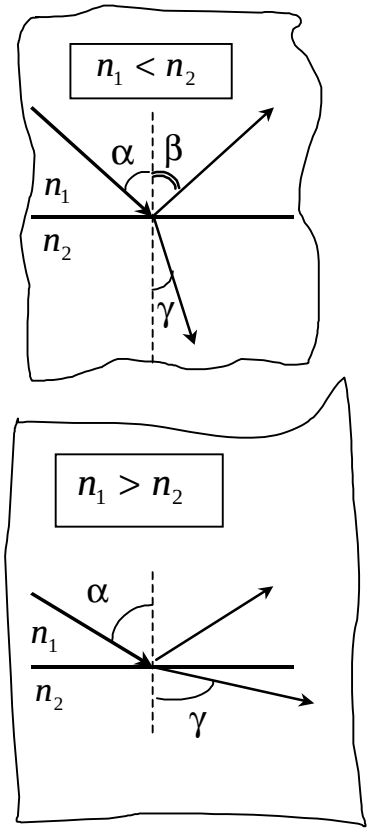
Абсолютный показатель преломления $n_{абс}$ - число, показывающее, во сколько раз скорость света ϑ в данной среде меньше, чем в вакууме: $n_{абс} = C / J > 1$. Среду с б.льшим $n_{абс}$ называют *оптически более плотной*.

Относительный показатель преломления - число, показывающее, во сколько раз скорость света во второй среде ϑ_2 меньше, чем в первой ϑ_1: $n_{отн} = J_2 / J_1 = n_{21}$. Первой называют среду из которой падает свет, а второй – в какую он проникает.

PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com



Закон отражения света: 1) луч падающий, луч отражённый и перпендикуляр, восстановленный из точки падения к отражающей поверхности, лежат в одной плоскости; 2) угол падения α равен углу отражения β; 3) луч падающий и отражённый обратимы, т.е. если луч направить на отражающую поверхность под углом β, то отражённый луч "пойдёт" по траектории падающего луча в первом случае.

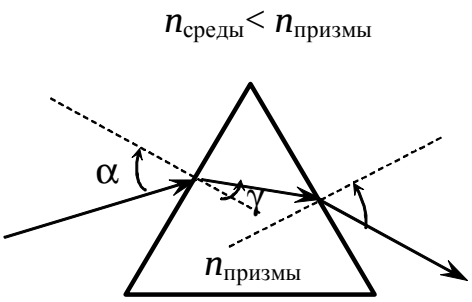


Закон преломления света: 1) лучи (падающий, отражённый и преломлённый) и перпендикуляр к границе сред лежат в одной плоскости; 2) лучи падающий и преломлённый обратимы; 3) $\boxed{\frac{\sin a}{\sin g} = \frac{n_2}{n_1}}$.

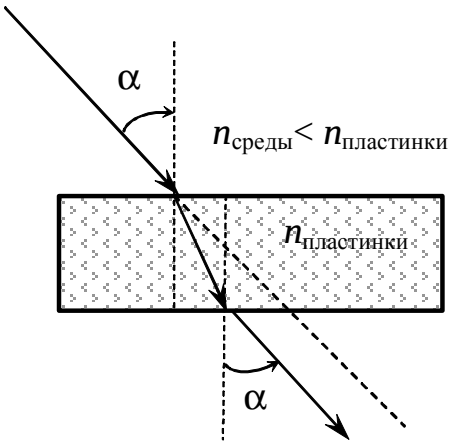
Явление *полного внутреннего отражения* (ПВО) наблюдается при переходе света из оптически более плотной среды в менее плотную. В этом случае имеем: $\alpha < \gamma$. Тогда, некоторому $\alpha_{кр}$, соответствует $\gamma = 90^o$ (т.е. свет не проникает во вторую среду) и, если вторая среда – воздух (n_2=1), то из закона преломления получим: $\boxed{\sin a_{кр} = 1/n_1}$. Причём, по мере стремления α к $\alpha_{кр}$, интенсивность преломлённого луча уменьшается и при $\alpha=\alpha_{кр}$ становится равной нулю.

Примеры ПВО в технике и в природе: 1) *оптические волокна* для передачи световых сигналов на расстояние; 2) медицинская *эндоскопия* с помощью оптических волокон; 3) поворотные призмы (в перископах и биноклях); 4) *рефрактометрия* (измерение показателей преломления веществ); 5) миражи (вследствие зависимости показателя преломления воздуха от температуры в атмосфере образуются временные оптические волноводы) и "лужи" на сухом нагретом асфальте; 6) вид со дна водоёма вверх на гладкую поверхность воды (кажется, что сидишь на дне колодца).

PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com

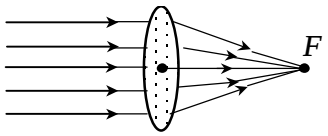


При прохождении луча *монохроматического света* (света со строго определённой длиной волны) через призму, выполненную из оптически более плотного материала, чем окружающая среда, свет отклоняется к её основанию. Это следует из закона преломления света, применяемого при прохождении лучом граней призмы (см. рис.)



При прохождении же луча монохроматического света через плоскопараллельную пластинку (например, через оконное стекло) он претерпевает небольшое смещение, пропорциональное толщине пластинки и величине показателя преломления её материала, но не изменяет своего направления.

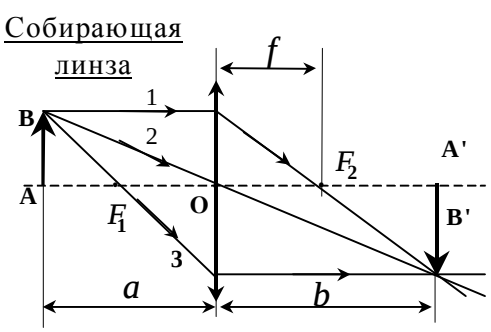
Линза - это прозрачное тело, ограниченное двумя криволинейными (чаще сферическими) поверхностями (одна из которых может быть плоской). Линзу называют *тонкой*, если её толщина d много меньше радиусов кривизны её поверхностей: $d << R_1, R_2$. *Главная оптическая ось* - прямая, проходящая через центры кривизны поверхностей. Линзу можно мысленно разделить на стопу призм, отклоняющих лучи к своему основанию. Поэтому выпуклая линза является собирающей, а вогнутая – рассеивающей (при условии, что линзы выполнены из оптически более плотного, чем окружающая среда, материала).

