

# **Свет и цвет в природе**

Тут, если солнце блеснет во мгле непогоды лучами  
Прямо против дождя, из тучи кропящего капли,  
Радуги яркой цвета появляются в облаке черном.

Лукреций

# СВЕТ И ЦВЕТ В ПРИРОДЕ

# Развитие представлений о природе света

Что такое свет? Этот вопрос издавна волновал человечество. Древние греки выдвигали несколько гипотез о природе света. Согласно одной из них, свет представляет собой нечто такое, что истекает из глаз, подобно воде из шланга. Лучи света как бы «ощупывают» предметы, доставляя наблюдателю информацию об их форме и цвете. Пифагор высказывал идею, что тела становятся видимыми благодаря испускаемым ими частицам.

И.Ньютон в 1672 году предложил корпускулярную теорию, согласно которой свет представляет собой поток частиц.

Голландский ученый Х.Гюйгенс в 1678 году разработал волновую теорию, которая рассматривает свет как упругую волну, распространяющуюся в среде.

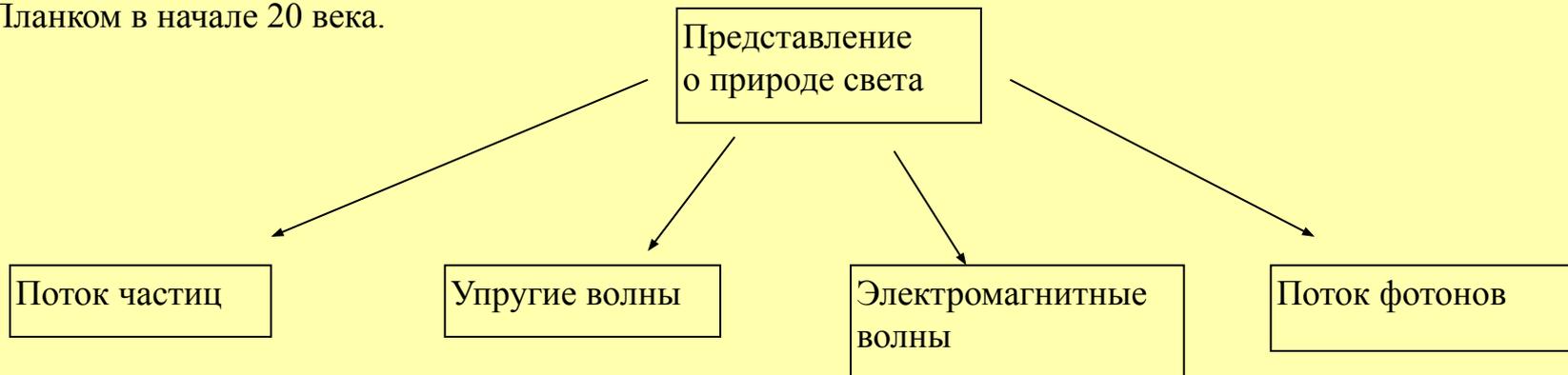
На протяжении ста лет корпускулярная теория имела гораздо больше приверженцев, чем волновая. Однако в начале 19 века французскому физiku О.Френелю удалось на основе волновых представлений объяснить все известные в то время оптические явления. В результате волновая теория получила общее признание, а корпускулярная теория была забыта.

В 1864 году Д.Максвелл создал электромагнитную теорию света, согласно которой свет есть электромагнитные волны с диапазоном длин от 0,4 до 0,75 мкм.

Согласно представлениям современной физики, свет обладает одновременно свойствами электромагнитных волн и свойствами частиц. Двойственность свойств света называется корпускулярно-волновым дуализмом.

Объясняет волновые и квантовые свойства света квантовая механика, основы которой были созданы М.

Планком в начале 20 века.



Откуда берется удивительный красочный свет, исходящий от дуг радуги? Все радуги — это солнечный свет, разложенный на компоненты и перемещенный по небосводу таким образом, что он кажется исходящим от части небосвода, противоположной той, где находится Солнце.

Научное объяснение радуги впервые дал Рене Декарт в 1637 г. Декарт объяснил радугу на основании законов преломления и отражения солнечного света в каплях выпадающего дождя. В то время еще не была открыта дисперсия — разложение белого света в спектр при преломлении. Поэтому радуга Декарта была белой.

