

### Игошин Фёдор Фёдорович

Кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры общей физики

Московского физико-технического института (МФТИ).

## Свет, цвет, интерференция

В статье дано объяснение цвета волновыми свойствами света и рассказано об окраске мыльных плёнок в зависимости от условий интерференции света в них.

### Длина волны и цвет

Представление о том, что солнечный свет – это смесь разных цветов, было известно ещё во времена Ньютона. Первые опыты по выявлению «компонент» солнечного света (1666 г.) состояли в следующем. Пучок света, проникавший в тёмную комнату через небольшое отверстие в ставне, падал на треугольную стеклянную призму. Пройдя через неё, он уширялся и окрашивался. Окраска напо-

разложения белого света на цвета была названа *спектром* (рис. 1).

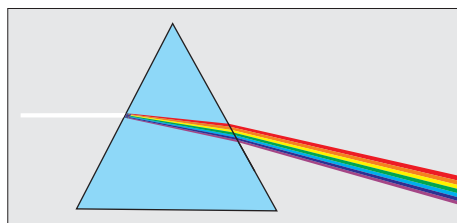


Рис. 1. Схема разложения белого света в спектр



минала радугу и имела все её цвета – от красного до фиолетового. Картина

Если же за этой призмой помещали такую же вторую (чтобы они вместе составляли как бы одну толстую стеклянную пластину с параллельными поверхностями), то вместо радуги получали бесцветное пятно. Этот опыт убеждал в том, что *белый цвет* – смесь *различных цветов*. Но чем один цвет отличается от другого? В то время объяснить этого не могли: тогда не были известны свойства света.

Ясное представление о физической природе различия цветов можно



получить, если принять волновую теорию света. Согласно ей свет разных цветов соответствует электромагнитным волнам разных длин – так же, как, например, звуки разных высот соответствуют звуковым волнам различных длин. В этом можно убедиться, если измерить длину волны света для каждого цвета. Как это сделать?

Наиболее простой способ основан на явлении *интерференции* (наложения) волн. Возьмём две чистые и гладкие стеклянные пластины и сложим их так, чтобы с одной стороны их края соприкасались, а с другой стороны разделялись тонким волоском или провололочкой. Между пластинами образуется воздушный клин. Если на такую систему направить пучок белого света, то она покроется рядом светлых полос различной окраски. Эти полосы называются *интерференционными*.

Появление окраски этих полос легко объяснить, если считать, что свет состоит из волн разной длины. Действительно, когда пучок света падает на внутреннюю поверхность  $AC$  пластины (рис. 2), часть его отражается, а часть проходит дальше и падает на поверхность  $AB$  второй пластины, где опять частично отражается<sup>1</sup>.

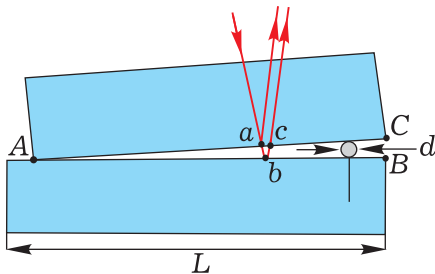


Рис. 2. Ход лучей в воздушном клине

Получаются два отражённых луча: один от поверхности  $AC$ , другой –

от  $AB$ . Свет, отражённый от второй поверхности, пройдёт путь больший, чем свет, отражённый от первой, на длину  $abc$ . Из-за разности хода лучи будут иметь разные фазы.

Если разность хода равна нечётному числу полуволн (включая и потерю полуволны в точке  $b$  при отражении от оптически более плотной среды), то оба луча окажутся в противофазе (разность фаз равна нечётному числу, умноженному на  $\pi$ ). В этом случае гребень одной волны наложится на впадину другой, и волны погасят друг друга.

Если разность хода равна чётному числу полуволн, т.е. целому числу волн, то разность фаз будет кратна  $2\pi$  и гребни волн совпадут. Складываясь, они дадут усиление света. Таким образом, на поверхности клина образуются чередующиеся цветные полосы, а в каждой из них – цвета от красного до фиолетового.