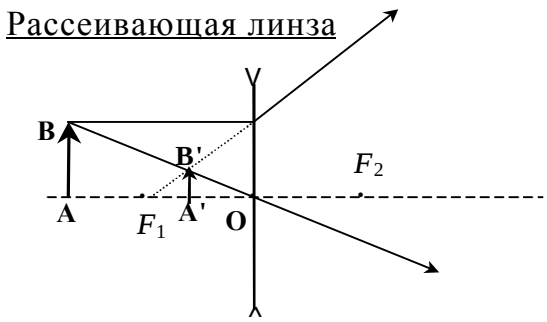


Фокус линзы - точка на главной оптической оси, в которой пересекаются лучи (или их продолжения), падающие на линзу параллельно её главной оптической оси.

Построение формируемого линзой изображения: надо из каждой крайней точки объекта провести не менее двух (из 3-х указанных на рисунке) лучей до их пересечения (или до пересечения продолжений этих лучей).

PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com





Формула тонкой линзы: $\boxed{\frac{1}{a}+\frac{1}{b}=(n-1)\cdot\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)}$, где $n=\frac{n_{линзы}}{n_{среды}}$ - относительный показатель преломления материала линзы относительно окружающей среды (он может быть меньше 1!).

Если $a\to\infty$, т.е. лучи падают на линзу параллельно главной оптической оси, то $b=f$ и формула тонкой линзы принимает вид:

$$\boxed{D=\frac{1}{f}=(n-1)\cdot\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)}\text{, откуда }\boxed{\frac{1}{a}+\frac{1}{b}=\frac{1}{f}}.$$

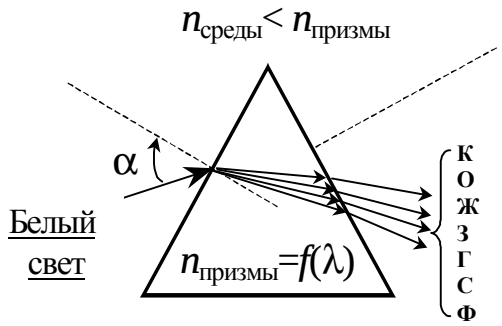
Величину D называют *оптической силой линзы* и измеряют её в диоптриях (дп). Для рассеивающих линз $f<0$, что может быть либо при $n_{среды}>n_{линзы}$, либо при $R_1,R_2<0$, т.е. в случае, если сама сферическая поверхность лежит по одну сторону с её центром кривизны относительно оптического центра линзы.

III. Дисперсия света

Это явление зависимости показателя преломления света n от его длины волны λ (или частоты ν). Оно описывается волновой теорией света. Различают *нормальную* и *аномальную* дисперсию. При нормальной дисперсии $n\sim 1/l$ (или $n\sim n$), при аномальной - $n\sim l$ (или $n\sim 1/n$). Бесцветные прозрачные среды (т.е. среды, слабо поглощающие свет) обладают нормальной дисперсией; а вот окрашенные среды могут иметь (но не всегда имеют) аномальную дисперсию.

Вследствие дисперсии луч белого света, проходящий через границу раздела двух сред, оказывается разложенным на совокупность монохроматических лучей. Попадая на экран, эти лучи образуют *дисперсионный спектр* -

PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com



ряд разноцветных полос. Явление расщепления луча белого света призмой в радужный спектр впервые описал И. Ньютон. Отметим, что для наблюдения спектра на призму следует направлять узкий пучок белого света.

IV. Интерференция света

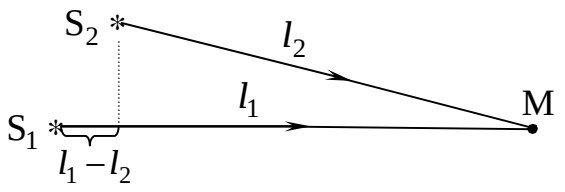
В лекции № 4, при рассмотрении сложения одинаково направленных колебаний с частотами $\omega_1 = \omega_2 = \omega$, отмечалось, что результирующие колебания являются также гармоническими с той же ω и амплитудой *A*, зависящей от разности фаз $\Delta\varphi$ исходных колебаний ($A = A_{max}$ при $\Delta j = \pm 2m \cdot p$ и $A = A_{min}$ при $\Delta\varphi = \pm(2m+1) \cdot p$, где m - целое число). Такое увеличение и уменьшение амплитуды результирующих колебаний частиц среды наблюдается и при сложении двух волн с одинаковыми частотами ω в области их пересечения.

Интерференция - явление сложения волн одинаковой природы, в результате которого в области их пересечения устанавливается постоянное распределение амплитуды результирующих колебаний, т.е. происходит пространственное перераспределение энергии волн. Поскольку свет является волновым процессом, то явление интерференции свойственно и для него. Однако наблюдать интерференцию света можно лишь при выполнении определённых условий. Каких же? Во-первых, интерферирующие световые волны должны быть *монохроматическими*, т.е. должны иметь бесконечно узкие частотные спектры $\Delta\omega \to 0$, при соблюдении равенства $\omega_1 = \omega_2 = \omega$; во-вторых, эти волны должны быть *когерентными*, т.е. разность их фаз $\Delta\varphi$ в любой точке области пересечения не должна изменяться со временем.

