ФОТОМЕТРИЯ

Большую часть информации человек получает с помощью зрения. Именно поэтому изучению вопросов фотометрии уделяется особое внимание. Важную роль в науке, технике и практической деятельности играют **фотометрические характеристики**, описывающие видимое излучение, т. е. ту часть спектра электромагнитных волн, которая воспринимается нашим глазом

Фотометрия – раздел оптики, занимающийся измерением световых потоков и величин, связанных с этими потоками.

При изучении физики мы уже использовали ряд идеализированных моделей (материальная точка, идеальный газ и др.), которые помогали нам при рассмотрении физических явлений и законов. В фотометрии удобно использовать еще одну идеализацию — точечный источник света.

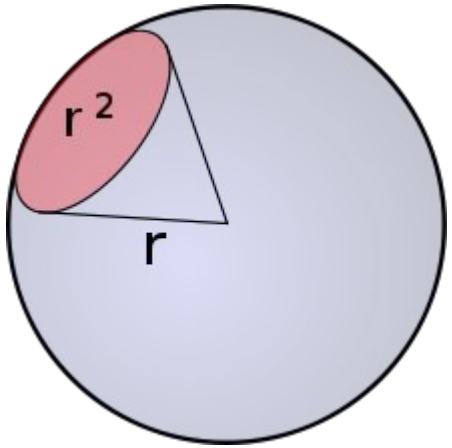
Точечный источник света – источник, размерами которого можно пренебречь по сравнению с расстоянием от места наблюдения до источника. Считается, что такой источник равномерно излучает свет во все стороны. Типичный пример точечных источников света — звезды.

Телесный угол характеризует область пространства, ограниченную конической поверхностью. Для измерения телесного угла следует найти отношение площади поверхности шарового сегмента S_o к квадрату радиуса сферы с центром в вершине конуса:

$$\Omega = \frac{S_0}{R^2}$$

Единица телесного угла — стерадиан (ср). 1 ср равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы. Зная площадь поверхности сферы, можно определить полный телесный угол вокруг точки:

$$\Omega = \frac{4\pi R^2}{R^2} = 4\pi \ ср$$



Оптическое излучение характеризуется рядом энергетических и фотометрических характеристик. Рассмотрим некоторые из них.

1. Для характеристики точечных источников света используется ***сила света I,*** которая определяется как поток излучения источника, приходящийся на единицу телесного угла dΩ.

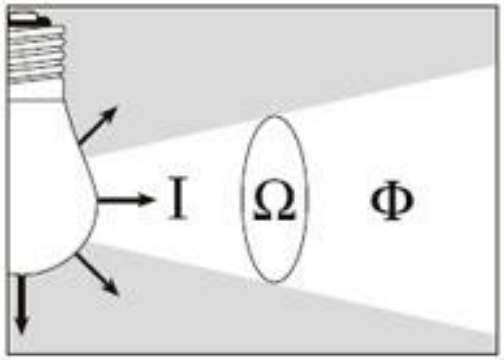
$$I = d\Phi/d\Omega$$

Для изотропного источника, у которого сила света не зависит от направления $\Omega = 4\pi$, тогда

$$I = \frac{d\Phi}{4\pi}$$

Единица силы света в системе СИ –***кандела*** (свеча) **Кд**

1Кд –сила света, испускаемого с площади 1/600000м^2 сечения полного излучателя (абсолютно черного тела) в перпендикулярном этому излучателю направлении при температуре излучателя, равной температуре затвердевания Pt, при давлении 101325 Па.



Сила света I характеризует мощность светового потока лампы Φ в телесном углу Ω.

2 ***Световой поток*** – физическая величина, характеризующая «количество» световой энергии в соответствующем потоке излучения.

Это мощность видимого излучения, оцениваемого по световому ощущению, которое оно производит на средний человеческий глаз.

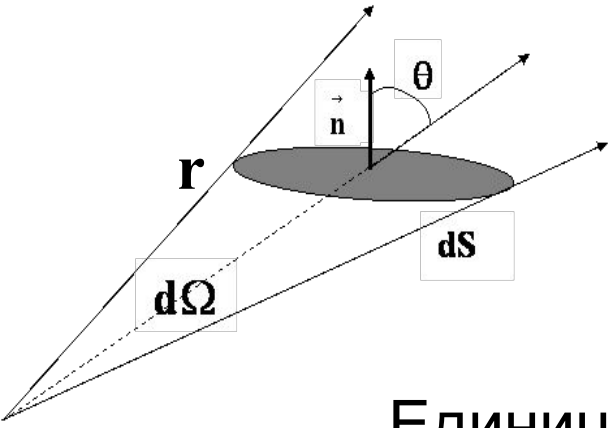
Его единица измерения –***люмен*** (лм). Он равен световому потоку, излучаемому изотропным источником с силой света 1 Кд в пределах телесного угла 1 стерадиан.

(1лм = 1Кд·1ср)

Световому потоку 1лм (при λ=555 нм) соответствует поток энергии 0,0016 Вт–***механический эквивалент света***.

3 *Освещенность* – световой поток, падающий на элемент поверхности , характеризуется величиной :

$$E = \frac{d\Phi_{пад}}{dS}$$



Освещенность E связывает световой поток с площадью той поверхности, на которую этот поток падает.

Единица освещенности ***1 люкс***
(1лк) = 1лм/1м^2.

Освещенность можно выразить через силу света:

$$d\Phi_{пад} = I \cdot d\Omega \leftarrow d\Omega = \frac{dS \cdot \cos\Theta}{r^2}$$

$$E = \frac{I \cdot \cos\Theta}{r^2}$$

Освещенность **E**.