Спустя 30 лет Исаак Ньютон, открывший дисперсию белого света при преломлении, дополнил теорию Декарта, объяснив, как преломляются цветные лучи в каплях дождя. По образному выражению американского ученого А. Фразера, сделавшего ряд интересных исследований радуги уже в наше время, „Декарт повесил радугу в нужном месте на небосводе, а Ньютон расцветил ее всеми красками спектра“.

Несмотря на то, что теория радуги Декарта — Ньютона создана более 300 лет назад, она правильно объясняет основные особенности радуги: положение главных дуг, их угловые размеры, расположение цветов в радугах различных порядков.

Для объяснения радуги мы пока и ограничимся теорией Декарта — Ньютона, которая подкупает своей удивительной наглядностью и простотой.

# Опыт Ньютона



# Наблюдение разложения света в спектр при прохождении его сквозь призму

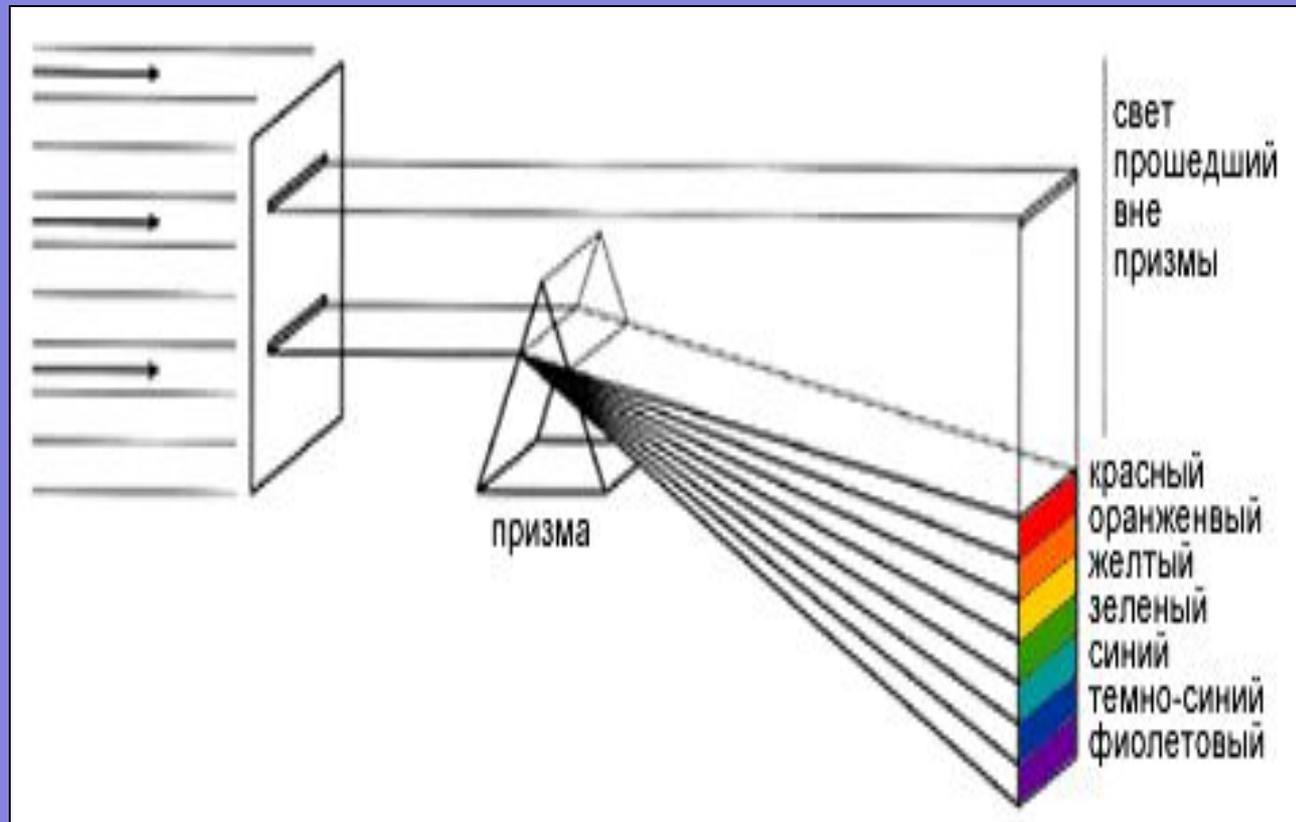
**Оборудование:** источник света, призма, экран, линза, осветитель с щелью.