Если угол клина мал, то цветные полосы плавно переходят одна в другую. Если этот угол довольно большой, то они наблюдаются только в начале клина.

Когда в одном месте клина мы видим красную полосу  $a$ , то следующая красная полоска  $b$  будет в том месте, где разность хода лучей отличается от её значения в предыдущей полосе на целую длину волны. Очевидно, в этих местах толщины клина отличаются друг от друга на половину длины волны красного цвета. Эту разность в толщине можно определить (а значит, узнать и  $\lambda$ ), если известны диаметр  $d$  волоска и расстояние  $L$  от него до общего края пластин, а также расстояние  $l$  (рис. 3) между двумя соседними  $a$  и  $b$  полосками одинакового цвета.

<sup>1</sup> Более детальный анализ показывает, что лучи, отражённые от наружных поверхностей пластин, практически не участвуют в создании интерференционной картины.

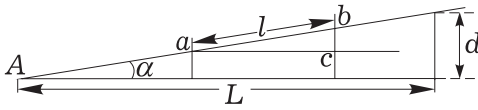


Рис. 3. К определению длины волны

Учитывая, что при малом угле воздушного клина  $\operatorname{tg} \alpha \approx \sin \alpha$ , можно составить следующее отношение:

$$\frac{d}{L} \approx \frac{bc}{ab} = \frac{bc}{l}.$$

Так как  $bc = \frac{\lambda}{2}$ , получим  $\frac{d}{L} = \frac{\lambda}{2l}$ , от-

куда  $\lambda = \frac{2dl}{L}$ .

В одном из экспериментов (при  $d = 0,01$  мм и  $L = 120$  мм) расстояние между соседними красными полосками оказалось равным 4,0 мм. Следовательно, длина волны света

$$\lambda = 2 \cdot 4,0 \cdot \frac{0,01}{120} = 0,00066 \text{ мм} = 0,66 \text{ мкм}.$$

Аналогичные измерения для полосок зелёного цвета дают длину волны, равную

$$\lambda = 0,00053 \text{ мм} = 0,53 \text{ мкм}.$$

Итак, различным цветам соответствуют разные длины волн. Они очень малы: в одном миллиметре укладывается около 2500 длин волн синего цвета, 2000 – зелёного, 1500 – красного. Но вообще-то каждому из цветов отвечает не одно значение длины волны, а некоторый их промежуток. Для каждого из семи цветов спектра эти промежутки таковы:

красный	0,76 мкм – 0,63 мкм
оранжевый	0,63 мкм – 0,60 мкм
жёлтый	0,60 мкм – 0,57 мкм
зелёный	0,57 мкм – 0,50 мкм

### Почему меняется цвет мыльной плёнки

Всю гамму цветов спектра можно увидеть при выдувании мыльного пузыря. По мере увеличения диамет-

голубой	0,50 мкм – 0,45 мкм
синий	0,45 мкм – 0,43 мкм
фиолетовый	0,43 мкм – 0,40 мкм

Если для наблюдения интерференционных полос использовать свет с малым диапазоном длин волн (мономатический свет, например красный, т.е. белый, предварительно пропущенный через красное



стекло – красный фильтр), то увидим чередование светлых и тёмных полос одного цвета – того, который имеет фильтр, применённый для получения мономатического света. Работать с такими полосами удобнее, и точность измерений повышается.

Следует заметить, что тёмные полосы слегка «подсвечены», так как интерферирующие волны имеют разные амплитуды из-за разного числа отражений от поверхностей клина и, следовательно, неодинаковых потерь энергии. Поэтому при сложении волн их суммарная интенсивность не равна нулю, даже если они приходят в противофазе.

ра надуваемой сферы и при освещении её белым светом различные места плёнки пузыря окрашиваются

сначала в красный цвет, а затем – в оранжевый, жёлтый и т. д. вплоть до фиолетового.