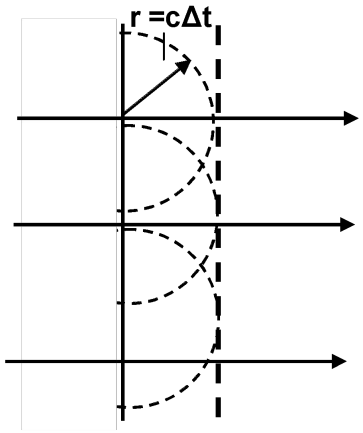
Распространение света

Распространение света

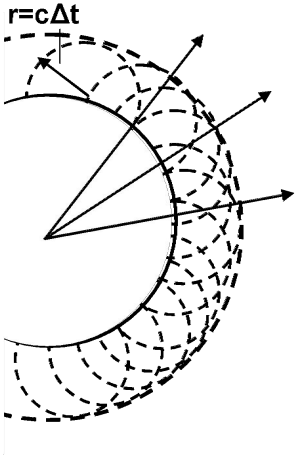
фронт волны - поверхность, отделяющая часть пространства уже вовлеченного в волновой процесс от области, в которой колебания еще не начались

волновые поверхности – геометрическое место точек, в которых вектор $\vec{E}$ имеет одинаковую фазу

Волновой фронт – это тоже волновая поверхность, **но** волновой фронт один, а волновых поверхностей может быть бесконечное множество.



плоский фронт



сферический фронт

Световыми лучами называют линии, вдоль которых распространяется световая энергия. Вектор Умова-Пойнтинга - касательная к лучу.

Если известны форма и положение фронта световой волны в момент времени t, то фронт волны в последующие моменты времени t +Δt можно найти по ***принципу Гюйгенса***:

Среда называется оптически однородной и изотропной, если скорость распространения света

одинакова во всех местах (однородность) и по всем направлениям (изотропность).

В такой среде по истечении времени t волна от точечного источника достигает поверхности, имеющей вид сферы радиуса **r=ct** (рис.a). Если среда анизотропная, то форма фронта волны, а также волновой поверхности будет эллипсоидом вращения (рис.b).

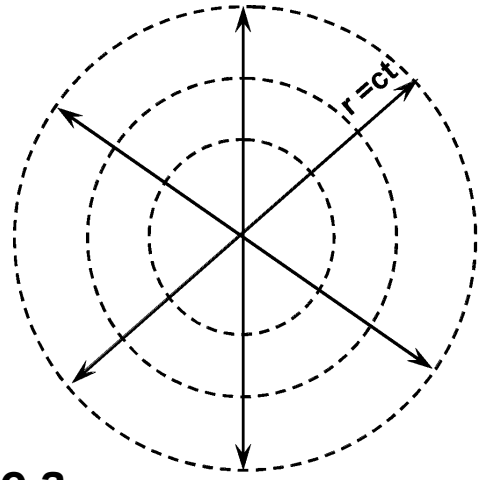


рис a.

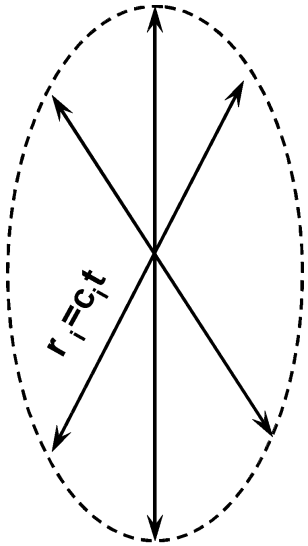
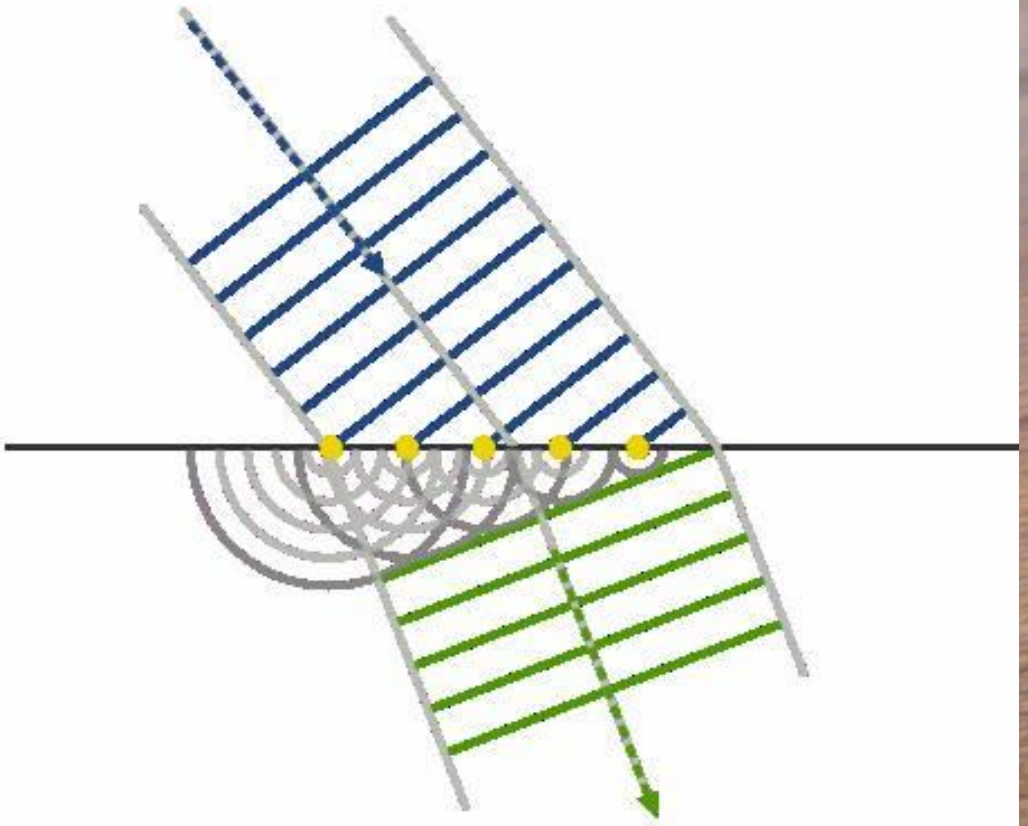