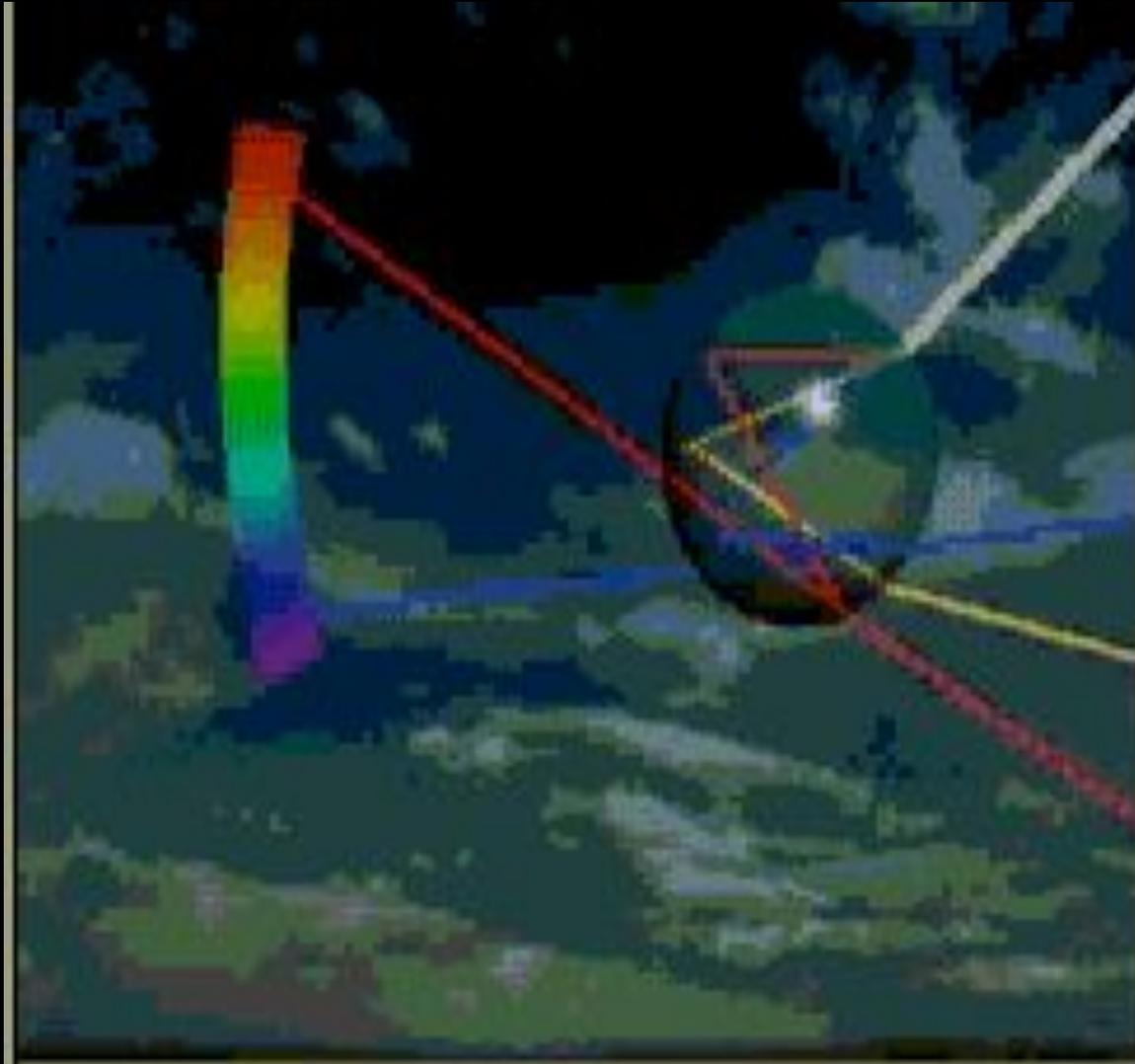
**Цель:** пронаблюдать разложение белого света на спектр.

**Вывод:** белый свет сложный. Он состоит из составляющих, которым соответствуют разные цвета. В виду того, что составляющие белого света обладают различием в своих свойствах, они по разному взаимодействуют с веществами.

Для каждой составляющей белого света показатель преломления имеет свое значение

Наибольший показатель преломления имеют лучи, соответствующие красному цвету.