Для объяснения плавного чередования цветов и зависимости окраски плёнки от угла наблюдения рассмотрим подробнее интерференцию света. Что это за явление?

**Интерференция света** – это явление, наблюдаемое при сложении когерентных световых колебаний, в результате чего происходит перераспределение световой энергии в пространстве. В случае интерференции на клине перераспределение энергии проявляется в образовании светлых и тёмных окрашенных полос на его поверхности, при интерференции на мыльной плёнке – в смене окраски частей её поверхности.

**Когерентными** называют колебания, разность фаз между которыми с течением времени не изменяется, что обеспечивает стационарность интерференционной картины. Существует несколько способов получения когерентных световых колебаний (когерентных лучей). В описанных далее опытах когерентность колебаний достигается путём расщепления и последующего сведения на экране или сетчатке глаза лучей, исходящих из одного и того же источника света.

Выясним, как реализуется когерентность в случае наблюдения интерференции на тонкой плёнке мыльного пузыря, освещаемого светом с длиной волны  $\lambda$ .

Выделим из пучка света, падающего на плёнку (считаем её поверхности параллельными) отдельный луч  $a$ , пришедший в точку  $A$  под углом падения  $i_1$  (рис. 4). Этот луч частично отразится в виде луча  $a'$ , частично преломится и попадёт на вторую поверхность плёнки в точке  $B$ . Здесь он тоже частично отразится и

выйдет из плёнки в точке  $C$ , где возникает преломленный луч  $b$ , параллельный  $a'$ .

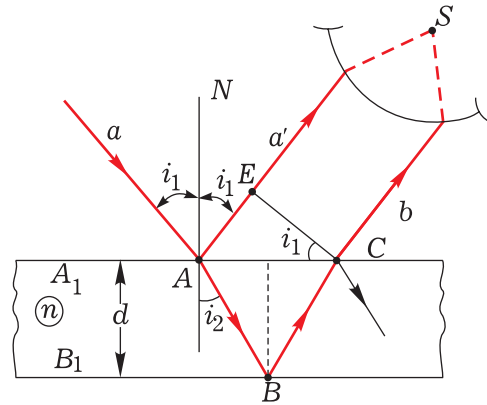


Рис. 4. Ход лучей в плёнке

Опустим из точки  $C$  перпендикуляр  $CE$  на направление луча  $a'$ . Тогда, считая коэффициент преломления плёнки (вода) равным  $n=1,33$ , а коэффициент преломления среды (воздух) равным единице, получим оптическую разность хода  $\Delta$  между лучами  $a'$  и  $b$ :

$$\Delta = (AB + BC)n - \left( AE + \frac{\lambda}{2} \right), \quad (1)$$

где  $(AB + BC)$  – геометрическая длина пути (хода) луча  $b$ ,  $(AB + BC)n$  – его оптическая длина пути (хода),  $AE$  – геометрическая (равная оптической) длина хода луча  $a'$ ,  $\frac{\lambda}{2}$  – добавочная разность хода, возникающая при отражении света на границе воздух-плёнка (потеря  $\frac{\lambda}{2}$  при отражении от оптически более плотной среды).

Выразив длины отрезков  $AB$ ,  $BC$  и  $AE$  через толщину плёнки  $d$

$$(AB = BC = \frac{d}{\cos i_2},$$

$$AE = AC \cdot \sin i_1 = 2d \operatorname{tg} i_2 \cdot \sin i_1)$$

и учтя, что  $n = \frac{\sin i_1}{\sin i_2}$  и что для любого

угла  $\sin^2 x = 1 - \cos^2 x$ , рассчитаем оптическую разность хода по формуле (1):

$$\Delta = \frac{2d}{\cos i_2} \cdot n - 2d \operatorname{tg} i_2 \cdot \sin i_1 - \frac{\lambda}{2} =$$

$$= \frac{2dn}{\cos i_2} - 2d \frac{\sin i_2 \cdot \sin i_1}{\cos i_2} - \frac{\lambda}{2}.$$