рис b

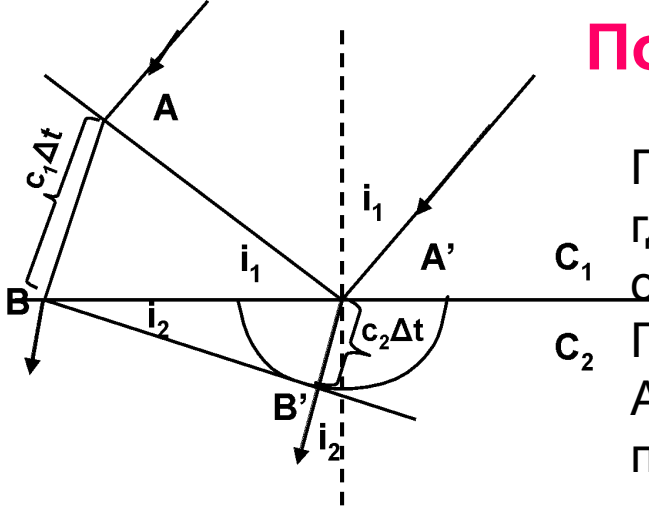
Принцип Гюйгенса

- Волновая теория света основана на **принципе Гюйгенса**: *каждая точка, до которой доходит волна, служит центром вторичных волн, а огибающая этих волн даёт положение волнового фронта в последующий момент времени*
- На основе волновой теории удалось правильно объяснить законы отражения и преломления света

Объяснение преломления света с помощью принципа Гюйгенса



Показатель преломления



Пусть плоская волна падает на границу двух сред, где скорости света $C_1 > C_2$. Для нахождения законов отражения и преломления применим принцип Гюйгенса: построим огибающую элементарных волн. $AB = C_1 \cdot \Delta t$; $A'B' = C_2 \cdot \Delta t$. В изотропной среде лучи перпендикулярны к волновым поверхностям.

Отсюда $\angle AA'B = \angle i_1$
Аналогично $\angle A'BB' = \angle i_2$
} как углы со взаимно перпендикулярными сторонами

$$\sin i_1 = \frac{c_1 \Delta t}{BA'}$$

$$\sin i_2 = \frac{c_2 \Delta t}{BA'}$$

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{c_1}{c_2}$$

Сопоставление с известным из геометрической оптики законом преломления:

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n_{12}$$

где n_{12} –относительный показатель преломления второго вещества по отношению к первому, дает

$$\boxed{\frac{c_1}{c_2} = n_{12}}$$

Если в качестве среды 1 брать вакуум, то $\frac{c_0}{c_1} = n_1$ -абсолютный показатель преломления данной среды

$$n = \frac{\sqrt{\varepsilon\mu}}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} \sim \sqrt{\varepsilon\mu} \approx \sqrt{\varepsilon}$$

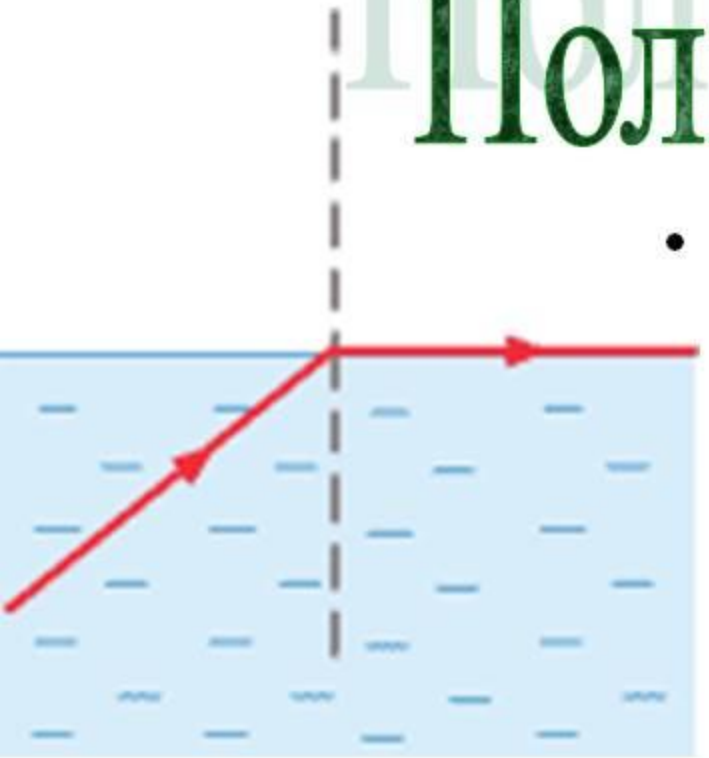
По абсолютным показателям преломления двух сред

$$\frac{c_0}{c_1} = n_1 \qquad \frac{c_0}{c_2} = n_2$$

можно найти их относительный показатель преломления:

$$n_{12} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

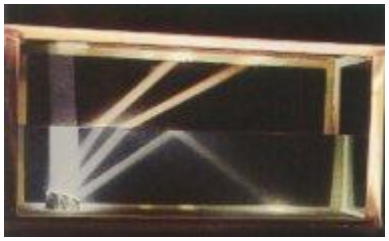
Полное отражение



- Интересное явление можно наблюдать, если постепенно **увеличивать угол падения при переходе света в оптически менее плотную среду.** Угол преломления в этом случае, как известно, больше угла падения, и, с увеличением угла падения, угол преломления также будет увеличиваться. **При некотором значении угла падения угол преломления станет равен 90^0.**

Явление полного внутреннего отражения.

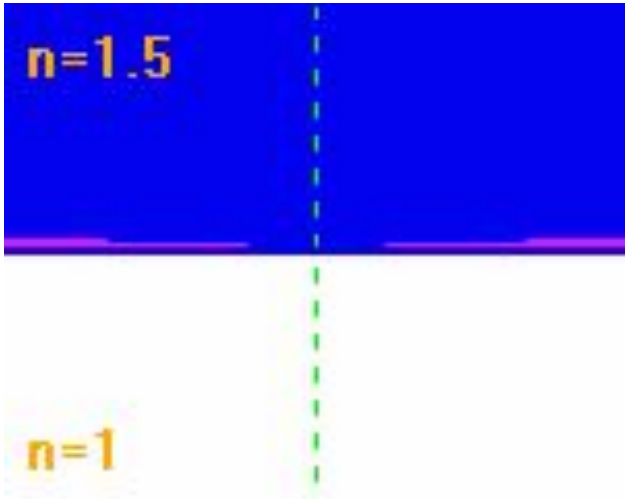
При переходе света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду ($n_1 > n_2$) угол преломления γ будет больше угла падения α.