состоящие в каплях  
следующем порядке:

- красный**
- оранжевый**
- желтый**
- зеленый**
- голубой**
- синий**
- фиолетовый**

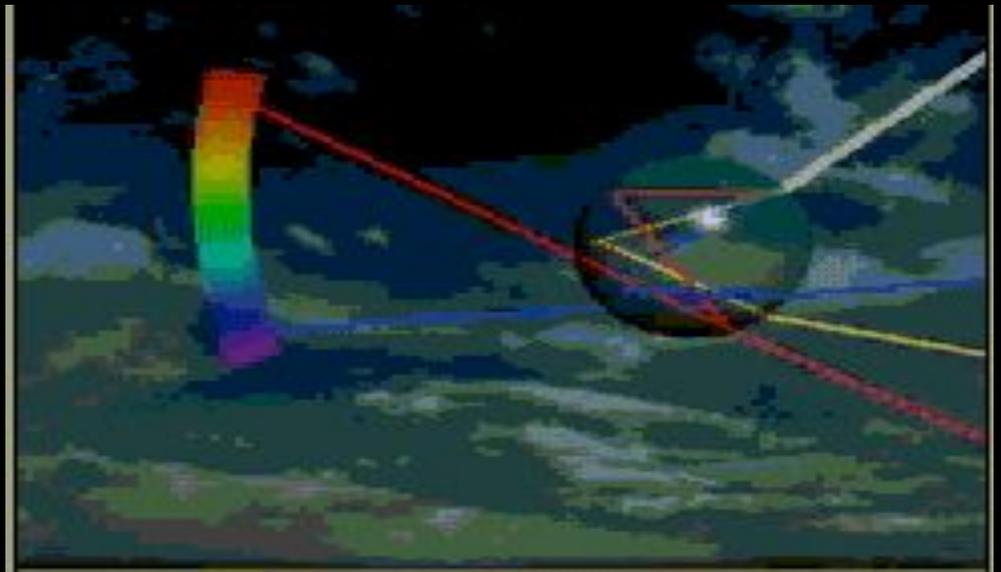




1. Радуга появляется, только когда выглянуло из-за туч солнце и только в стороне, противоположной солнцу.
2. Радуга возникает, когда солнце освещает завесу дождя.
3. Радуга появляется при условии, что угловая высота солнца над горизонтом не превышает  $42^\circ$ .

# Лучи радуги

Итак, пусть параллельный пучок солнечных лучей падает на каплю (рис.1). Ввиду того что поверхность капля кривая, у разных лучей будут разные углы падения. Они изменяются от 0 до  $90^\circ$ . Проследим путь луча, упавшего в точку А, его угол падения обозначим  $i$ . Преломившись под углом преломления  $r$ , луч входит в каплю и доходит до точки В. Часть энергии луча, преломившись, выходит из капли, часть, испытав внутреннее отражение в точке С, идет внутри капли до точки О и т. д. В принципе луч может испытывать любое число ( $n$ ), внутренних отражений, а преломлений у каждого луча два — при входе и при выходе из капли.



# Влияние размеров капель на вид радуги

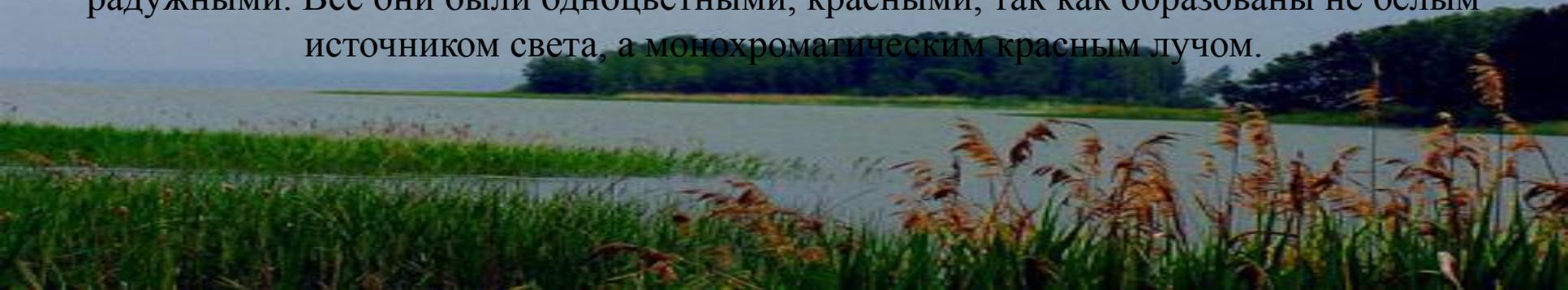
Диаметр капли	Цвет
1...2 мм	Яркий фиолетовый и зеленый цвета, красная дуга голубая едва заметна.
0,5 мм	Слабый красный цвет.
0,2 мм	Красный цвет исчезает.
0,08...0,1 мм	Сохраняется ярким лишь фиолетовый цвет, радуга исчезает и бледнеет.
0,05 мм	Почти белая радуга.