Поскольку  $\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n$ , или  $\sin i_1 = n \sin i_2$ ,

$$\Delta = \frac{2dn}{\cos i_2} - \frac{2d \sin i_2 \cdot n \sin i_2}{\cos i_2} - \frac{\lambda}{2} =$$

$$= \frac{2dn}{\cos i_2} \cdot (1 - \sin^2 i_2) - \frac{\lambda}{2} =$$

$$= 2dn \cos i_2 - \frac{\lambda}{2} = 2dn \sqrt{1 - \sin^2 i_2} - \frac{\lambda}{2} =$$

$$= 2d \sqrt{n^2 - n^2 \sin^2 i_2} - \frac{\lambda}{2};$$

$$\Delta = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 i_1} - \frac{\lambda}{2}.$$

Так как глаз (как и линза, проектирующая изображение на экран) не вносит дополнительной оптической разности хода, то  $\Delta$  представляет ту разность хода, с которой когерентные лучи сходятся в точке  $S$  на сетчатке глаза.

Если  $\Delta = m\lambda$ , где  $m = 0, 1, 2, \dots$ , то в точке  $S$  получится максимум интенсивности света, если  $\Delta = (2m + 1)\frac{\lambda}{2}$ , то – минимум. Таким образом, в результате интерференции лучей, отражённых от поверхностей  $AA_1$  и  $BB_1$ , и сведения их на сетчатке глаза получится более или менее яркий цвет плёнки в зависимости от разности хода  $\Delta$ .

Заметим, что с увеличением угла наблюдения  $i_1$  значение  $\Delta$  уменьшается (конечно, при  $d = \text{const}$ ).

Существует минимальная толщина плёнки  $d$ , при которой ещё возможно появление интерференционного усиления света, когда длина волны равна  $\lambda$  и угол падения  $i_1$ . Оценим эту толщину, если  $\lambda = 0,0007$  мм (красный цвет) и угол наблюдения  $i_1$  близок к  $0^\circ$ . В этом случае формула, определяющая  $\Delta$ , примет вид:

$$\Delta = 2dn - \frac{\lambda}{2} = \lambda, \text{ откуда}$$

$$d = \frac{\frac{3}{2}\lambda}{2n} = \frac{1,5 \cdot 0,0007 \text{ мм}}{2 \cdot 1,33} \approx 0,0004 \text{ мм},$$

т.е. толщина плёнки соизмерима с длиной волны падающего на неё света.

При этой толщине плёнки выберем теперь угол наблюдения равным  $i_1 = 45^\circ$ . Найдём длину волны  $\lambda$ , при которой происходит интерференционное усиление света. В этом случае

$$\Delta = 2 \cdot 0,0004 \cdot \sqrt{1,33^2 - \sin^2 45^\circ} - \frac{\lambda}{2} = \lambda,$$

откуда  $\lambda = 0,0006$  мм (жёлто-оранжевый свет).

Таким образом, при увеличении угла наблюдения длина волны  $\lambda$  интерференционного усиления света сместилась в сторону коротких волн – с красного на жёлто-оранжевый.

Теперь рассмотрим случай, когда свет, падающий на плёнку, не монохроматический, а содержит определённый набор длин волн  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ , удовлетворяющих условию:

$$\Delta = m\lambda_1 = (m + 1)\lambda_2 = (m + 2)\lambda_3 = \dots,$$

где  $m$  – целое число (1, 2, 3...), называемое порядком интерференции (разность хода интерферирующих лучей, выраженная числом длин волн света). Понятно, что при таком условии произойдёт взаимное наложение максимумов от различных длин волн. В этом случае, чем больше толщина



плёнки, тем больше значение целого числа  $m$  и тем меньше будет разность между длинами волн  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ , для которых максимумы перекрываются. В результате при освещении плёнки белым светом интерференционная картина смажется и от плёнки отразится практически белый свет.