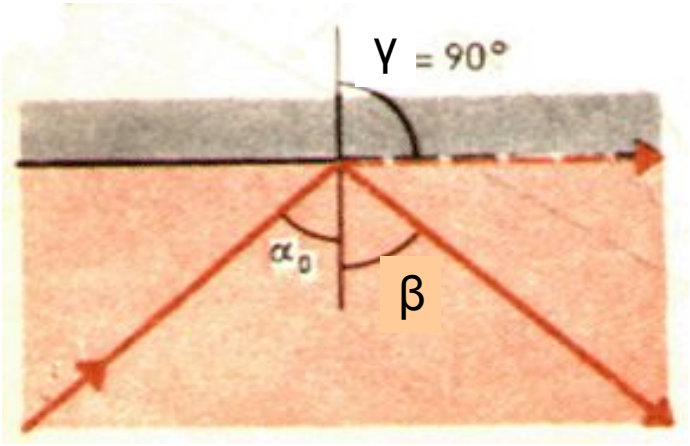


С увеличением угла α, при некотором $\alpha = \alpha_0$ можно получить $\gamma = \pi/2$, т.е. преломленный луч будет скользить по поверхности раздела сред. Угол **<u>падения</u>**, удовлетворяющий условию $\sin\alpha_0 = n_2/n_1$, при котором $\gamma = \pi/2$, а $\sin\gamma = 1$, называется ***предельным углом падения***.

При $\alpha > \alpha_0$ луч не преломляется, а полностью отражается обратно в первую среду. Это называется ***полным внутренним отражением***.

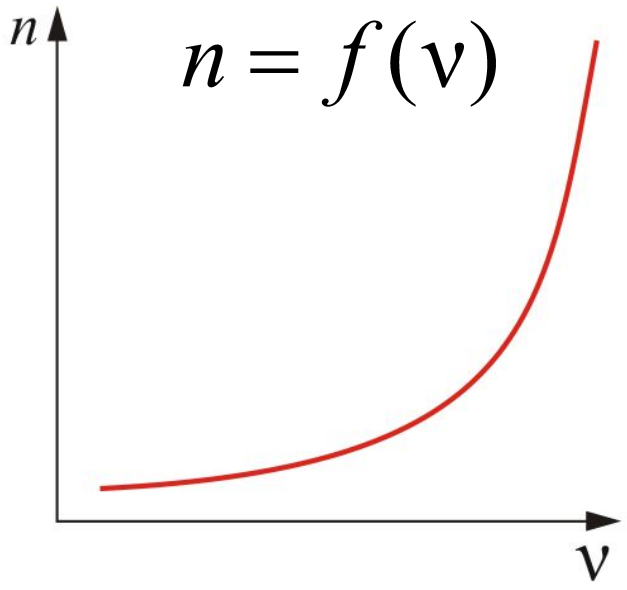
При $n_1 < n_2$, то $\gamma < \alpha$ и даже при $\alpha = \pi/2$, $\gamma < \pi/2$)



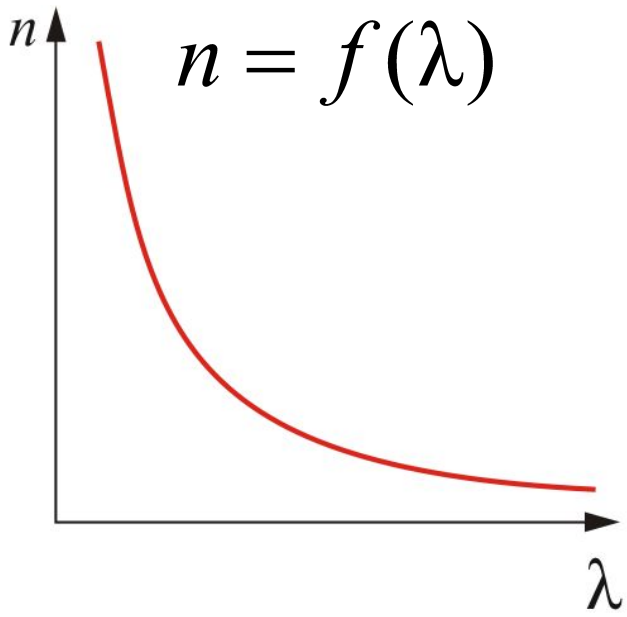


Дисперсия света

Дисперсией света называется зависимость показателя преломления n вещества от частоты ν (длины волн λ) света или зависимость фазовой скорости υ световых волн от их частоты.