Рассмотрим процесс сложения двух когерентных волн, характеризуемых амплитудами A_1, A_2 и частотами $\omega_1 = \omega_2 = \omega$. Пусть два пространственно разнесённых источника волн находятся в некоторой упругой среде (не случайно Гюйгенс придумал *эфир*!). Тогда, в произвольной точке М области пе-

PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com

ресечения волн, частицы среды участвуют одновременно в двух колебательных процессах (вдоль оси y):



$$y_1 = A_1 \cdot sin\left[w \cdot (t - {}^{l_1}\!/_{J})\right] \quad \text{и}$$

$$y_2 = A_2 \cdot sin\left[w \cdot (t - {}^{l_2}\!/_{J})\right],$$

где ϑ - скорость волны в среде.

Учитывая, что $\frac{w}{J} = \frac{2p}{T \cdot J} = \frac{2p}{l}$, эти уравнения можно записать в виде:

$$y_1 = A_1 \cdot sin\underbrace{\left[w \cdot t - \frac{2p}{l} \cdot l_1\right]}_{\varphi_1} \quad \text{и} \quad y_2 = A_2 \cdot sin\underbrace{\left[w \cdot t - \frac{2p}{l} \cdot l_2\right]}_{\varphi_2}.$$

В лекции №4 показано, что результат сложения таких колебаний есть также гармонические колебания: $y = y_1 + y_2 = A \cdot \sin(\omega \cdot t)$, где

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot cos(\Delta j\ )}, \text{ а } \Delta j\ = j_1 - j_2 = \frac{2p}{l} \cdot (l_1 - l_2).$$

В случае $A_1 = A_2 = A_o$, получим:

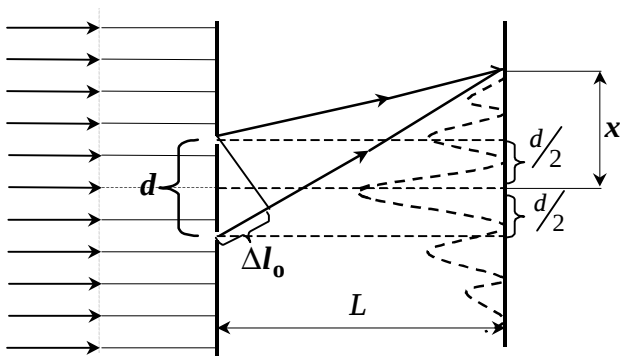
$A = 2A_o$ при $\Delta j\ = \frac{2p}{l} \cdot (l_1 - l_2) = \pm 2m \cdot p$, откуда $l_1 - l_2 = \pm 2m \cdot \frac{l}{2}$;

$A = 0$ при $\Delta j\ = \frac{2p}{l} \cdot (l_1 - l_2) = \pm(2m+1) \cdot p$, откуда $l_1 - l_2 = \pm(2m+1) \cdot \frac{l}{2}$.

Величину $\Delta l_o = l_1 - l_2$ называют *геометрической разностью хода* интерферирующих лучей. Если же лучи распространяются в среде с показателем преломления $n \neq 1$, то геометрическую разность хода, следует заменить на *оптическую разность хода* $\Delta l = \Delta l_o \cdot n$. Тогда, условия максимума и минимума амплитуды результирующих световых колебаний при интерференции принимают вид: $\boxed{\Delta l = \pm 2m \cdot \frac{l}{2}}$ <u>для максимума</u> и $\boxed{\Delta l = \pm(2m+1) \cdot \frac{l}{2}}$ <u>для минимума.</u>

PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com

Обычно источником света являются нагретые тела, точнее релаксирующие (из верхних в нижние энергетические состояния) атомы и молекулы этих тел. Согласовать процессы релаксации такого огромного числа частиц невозможно, поэтому нагретые тела испускают некогерентные и немонохроматические световые волны. До появления лазеров (в которых всё-таки удаётся согласовать процессы релаксации большого числа атомов) для наблюдения интерференции света когерентные пучки получали разделением и последующим сведением световых лучей, исходящих от одного и того же теплового источника. Рассмотрим некоторые из этих методов.



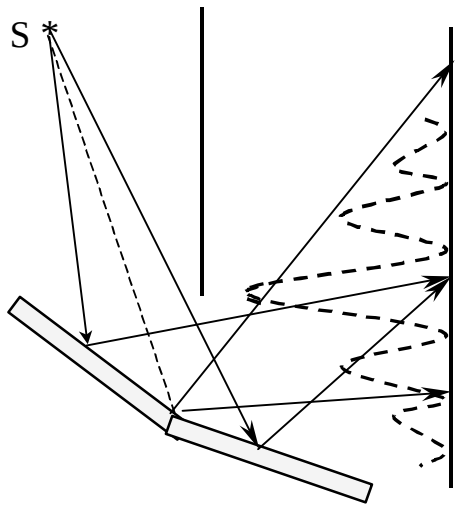
а) *Метод Юнга* (английский врач, 1802 г.). Непрозрачный экран с двумя щелями, равноудалёнными от оси на расстояние $d/2$, освещают монохроматической плоской световой волной, исходящей от удалённого источника. Согласно принципу Гюйгенса-Френеля (см. лекцию № 14), щели, будучи расположенными на одном волновом фронте, сами являются источниками когерентных световых волн, которые могут интерферировать. В результате интерференции волн, исходящих от щелей, на втором экране, расположенном параллельно первому на расстоянии L, можно наблюдать чередующиеся тёмные и светлые полосы (совокупность этих полос называют *интерференционной картиной*). Рассчитаем удаление полос от оси в случае, если окружающая среда - воздух:

$$\frac{x}{L} \approx \frac{\Delta l_o}{d} \quad \text{Þ} \quad x \approx \Delta l_o \cdot \frac{L}{d} \quad \text{Þ} \quad \boxed{x_{max} \approx m \cdot l \cdot \frac{L}{d}} \quad \text{и} \quad \boxed{x_{min} \approx (2m+1) \cdot \frac{l}{2} \cdot \frac{L}{d}}.$$

В случае, если источник света немонохроматический, то интерференционная картина представляет собой набор чередующихся <u>окрашенных</u> полос, т.к. значения x_{max} и x_{min} зависят от длины волны λ.