Перейдём, наконец, непосредственно к эксперименту с мыльным пузырём. Для его выдувания можно использовать тонкую трубочку, например соломинку для коктейля или сока, и раствор мыла (лучше туалетного) в воде. Смочив кончик соломинки в приготовленном растворе, медленно выдуваем пузырь. Расположив его так, чтобы свет из окна падал на его боковую поверхность, можно наблюдать отражённый от плёнки свет под различными углами, не прерывая процесс выдувания пузыря.



Пока толщина плёнки относительно большая (порядок интерференции  $m = \frac{\Delta}{\lambda}$  велик), а степень мо-

нохроматизации падающего света, определяемая величиной  $\frac{\lambda}{\delta\lambda}$  ( $\lambda$  – средняя длина волн, соответствующих белому цвету,  $\delta\lambda$  – разность длин волн крайних цветов спектра), равна приблизительно 2, интерференция не наблюдается, так как  $\frac{\lambda}{\delta\lambda} \ll m$ , и происходит наложение максимумов от волн разных длин.

Когда толщина плёнки станет такой, что порядок интерференции

$m = \frac{\Delta}{\lambda}$  будет равен или меньше степени монохроматичности света  $\frac{\lambda}{\delta\lambda} \approx 2$ ,

плёнка начнёт приобретать интерференционную окраску (при  $d$  порядка одного микрометра). Сначала красную – под малым углом и фиолетовую под бóльшим углом наблюдения, а также при уменьшении толщины плёнки.

Наконец, наступит момент, когда плёнка покажется тёмной или тёмно-фиолетовой. Это значит, что она стала такой тонкой, что  $\Delta \approx \frac{1}{2}\lambda$  и наступило почти полное гашение лучей. Но обычно мыльный пузырь лопается раньше, чем его стенки достигнут такой малой толщины.

Следует отметить, что получить «прочную» плёнку мыльного пузыря не так просто, главное – приготовить подходящий мыльный раствор. Если он подготовлен оптимально, то интерференционную картину можно успешно наблюдать на клине, образованном мыльной плёнкой на вертикально расположенном проволочном кольце. Понятно, что толщина этой плёнки постепенно увеличивается к низу кольца.

Если такую плёнку осветить бе-



лым светом, то верхняя её часть может оказаться при наблюдении в отражённом свете почти чёрной. Это

означает, что её толщина здесь уменьшилась до величины, близкой к  $\frac{\lambda}{2}$ , и происходит взаимное гашение волн, отражённых от обеих поверхностей плёнки.

Ниже плёнка становится толще и покрывается радужными полосами (каждая от фиолетового до красного цвета) – они обусловлены интерференционными максимумами для соответствующих световых волн. Самая нижняя часть плёнки существенно толще, и интерференционная картина здесь смазывается – от плёнки отражается практически белый свет.

Таким образом, наблюдение клиновидной мыльной плёнки в отражённом свете качественно иллюстрирует условия появления стационарной интерференционной картины в зависимости от толщины плёнки.

## «Юморески», которые рассказывал И.К. Кикоин

- ◆ Суворов терпеть не мог «немогузнаек». Однажды он спросил у солдата, стоявшего на часах: «Сколько звёзд на небе?». Тот знал про «не могу знать» и ответил: «5834!». Суворов усомнился. «Проверьте, Ваше сиятельство!», – предложил находчивый солдат.
- ◆ В райотделе народного образования при проверке сочинений претендентов на золотую медаль обнаружили, что один из них написал «гитлер» с маленькой буквы. Вызвали автора, а он сказал: «Можете ставить два, но по-другому писать не буду!»
- ◆ Физика Хвольсона, автора самого известного в начале века учебника по физике, пригласили на собрание Академии наук в Ленинграде и избрали почётным академиком. В ответном слове тот сказал, что прекрасно понимает разницу между академиком и почётным академиком – она такая же, как между «государь» и «милостивый государь».

Из собрания В.И. Ожогина