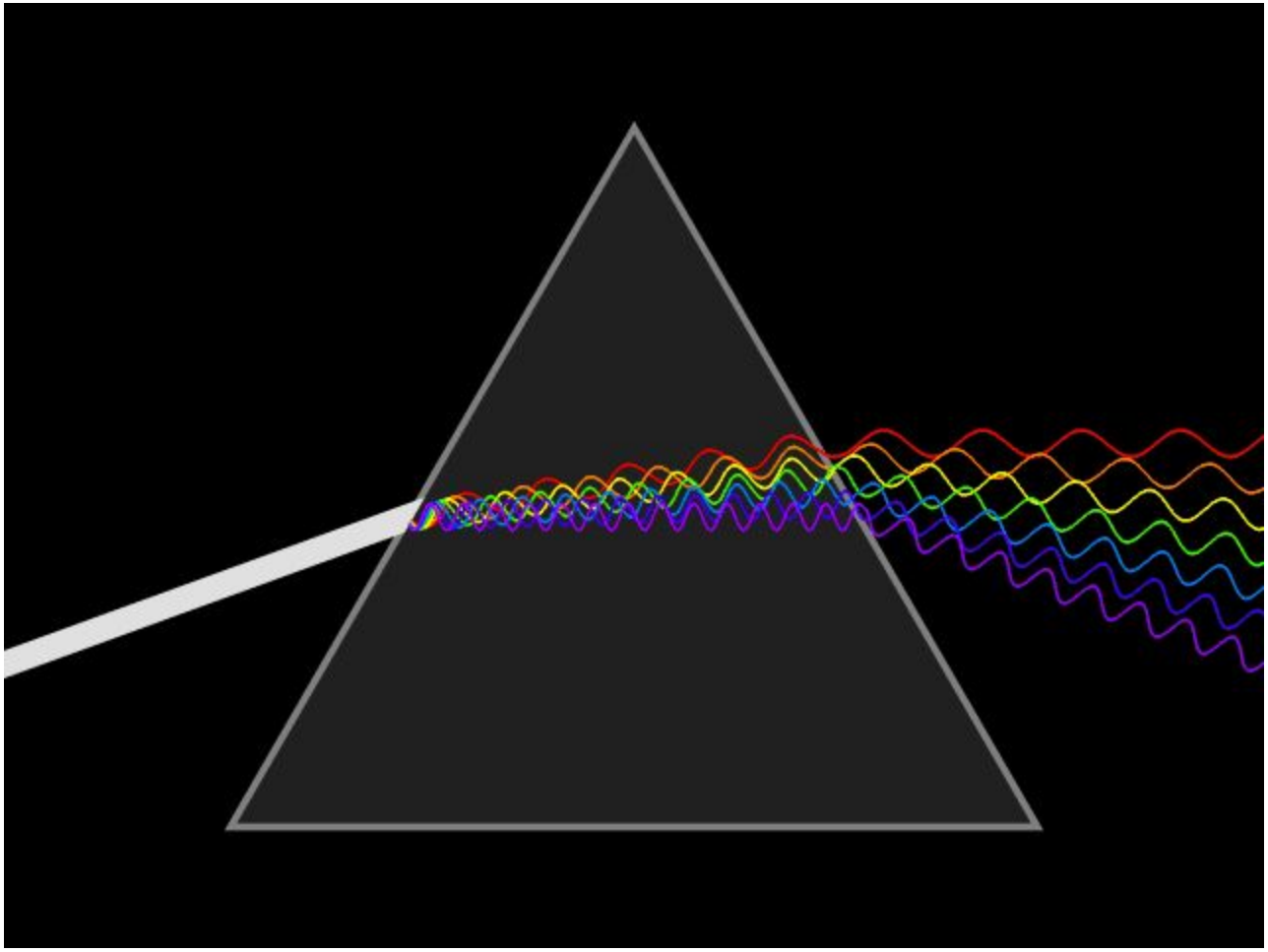
или



Радуга - явление, наблюдаемое обычно в поле повышенной влажности и возникающее из-за преломления солнечного света в капельках воды дождя или тумана, парящих в атмосфере. Капли по-разному отклоняют свет разных цветов (показатель преломления воды для более длинноволнового света меньше, чем для коротковолнового, поэтому красный свет меньше отклоняется при преломлении, в результате чего белый свет разлагается в спектр.

Благодаря дисперсии света, можно наблюдать цветную «игру света» на гранях бриллианта и других прозрачных гранёных предметах или материала

Дисперсия света на трехгранной призме (опыт Ньютона)



Величина $D = \frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}\lambda}$ или $D = \frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}\nu}$

называемая ***дисперсией вещества***, показывает, как быстро меняется показатель преломления с длиной волны.

***Поглощение света*.**

Пусть оптическое излучение, несущее энергию W проходит через тонкий слой среды толщиной dx и в этом слое теряет энергию dW. Полагая, что dW прямо пропорционально W и толщине слоя dx (такое предположение допустимо для бесконечно малых dx) и имея ввиду, что dW<0, что означает потерю энергии, получаем:

$$-dW = k \cdot W \cdot dx$$

где коэффициент k учитывает поглощательную способность среды.
Из этого соотношения получаем:

$$\frac{dW}{W} = -k \cdot dx \qquad \ln W = -k \cdot x + Const$$

т.к. при x=0 W=W_0, то const = ln W_0. Подставляя это значение постоянной интегрирования в формулу, получаем ***закон Бугера***:

$$W = W_0 e^{-kx}$$

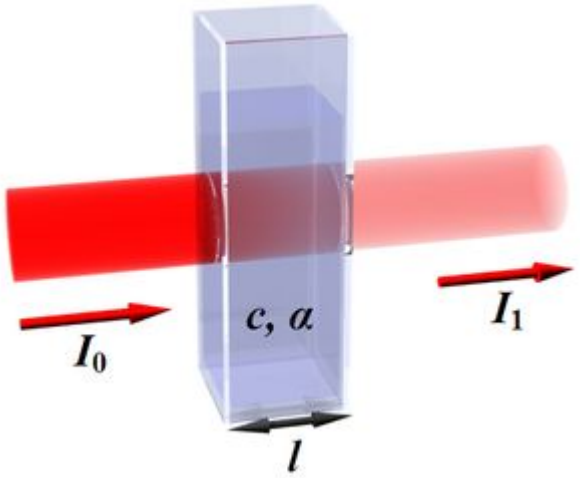
k –коэффициент поглощения, зависит от длины волны. *Физический смысл* **k** –это величина, обратная толщине слоя, в котором интенсивность убывает в ***e*** раз.

Закон Бугера — Ламберта — Бера — определят ослабление параллельного монохроматического пучка света при проходе через поглощающую среду .

Показатель поглощения характеризует свойства вещества и зависит от длины волны λ поглощаемого света. Эта зависимость называется спектром поглощения вещества.

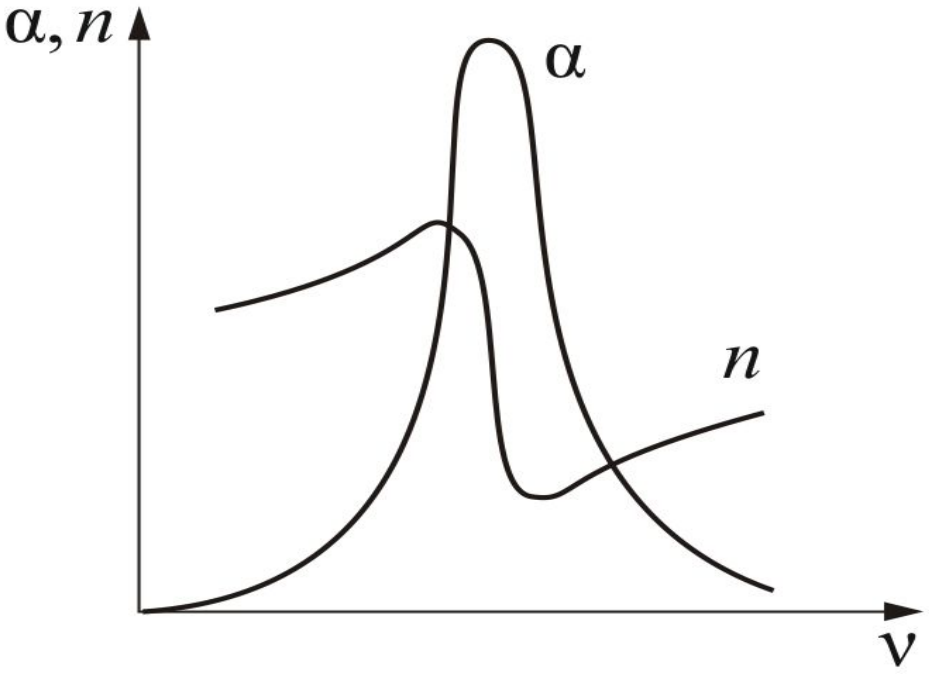
Коэффициент поглощения для растворов может быть рассчитан как:

$$k_\lambda = \chi_\lambda \cdot C$$



C — концентрация растворённого вещества, a — коэффициент, не зависящий от C и характеризующий взаимодействие молекулы поглощающего вещества со светом с длиной волны λ. Утверждение, что χ_λ не зависит от C, называется законом А. Бера, и его смысл состоит в том, что поглощающая способность молекулы не зависит от влияния окружающих молекул.

На рисунке представлена типичная зависимость коэффициента поглощения α от частоты света ν и зависимость показателя преломления *n* от ν в области полосы поглощения. Из рисунка следует, что ***внутри полосы поглощения наблюдается аномальная дисперсия*** (*n* убывает с увеличением ν).



Или по другому: внутри полосы поглощения наблюдается аномальная дисперсия (*n* убывает с уменьшением λ)

•Цвета могут появляться тремя способами

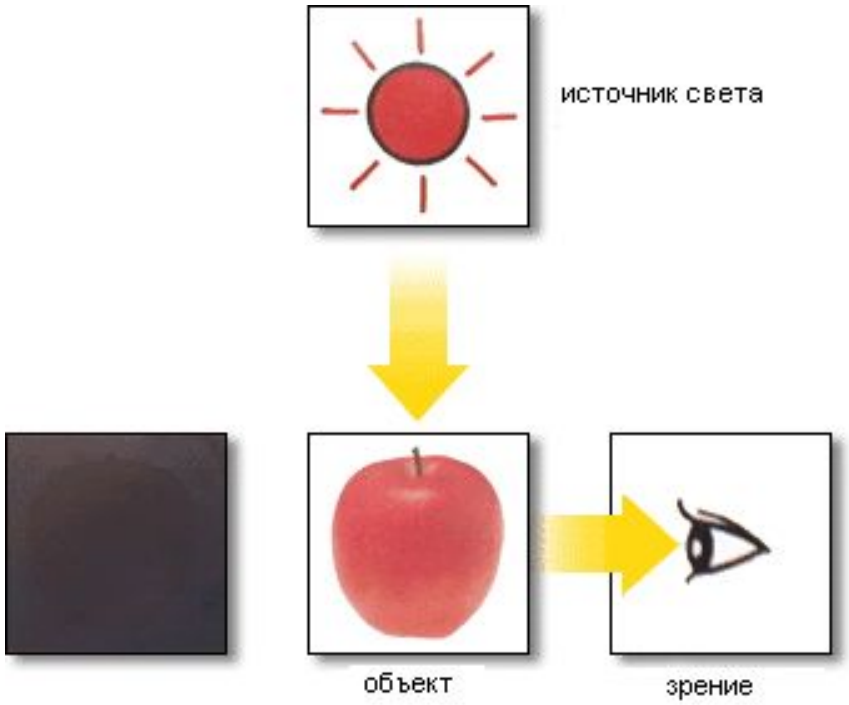
как цвет источника света,

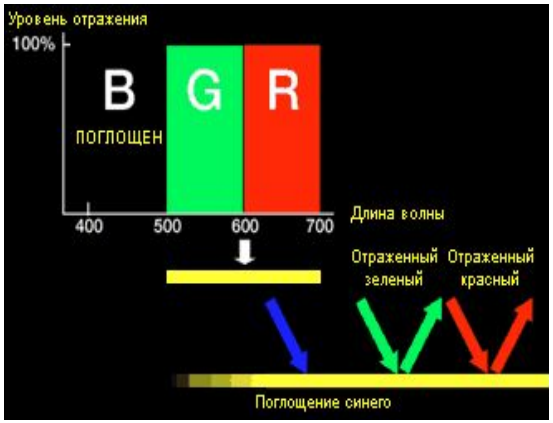
как цвет **отраженного света,**

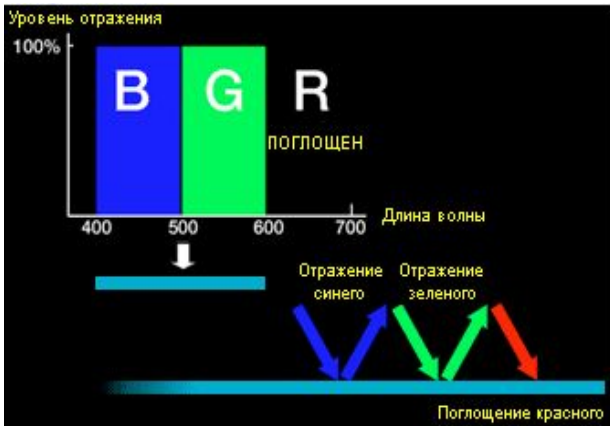
как **отфильтрованный цвет.**

ЦВЕТ ОТРАЖЕННОГО СВЕТА

(цвет непрозрачных тел)







ОТФИЛЬТРОВАННЫЙ ЦВЕТ

(цвет прозрачных тел)

Рассеяние света

При прохождении волны через вещество электрические заряды в атомах и молекулах при действии переменного вектора $\vec{E}$ совершают вынужденные колебания с той же частотой. При этом частицы среды сами становятся вторичными излучателями ЭМ волн, которые распространяются по различным направлениям. Т.о. часть энергии волны поглощается и вновь излучается, следовательно, рассеивается по всем направлениям. Особенно сильно это выражено на границах неоднородностей (пылинка, капелька, пузырьки).

Прозрачные среды почти не рассеивают света, т.к. вторичные волны являются когерентными и вследствие интерференции взаимно гасят друг друга по всем направлениям, кроме направления распространения. Однородность среды важна, т.к. для полного гашения необходима не только когерентность, но и равенство интенсивностей интерферирующих волн.