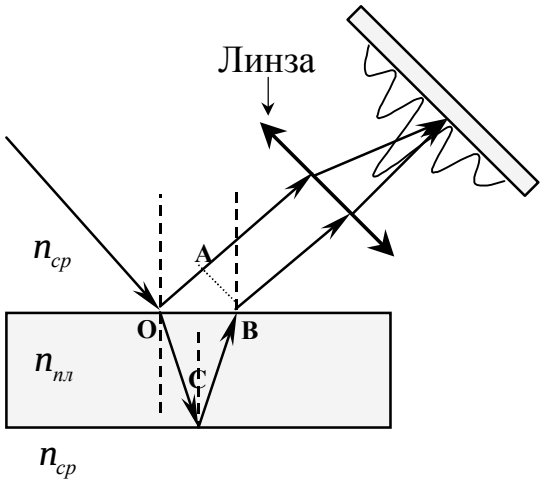
PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com

б) *Метод Френеля* (французский инженер, 1816 г.). Свет от источника S падает расходящимся пучком на два плоских зеркала, распложенных относительно друг друга под углом, немного меньшим 180°. Лучи, отражённые зеркалами, взаимно когерентны и поэтому могут интерферировать. Интерференционную картину наблюдают на экране, расстояние от которого до разных точек зеркал, различно, что и обусловливает постепенное изменение оптической разности хода Δl между интерферирующими лучами.



в) *Интерференция света в тонких плёнках* (метод Ньютона). В природе часто можно наблюдать радужное окрашивание тонких плёнок (масляные плёнки на воде, мыльные пузыри, крылышки насекомых, оксидные плёнки на металлах и т.п.), возникающее в результате интерференции света, отражённого двумя поверхностями плёнки. Падающий на пластинку пучок, отражаясь от её обеих поверхностей, расщепляется на два когерентных пучка, которые и интерферируют в отражённом свете. Оптическая разность хода Δl, возникающая при отражении между интерферирующими лучами, равна:

$$\Delta l = n_{пл} \cdot (OC + CB) \pm l/2 - n_{ср} \cdot OA,$$

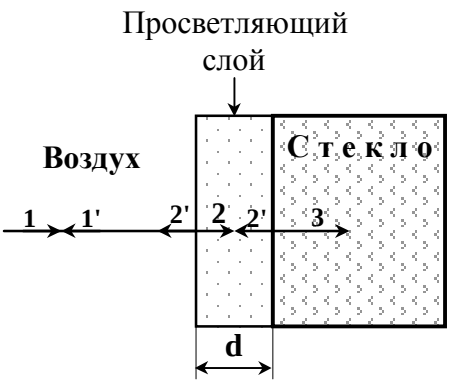


где слагаемое $\pm\lambda/2$ обусловлено потерей полуволны при отражении света от границы раздела с оптически более плотной средой. Если $n_{пл} > n_{ср}$, то потеря полуволны произойдёт в точке O и $\lambda/2$ надо взять со знаком (-); если же $n_{пл} < n_{ср}$, то потеря полуволны произойдёт в точке C и $\lambda/2$ надо взять со знаком (+).

PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com

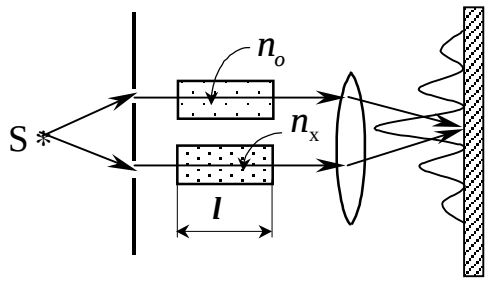
Применение интерференции света:

1) *Просветление линз*. При прохождении света через каждую поверхность линзы он теряет в результате частичного отражения $\approx 4\%$ своей интенсивности. Если линз в оптическом приборе много, то это приводит к недопустимому снижению светосилы прибора. Кроме того, отражения от поверхностей линз приводят к возникновению нежелательных бликов. Для устранения указанных недостатков и выполняют "просветление" оптики. Для этого на поверхности линз наносят тонкие плёнки с показателем преломления $n_{пл}$, меньшим, чем у материала линзы. При отражении света от границ раздела "воздух – плёнка" и "плёнка - стекло" возникает интерференция когерентных лучей 1' и 2'. Толщину плёнки d и показатели преломления стекла n_c и плёнки $n_{пл}$ можно подобрать так, чтобы волны, отражённые от обеих поверхностей плёнки, гасили друг друга. Для этого их амплитуды должны быть равны, а оптическая разность хода $\Delta l = (2m+1)\cdot l/2$. Расчёт показывает, что амплитуды отражённых лучей равны, если $n_{пл} = \sqrt{n_c}$. Так как $n_c > n_{пл} > n_{воздуха}$, то потеря $\lambda/2$ происходит на обеих поверхностях; следовательно, условие минимума (при нормальном падении света) имеет вид: $2\cdot n_{пл}\cdot d = (2m+1)\cdot l/2$. Обычно принимают $m = 0$, тогда просветляющая плёнка должна удовлетворять требованию $n_{пл}\cdot d = l/4$. Так как добиться одновременного гашения для всех λ видимого света невозможно, то просветляющее покрытие оптимизируют для λ=0,55 мкм (зелёный цвет), к которой глаз наиболее чувствителен. Для света же с другими λ условие гашения выполняется не точно, поэтому объективы с просветлённой оптикой в отражённом свете имеют синевато-красный оттенок (непогашенные крайние цвета видимого спектра).



PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com

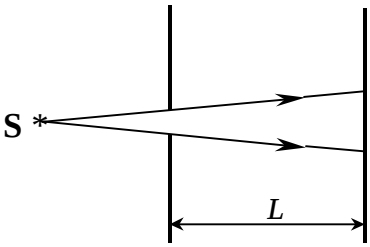
2) *Интерферометрия* - оптический метод точного определения расстояния (точность $\sim\lambda/10$) и показателя преломления (точность 10^{-6}). Для этого используют приборы - *интерферометры*. На пути интерферирующих лучей располагают две одинаковые кюветы длиной l, одна из которых заполнена газом с известным показателем преломления n_o, а другая - исследуемым газом с неизвестным n_x. Между лучами возникает дополнительная оптическая разность хода $\Delta l = (n_x - n_o)\cdot l$, что приводит к сдвигу интерференционных полос на экране (по сравнению с положением этих полос до установки кювет). По величине сдвига рассчитывают n_x.



Кроме перечисленного, интерферометры применяются для контроля качества поверхностей оптических изделий, измерения углов, смещений, для исследования быстропротекающих процессов. Применяя интерферометр, Майкельсон доказал, что "эфира" нет. С помощью интерферометров исследовали распространение света в движущихся телах, что позволило экспериментально подтвердить справедливость *теории относительности*.

V. Дифракция света

Дифракцией называют явление перераспределения энергии в отражённом и прошедшем излучении, возникающее вследствие интерференции вторичных (относительно падающей волны) волн. В упрощённой интерпретации, явлением дифракции называют огибание волнами препятствий. Действительно, вследствие дифракции волны могут попадать в область геометрической тени (огибать препятствия), проникать через небольшие отверстия в экранах и т.д. Например, звук хорошо слышен за углом дома, т.е. звуковая волна его огибает. Явление дифракции характерно и для света, как



PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com

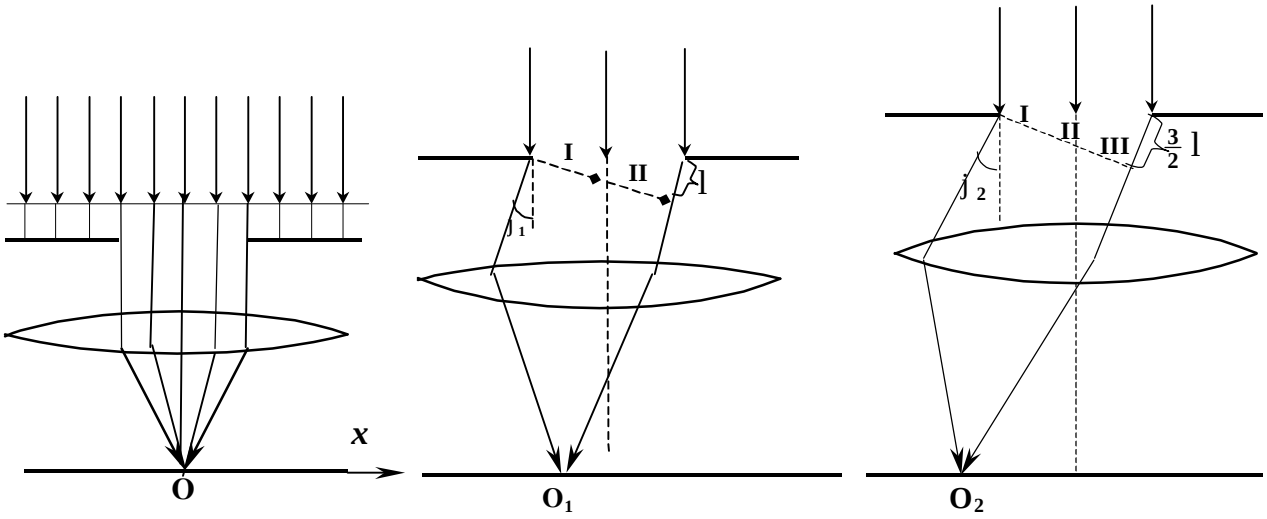
объекта, имеющего волновую природу. Например, светлое пятно, полученное при освещении экрана через отверстие, не имеет резкой тени. Это особенно заметно при $d << L$ (где d - размер отверстия), когда светлое пятно на экране представляется состоящим из чередующихся светлых и тёмных колец. При использовании белого света *дифракционная картина* приобретает радужную окраску. Отметим, что сравнимость размера преграды с длиной волны света λ не является необходимым условием для наблюдения дифракции.

Дифракционные картины можно наблюдать и в естественных условиях, например: 1) цветные кольца, окружающие источник света, наблюдаемый сквозь туман или запотевшее стекло, обусловлены дифракцией света на мелких каплях воды; 2) радужный ореол Солнца в морозный день - из-за дифракции света на мелких кристалликах льда; 3) радужные ореолы светящихся предметов при глазных заболеваниях - из-за помутнения прозрачного тела глаза и дифракции света на образовавшихся в этом теле мелких неоднородностях.

Метод зон Френеля. Рассмотрим процесс дифракции света на щели (входном отверстии или диафрагме оптического прибора) более детально. Пусть плоская монохроматическая волна падает на щель размером d (см. рис. на следующей странице). Согласно принципу Гюйгенса-Френеля, каждая точка волнового фронта на входном отверстии является источником вторичных сферических волн, лучи которых расходятся за экраном по всем направлениям. Для любой пары симметричных лучей, падающих на экран в точках его пересечения с плоскостью симметрии отверстия оптическая разность хода Δl равна нулю. Поэтому в точке О происходит усиление освещённости – светлая полоса с интенсивностью I_o.

Выберем такое направление φ_1, для которого разность хода между крайними лучами в дифрагирующем пучке $\Delta l = 2 \cdot \lambda/2$. Тогда, весь этот пучок можно разделить на две равные зоны I и II, называемые *зонами Френеля*, для ко-

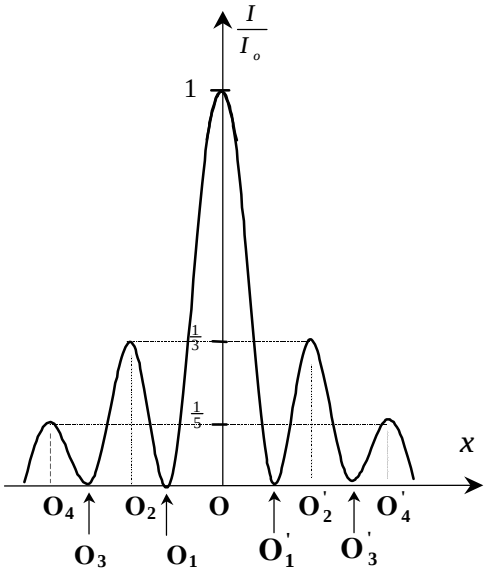
PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com



торых разность хода между каждым лучом зоны I и соответствующим ему лучом зоны II равна $\lambda/2$.