# Бывает ли радуга без дождя?

Бывают ли радуги без дождя или без полос падения дождя? Оказывается, бывают — в лаборатории. Искусственные радуги создавались в результате преломления света в одной подвешенной капельке дистиллированной воды, воды с сиропом или прозрачного масла. Размеры капель варьировали от 1,5 до 4,5 мм. Тяжелые капли вытягивались под действием силы тяжести, и их сечение в вертикальной плоскости представляло собою эллипс.

При освещении капельки лучом гелий-неонового лазера (с длиной волны 0,6328 мкм) появлялись не только первая и вторая радуги, но и необычайно яркие третья и четвертая, с центром вокруг источника света (в данном случае лазера). Иногда удавалось получать даже пятую и шестую радуги. Эти радуги, как первая и вторая, снопа были в стороне, противоположной источнику.

Итак, одна капелька создала столько радуг! Правда, эти радуги не были радужными. Все они были одноцветными, красными, так как образованы не белым источником света, а монохроматическим красным лучом.



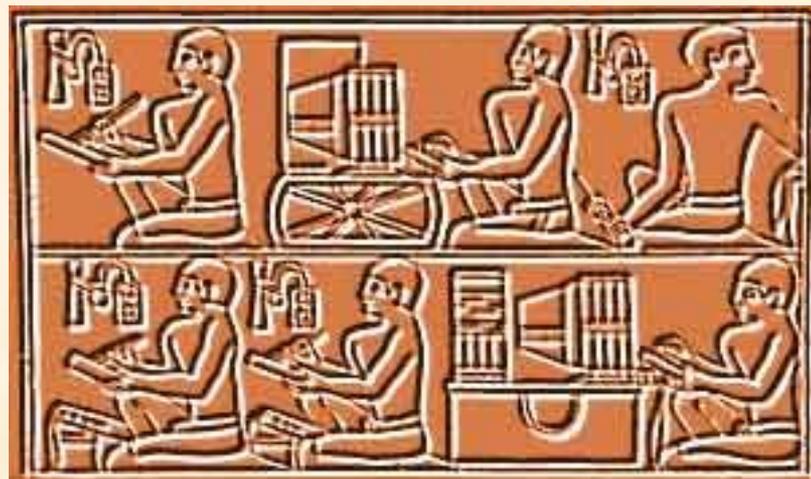
# Свет и цвет

The image features a light blue background with a large, abstract graphic on the right side. This graphic consists of several overlapping circles and radial lines in various colors, including red, orange, yellow, green, blue, and purple. The lines radiate from the center of the circles, creating a sense of depth and movement. The overall effect is reminiscent of a stained glass window or a colorful, abstract sculpture.

# Восприятие и отображение

Зрение является самым информативным из чувств человека. С его помощью нам удастся различать тончайшие нюансы форм, размеров и цветов освещенных предметов. Взглядом мы можем определить свое местоположение, уловить неожиданно возникшую опасность. По мельчайшим признакам мы способны различить близнецов или узнать старика на его детской фотографии.

Кроме этого, будут рассмотрены принципы цветового моделирования, история развития и совершенствования цветовых моделей.



# Свет и информация

Зрение оказалось самым информативным из всех чувств, позволяющим “в мгновение ока” представить целостную картину окружающего мира, а не только отдельных его составляющих. Свет – носитель зрительной информации, является единственным видом электромагнитных излучений, доступных непосредственному восприятию человека.



Почему именно он?

Можно предположить, что зарождающаяся жизнь не обнаружила на самой Земле существенно важных или фатально опасных для нее источников природных излучений, на которые следовало бы оперативно реагировать. Поэтому она полностью сориентировалась на излучения ближайшего к Земле светила, спектр которых в решающей степени обеспечивает приемлемые для жизни условия. Свет оказался основой фотосинтеза – основного способа существования растений. Поэтому и появившийся в последствии животный мир не имел достаточных оснований для отказа от доставшегося ему наследства.