Эксперименты и расчеты показывают

1) интенсивность рассеянного света обратно пропорциональна λ^4 (или пропорциональна четвертой степени частоты) –***закон Релея***:

$$I = \frac{Const}{\lambda^4}$$

Рассеяние света по закону Релея имеет место при λ>>a, где a – параметр, характеризующий линейные размеры рассеивающих частиц.

2) интенсивность рассеянного света различна в различных направлениях и вычисляется по формуле:

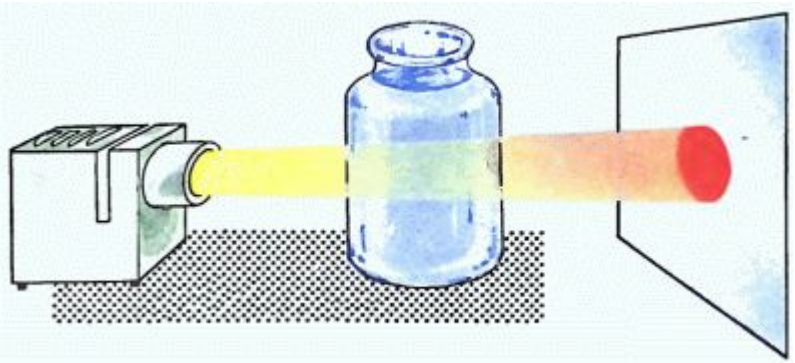
$$I_\alpha = \frac{1}{2} I_{\max} (1 + \cos^2 \alpha)$$

где α –угол от луча света.

Свет, рассеянный на частицах, размер которых намного меньше λ, частично поляризован. Потому что колебания электронов, вызванные рассеиваемым пучком, происходят в перпендикулярной к пучку плоскости.

3) Свет, рассеянный под углом $\alpha=\pi/2$ к направлению луча, ***плоскополяризован***. При $\alpha\neq\pi/2$ –свет будет **частично поляризован**.

Луч, проходя через мутный раствор, сбоку кажется голубоватым, а спереди – розоватым



В результате рассеяния света вбок интенсивность в направлении луча убывает быстрее, чем в случае, когда имеется только поглощение. Поэтому для мутного вещества в законе Бугера, наряду с коэффициентом поглощения k будет стоять добавочный коэффициент k', обусловленный рассеянием:

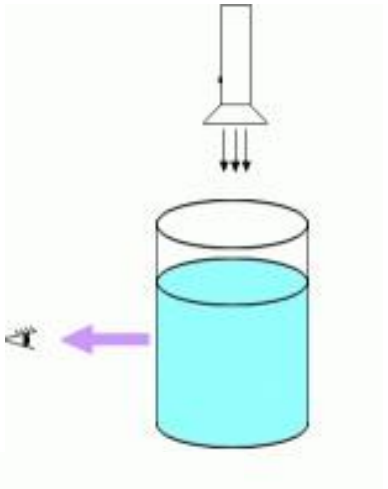
$$W = W_0 e^{-(k+k')x}$$

Постоянная k', называется ***коэффициентом экстинкции***

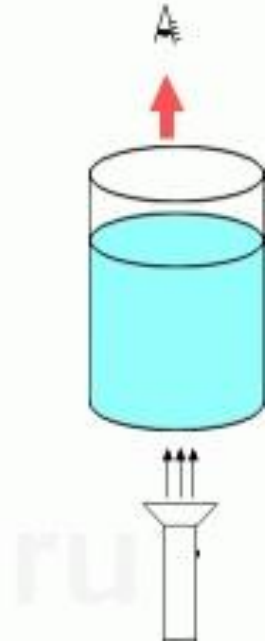
эксперимент

1.Наполнить стакан или банку на 2/3 водой, примерно 300-400 мл.
2. В воду добавить от 0,5 до одной ложки молока, смесь взболтать.
3. Взяв стакан и фонарик, перейти в тёмную комнату.

Держите фонарик над стаканом с водой и направьте луч света на поверхность воды, посмотрите на стакан со стороны. При этом вода будет иметь синеватый оттенок.



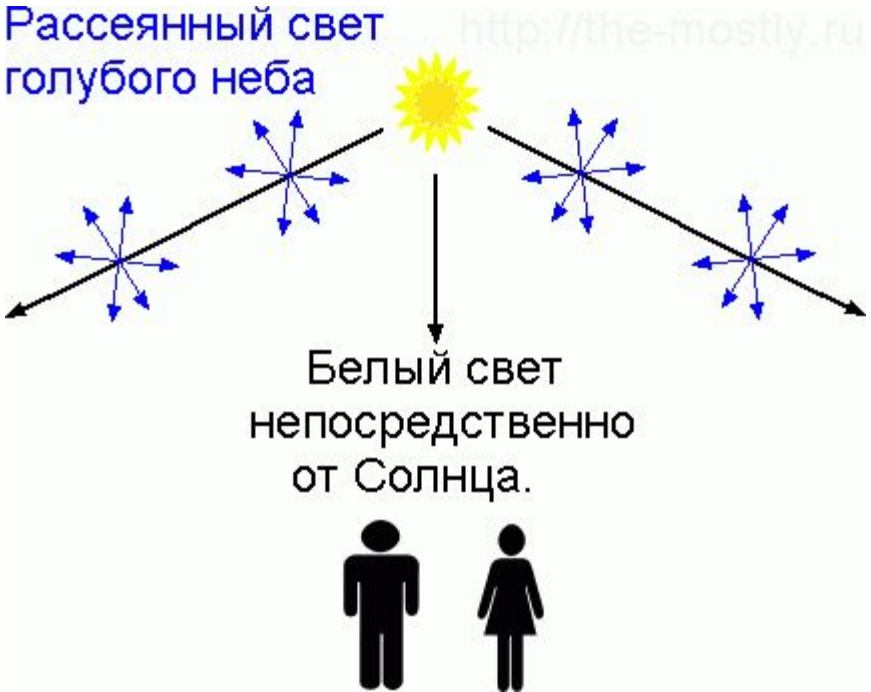
Поместите фонарик под стакан и направьте луч света вверх, при этом смотря на воду сверху. При этом у воды появится красноватый оттенок.