Поэтому все лучи обеих зон в точке O_1 попарно погасятся - тёмная полоса.

Рассмотрим теперь пучок, дифрагирующий под углом φ_2, для которого разность хода Δl между крайними лучами равна $\frac{3}{2}\cdot\lambda$. Тогда весь волновой фронт этого пучка можно разделить на три зоны Френеля. Соответствующие лучи от двух соседних зон, имеющие оптическую разность хода равную $\lambda/2$, взаимно попарно погасятся, и поэтому точка O_2 окажется освещена только лучами III зоны. Причём, интенсивность света в точке O_2 составляет только $\frac{1}{3}$ от интенсивности света в точке O.



Лучи, приходящие в точку O_3 экрана, дифрагируют из щели под углом φ_3, причём разность хода между крайними лучами в таком пучке составляет 2λ. Поэтому весь волновой фронт пучка можно разбить на 4 зоны Френеля. Соответствующие лучи зон I и II, III и IV, имея оптическую разность хода, равную $\lambda/2$, взаимно попарно погасятся, и в точке O_3 получим нулевую освещённость.

PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com

Для пучка, дифрагирующего под углом φ_4, оптическая разность хода между крайними лучами составит $\frac{5}{2}\cdot\lambda$, соответственно весь световой пучок можно разбить на 5 зон Френеля. Лучи от первых четырёх зон взаимно погасятся и точка O_4 будет освещена только лучами V зоны с интенсивностью $I_o/5$.

Экстраполируя аналогичные рассуждения на другие направления дифракции, можно утверждать, что пучки лучей, дифрагирующих под углами, соответствующими нечётному числу зон Френеля, создают на экране дифракционные максимумы, а пучки лучей, дифрагирующих под углами, соответствующими чётному числу зон Френеля, создают дифракционные минимумы. Причём, освещённость максимумов уменьшается при увеличении угла дифракции лучей.

Получим формулы для расчёта углов φ, соответствующих светлым и тёмным полосам на экране (окружающая среда - воздух): светлым полосам соответствует $\Delta l = (2m+1)\cdot l/2$, а тёмным $\Delta l = 2m\cdot l/2$. Учитывая, что для воздуха n=1 и $\Delta l_o = d\cdot sin\, j$, окончательно получим: светлым полосам соответствуют такие направления, для которых $sin\, j_{max} = (2m+1)\cdot l/2d$, а тёмным - $sin\,\varphi_{min} = 2m\cdot l/2d$, где m - порядок дифракционного максимума или минимума (целое число).

При дифракции плоской электромагнитной волны на множестве параллельных щелей (*дифракционной решётке*) дифракционные максимумы (светлые полосы) получаются более яркими и узкими, а разделяющие их минимумы (тёмные полосы) - более широкими и тёмными.

Положение главных максимумов зависит от длины волны λ. Поэтому, при пропускании через решётку белого света, все максимумы, кроме центрального с $m = 0$, разложатся в спектр, фиолетовая область которого обращена к центру дифракционной картины, а красная - наружу. Это свойство дифракционной решётки используют для исследования спектрального состава света.

PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com

VI. Дифракция света на трёхмерной решётке

Дифракция света наблюдается не только на двумерных, но и на трёхмерных решётках, например на кристаллических решётках. При этом геометрически правильную дифракционную картину наблюдают как в прошедшем, так и в отражённом свете. Эти дифракционные картины несут информацию о структуре решётки, что используется в *кристаллографии* (при дифракции рентгеновских лучей) для анализа кристаллических образцов (метод *Лауэ*).

Дифракция света наблюдается и в *мутных средах*, таких как аэрозоли (облака, дым, туман, дождь), эмульсии, коллоидные растворы и т.п. Свет, проходя через мутную среду, дифрагирует от беспорядочно расположенных неоднородностей, давая равномерное распределение интенсивности по всем направлениям, не создавая какой-либо определённой дифракционной картины (поэтому туман и дым обычно имеют белый цвет). Однако интенсивность света, рассеянного микрочастицами, зависит от соотношения его длины волны λ и среднего размера неоднородностей. Так, например, дифракция света влияет на яркость полос в радуге. По виду радуги можно приближённо оценивать диаметр d капель дождя. При d=1÷2 мм наблюдается очень яркий фиолетовый и зелёный цвета, хорошо видна красная дуга и едва заметна голубая дуга. При уменьшении d до 0,5 мм наблюдается заметное ослабление красного цвета, который практически исчезает при d=0,2 мм. При d=0,08÷0,1 мм в радуге сохраняется ярким лишь фиолетовый цвет, а вся радуга уширяется и бледнеет. При d<0,05 мм наблюдается белая радуга.

Рассеяние света имеет место и в мутной среде. Например, когда узкий пучок солнечных лучей, проходя через запылённый воздух, рассеивается на пылинках и поэтому становится видимым. В незамутнённой же среде луч видимого света невидим, так как на его пути нет рассеивающих свет частиц, от которых он бы отражался и попадал в глаза наблюдателя.