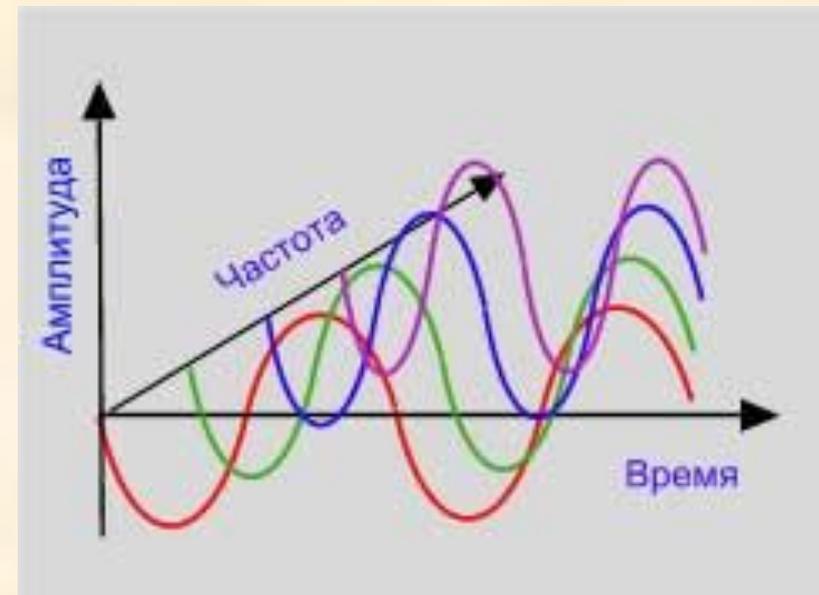
# Физика света

Свет является одной из разновидностей электромагнитных колебаний. Как и любое другое электромагнитное излучение, свет представляет собой энергетический поток, распространяющийся от породившего его источника в окружающее пространство. Как правило, источниками света являются раскаленные до высоких температур тела, тепловые колебания атомов которых и вызывают излучение. Различие резонансных частот атомов химических элементов, составляющих эти тела, порождает сложный поток излучений

Каждое элементарное волновое колебание представляет собой *синусоиду*, т. е. гармоническое колебание, основными характеристиками которой являются частота и амплитуда. *Амплитуда* характеризует размах колебания, частота — периодичность изменения амплитуды.

Сама же синусоида является образом равномерного и непрерывного во времени колебательного процесса. Расстояние между соседними гребнями или впадинами синусоиды равно длине волны колебания и является величиной, обратной ее частоте.

В приложении к свету, элементарное колебание может быть представлено синусоидой, длина волны которой ассоциируется с ее цветом, а амплитуда — с яркостью.

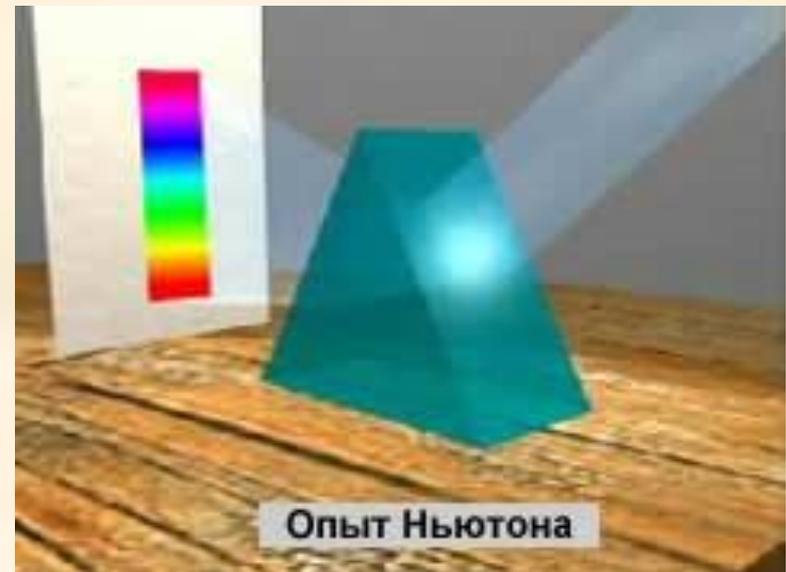


Если представить себе, что все синусоиды монохромных излучений выстроены на плоскости “по частотному ранжиру”, то взгляд на эту плоскость “с торца” (со стороны частотной оси), поможет понять суть традиционного изображения спектра в научной литературе. С этой точки зрения видны только амплитуды отдельных составляющих и их расположение вдоль оси частот. Обыкновенный солнечный свет, кажущийся белым, является характерным примером полихромного и содержит весь спектр видимых излучений.