Что в этом эксперименте происходит: мелкие частицы молока, взвешенные в воде, рассеивают свет, идущий от фонарика точно так же, как частицы и молекулы в воздухе рассеивают солнечный свет. Когда стакан освещается сверху, то вода кажется голубоватой из-за того, что голубой цвет рассеивается во все стороны. Когда вы смотрите через воду непосредственно на свет, то свет фонаря кажется красным, так как часть синих лучей была удалена из-за рассеяния света.

Почему небо синее?

Небо имеет голубой цвет из-за рассеяния Рэлея. По мере продвижения света через атмосферу большая часть длинных волн оптического спектра проходит без изменений. Только незначительная часть красного, оранжевого и жёлтого цветов взаимодействует с воздухом.
Однако многие более короткие волны света поглощаются молекулами газов. После поглощения голубой цвет излучается во всех направлениях. Он рассеивается повсюду на небе. В каком бы направлении не посмотреть, часть из этого рассеянного синего света достигает наблюдателя. Так как синий свет виден повсюду над головой, то и небо выглядит голубым.



Воздух, заполняющий всё небо, является смесью мельчайших молекул газа и небольших твёрдых частиц, таких как пыль.

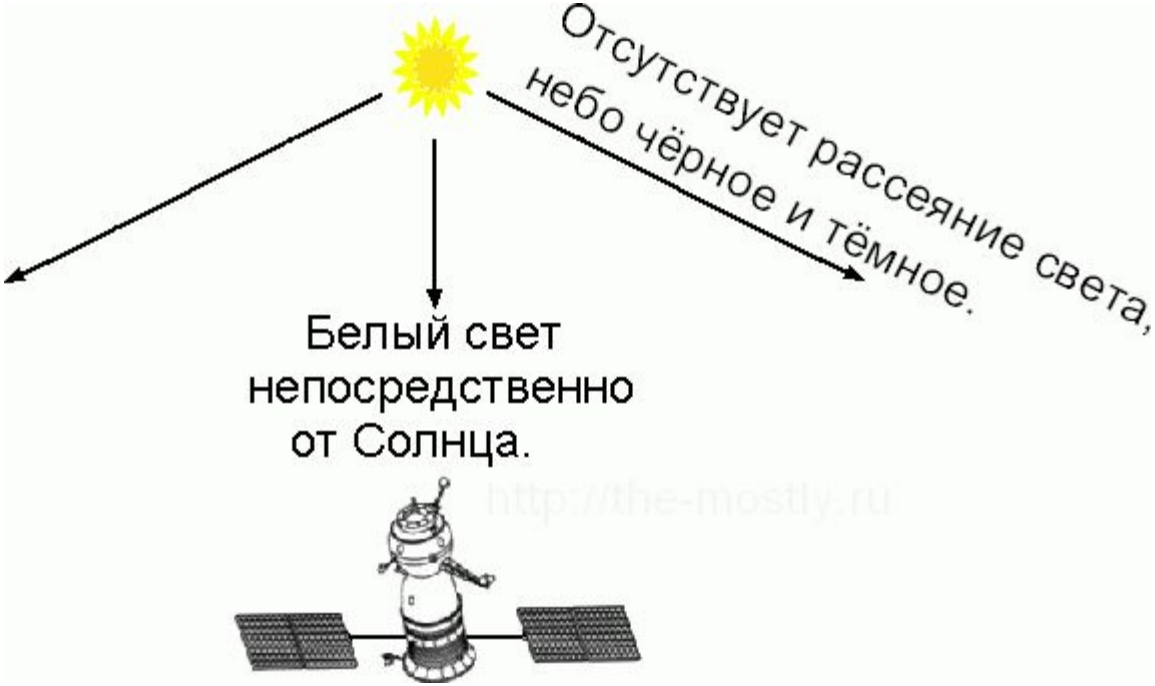
По мере того, как солнечный свет проходит сквозь воздух, он натыкается на молекулы и пыль. Когда свет сталкивается с молекулами газа, то может произойти отражение света в различных направлениях. Некоторые цвета, например, красный и оранжевый, напрямую достигают наблюдателя, непосредственно проходя через воздух. Но большая часть синего света переотражается от молекул воздуха во всех направлениях. Таким образом происходит рассеяние синего света по всему небу и оно кажется голубым. Когда мы смотрим вверх, то некоторая часть этого голубого свет достигает наших глаза ото всех концов неба. Так как повсюду над головой нам виден синий цвет, то небо выглядит голубым.

Если посмотреть в сторону горизонта, то небо будет иметь более бледный оттенок. Это является результатом того, что свет проходит большее расстояние в атмосфере до наблюдателя. Рассеянный свет снова рассеивается атмосферой, и меньше голубого цвета достигает глаз наблюдателя. Поэтому цвет неба у горизонта кажется бледнее или даже кажется совсем белым.

Чёрное небо и белое солнце

С Земли Солнце кажется жёлтым. Если бы мы находились в космосе или на Луне, то Солнце казалось бы нам белым. В космосе нет атмосферы, которая рассеивает солнечный свет. На Земле часть коротких волн солнечного света (голубой и фиолетовый цвета) поглощаются рассеянием. Оставшаяся часть спектра выглядят жёлтым цветом.

В космическом пространстве отсутствует воздух. Так как там нет препятствий, от которых свет мог бы отражаться, то свет распространяется напрямую. Лучи света не рассеиваются, и "небо" выглядит тёмным и чёрным.



Почему закат красный?

Когда Солнце клонится к закату, то солнечному свету приходится проходить большее расстояние в атмосфере, что бы достичь наблюдателя, соответственно больше солнечного света отражается и рассеивается атмосферой. Так как меньше прямого света достигает наблюдателя, то Солнце кажется менее ярким. Цвет Солнца так же кажется другим, он имеет диапазон цветов от оранжевого до красного. Это происходит из-за того, что рассеивается ещё больше коротковолновых цветов, голубого и зелёного. Остаются только длинноволновые составляющие оптического спектра, которые и достигают глаз наблюдателя.

Небо вокруг заходящего солнца может быть окрашено в разные цвета. Наиболее красивым небо бывает тогда, когда воздух содержит множество маленьких частиц пыли или воды. Эти частицы отражают свет во всех направлениях. В этом случае происходит рассеяние более коротких световых волн. Наблюдатель видит световые лучи более длинных волн, и поэтому небо кажется красным, розовым или оранжевым.