Слабое рассеивание света наблюдается и в *чистых средах*, не содержащих посторонних частиц. Причиной рассеивания света в этом случае являются

PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com

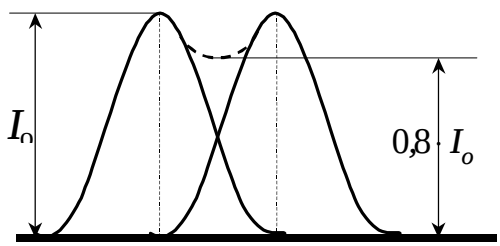
флуктуации (отклонения от среднего значения) плотности, возникающие в результате сбора молекул среды при их тепловом движении в конгломераты с размером $d \sim \lambda$. Такое рассеивание света называют *молекулярным рассеиванием*. Именно оно является причиной голубого цвета неба. Согласно *закону Рэлея*, интенсивность рассеянного света $I \sim n^4$, поэтому голубые и синие лучи (с большими ν) рассеиваются сильнее, чем жёлтые и красные. Кроме того, образование коллективов молекул с $d \sim \lambda$ для голубых лучей (с меньшей λ) более вероятно чем для красных (с большей λ).

VII. Дифракция и разрешающая способность оптических приборов

Разрешающей способностью оптического прибора называют его способность давать раздельные изображения соседних точек объекта.

Почему же изображения соседних точек объекта могут сливаться и быть неразличимы? Дело в том, что любой оптический прибор имеет входное отверстие, характеризуемое диаметром d. Следовательно, на краях этого отверстия (диафрагмы) происходит дифракция принимаемого прибором света. Поэтому пучки лучей, падающие на диафрагму под различными углами, формируют на экране (или светочувствительном слое) свои дифракционные картины в виде концентрических чередующихся светлых и тёмных колец. Эти картины, соответствующие различны точкам объекта, накладываются друг на друга и формируют, в свою очередь, изображение объекта.

Согласно *критерию Рэлея*, изображения двух соседних точечных источников света разрешимы (разделены для восприятия), если центральный максимум дифракционной картины от одного источника совпадает с первым минимумом дифракционной картины от другого. При выполнении критерия Рэлея интенсивность света в "провале" между максимумами составляет 80% от I_o, что является достаточным для разрешения изображений источников. Если изображения источников (точек объекта) разнесены меньше, то они воспринимаются как одна точка.



PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com

Глаз – также является оптическим прибором, имеющим изменяющуюся диафрагму – *зрачок* и одну (в первом приближении) собирающую линзу - *хрусталик*. На *сетчатке* глаза (совокупности световых рецепторов) расположенной на дне *глазного яблока*, формируется действительное, уменьшенное и перевёрнутое изображение объекта. Для прямого восприятия объекта, мозг выполняет зеркальное отображение оптического изображения, полученного на сетчатке.

Оценим угловой размер первого кольца дифракционной картины, получаемой в результате дифракции света (излучённого некоторой точкой объекта) на отверстии зрачка с диаметром D=1мм: $\varphi_1 \approx \dfrac{\lambda}{n_{\text{среды}} \cdot D} \approx \dfrac{0{,}5 \cdot 10^{-6}\,\text{м}}{1{,}336 \cdot 10^{-3}\,\text{м}} \approx$ 10^{-4} рад ≈ 1′. Это означает, что если различие углов зрения на соседние точки объекта меньше величины j_1, то они воспринимаются как одна точка.

С другой стороны, если размер изображения меньше размера одного светорецептора (равного в среднем 10 мкм), то сигнал в мозг поступает только от одного рецептора и объект воспринимается как светящаяся точка, размеры которой оценить невозможно. Поэтому имеет смысл оценить биологический предел глаза для разрешения соседних точек изображения объекта. Для этого рассчитаем угловой размер светорецептора для лучей, исходящих из оптического центра хрусталика. Учитывая, что диаметр глазного яблока ≈25 мм, получим $10 \times 10^{-6}\,\text{м} / 25 \times 10^{-3}\,\text{м} \approx 10^{-4}\,\text{рад} \approx 1'$. То есть, получили примерно такую же цифру, как и для углового размера первого дифракционного кольца. Следовательно, природа не ошиблась и снабдила человека такими светорецепторами, которые полностью реализуют возможности обусловленные дифракцией света на зрачке. Однако при ярком освещении, когда диаметр зрачка становится меньше 1 мм, дифракция света на краях зрачка ограничивает разрешающую способность глаза, так как при этом угловой размер первого кольца дифракционной картины на сетчатке превышает 1′.

PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com

Микроскоп – прибор для увеличения угла зрения на объект. Поскольку микроскоп имеет не одну, а, как минимум, две линзы, то расчёт дифракционной картины для него более сложен, чем для глаза. Но результаты этих расчётов таковы, что минимальное разрешаемое оптическим микроскопом расстояние между соседними точками объекта можно оценить по формуле:

$$\boxed{\Delta x_{min} \approx 0{,}61 \cdot \frac{l}{n_{cp} \cdot sin(\Theta/2)} \approx \frac{l}{2} \approx 0{,}3\ мкм},$$

где Θ - угол между крайними лучами, входящими в объектив.

Разрешающую способность микроскопа определяют как величину: $R = 1/\Delta x_{min}$. Значение R определяет предел полезного увеличения $Г$ микроскопа. В принципе, микроскоп с $Г$=300 позволяет наблюдателю со здоровым зрением увидеть объект с размером равным минимальному разрешаемому оптическим микроскопом расстоянию (действительно $0{,}3мкм \cdot 300 \approx 0{,}1$ мм – минимальное расстояние, разрешаемое невооружённым глазом). Для удобства использования оптических микроскопов людьми с ослабленным зрением, изготавливают микроскопы с увеличением до 3000 раз. Микроскопов с бóльшим увеличением делать не имеет смысла, так как новых деталей изображения это выявить не позволит (сказывается дифракция света на краях объектива).

VIII. Радуга

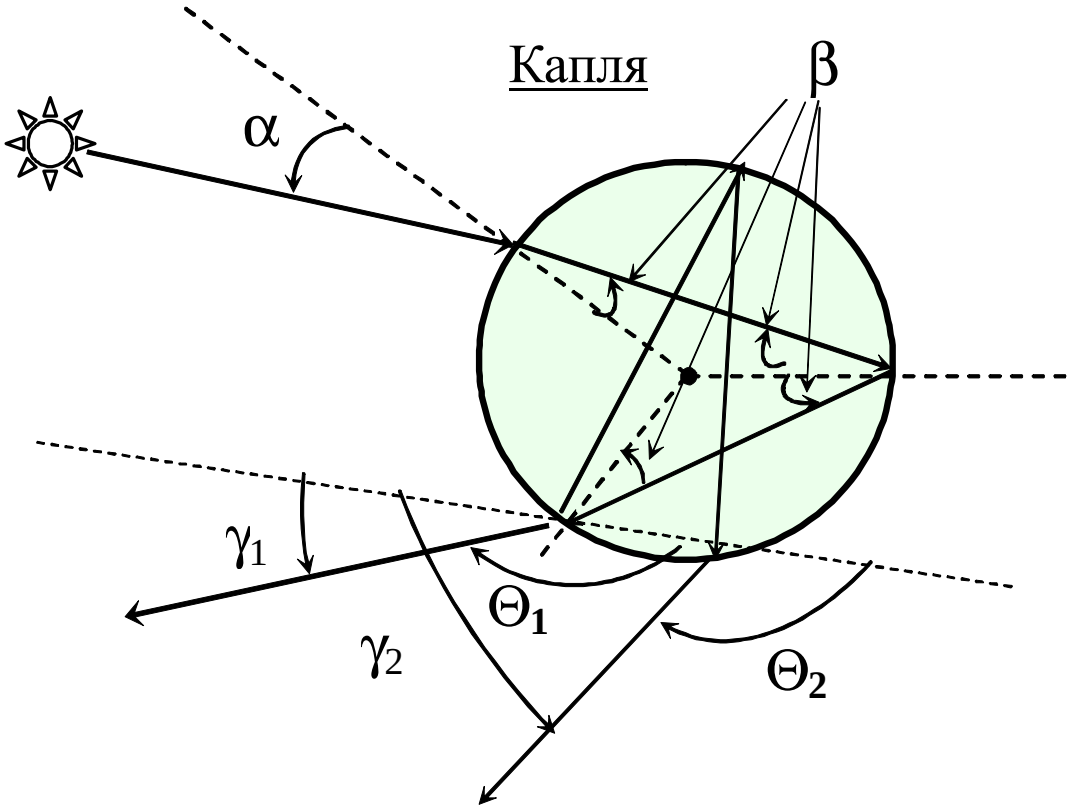
Первое научное объяснение этому изумительному оптическому явлению было дано в 1571 году немецким физиком *Флетчером*, позднее оно было развито итальянцем *Доминико* и французом *Декартом*. Но только *Ньютон*, открыв явление *дисперсии* света, смог объяснить разноцветность радуги.

Яркая многоцветная дуга, которая возникает после дождя или в брызгах водопада, - это *первичная* радуга. Цветные полосы могут сильно отличаться по яркости, но порядок их всегда одинаков: внутри дуги находится фиолетовая полоса, которая переходит сначала в синюю, затем в зелёную, жёлтую, оранжевую и, наконец, красную, образующую дугу с внешней стороны. Вы-

PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com

ше первой, в небе, возникает вторая менее яркая дуга, в которой цветовые полосы располагаются в обратном порядке.

Основные черты радуги можно понять, изучая распространение света внутри изолированной капли воды, имеющей показатель преломления *n*.



Анализируя рисунок, несложно получить следующие соотношения:

$$\begin{cases} \sin a = n \cdot \sin b\ , \\ \Theta = 4\beta - 2\alpha + \pi . \end{cases}$$

Исключив из этих уравнений угол β, получим зависимость Θ(α). Эту зависимость впервые получил и проанализировал *Декарт*. Он нашёл, что функция Θ(α) достигает наименьшего значения $\Theta_1 \approx 138^{\circ}$ при $\alpha \approx 59^{\circ}$. Это означает, что вблизи угла Θ_1 концентрируется максимальное количество лучей. Возникающее в результате резкое возрастание интенсивности рассеянного света – это и есть основная радуга.

PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com

Конечно, капли дождя не висят в воздухе неподвижно, а довольно быстро падают вниз. Поэтому данная капля участвует в формировании изображения радуги лишь в течение очень короткого промежутка времени – тогда, когда направление на неё от наблюдателя составляет угол близкий к $\gamma_1=42^o$. Затем капля выходит из игры, но на смену ей приходят новые и новые капли. Капли сменяют друг друга настолько быстро, что глаз наблюдателя не улавливает происходящей смены; в результате наблюдатель видит неподвижное изображение радуги. Аналогичным образом мы видим неподвижное изображение на экране кино, несмотря на то, что каждую секунду совершается смена 24 кадров. В этом смысле радугу можно назвать ″небесным кино″.

Разноцветность радуги объясняется сложным составом *белого света*, испускаемого Солнцем, и явлением *дисперсии* – зависимостью показателя преломления n вещества (в случае капли – воды) от длины волны λ излучения. Так, для фиолетового света (λ=0,4 мкм) n=1,343, а для красного (λ=0,65 мкм) n=1,331, что обусловливает угловую ширину первой радуги равной $1,7^o$.

Вторая дуга радуги образуется лучами, испытывающими три внутренних отражения. Эти лучи рассеиваются под углом 129°. Её угловая ширина $\sim 3^o$.

Наблюдать радугу можно во время дождя при условии, что Солнце находится позади наблюдателя. Угловые положения радуг первого и второго порядков относительно лучей Солнца соответственно равны $\gamma_1=180^o-138^o=42^o$ и $\gamma_2=180^o-129^o=51^o$. Размер видимой части радуги зависит от положения Солнца над горизонтом: чем ниже Солнце, тем выше радуга. Полную радугу в виде замкнутого кольца можно видеть только с самолёта, когда Солнце и капли находятся ниже горизонтальной плоскости, в которой летит самолёт.

PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com