# Опыт Ньютона

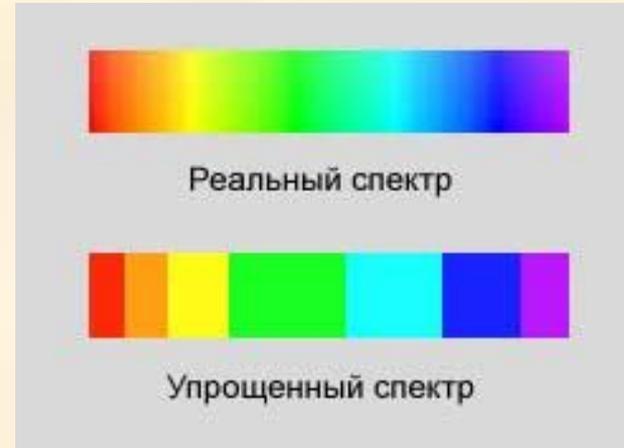
Он выяснил, что цвет не является независимым свойством предмета, неизменно присущим ему, подобно форме и размерам, как считалось раньше. Цвет – это лишь характеристика параметров отражения световых лучей поверхностью предмета при определенном освещении. Те, кому приходилось печатать фотографии, могли заметить, что при красном свете розовый пакет из-под фотобумаги выглядит белым, а зеленая ванночка – черной. Тот же радужный блик от призмы, прекрасно видимый на белом листе бумаги, на темной поверхности практически исчезает.



# Эволюция цветowych моделей

Исходной цветовой моделью может считаться **цветовая полоса**, представляющая собой упрощенное изображение спектра семью локальными спектральными цветами.

Округлая форма палитры подсказала идею усовершенствования этой модели: расположение красок по кругу



- одни из спектральных цветов могут быть получены смешиванием красочных пигментов, а другие – нет.
- *красный, желтый и синий* получили название “*первичных*”. Но это было ошибочное мнение
- “*Вторичными*” были названы цвета, полученные попарным смешиванием первичных. Ими стали *оранжевый, зеленый и фиолетовый*

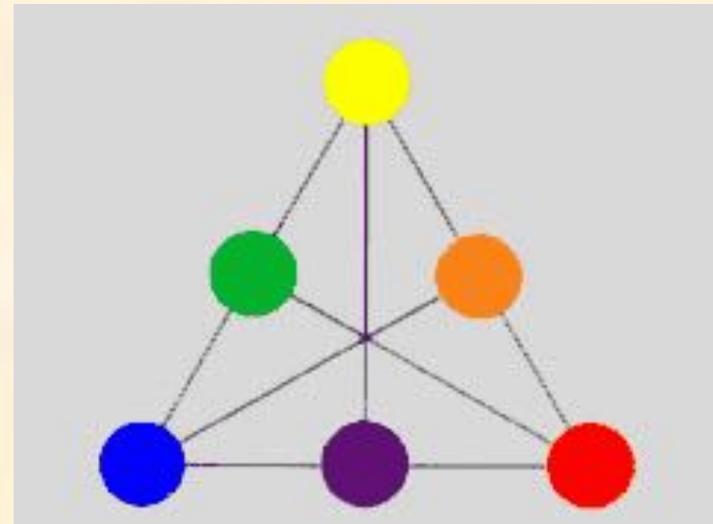
Вместо ожидаемого белого цвета, смесь пигментов дает нечто противоположное: практически черный, вернее, грязно-черный цвет.

Поэтому, пусть и без теоретического обоснования, но на основе экспериментальных данных, было решено считать смесь красок всех цветов черным цветом, а их полное отсутствие на холсте — белым.



Обнаружилась и способность смеси двух парных цветов давать практически такую же насыщенность смесевого "черного" цвета, которая достижима при смешивании всех трех основных цветов. Способность парных цветов *дополнять* друг друга до черного закрепились в названиях "*основные*" и "*дополнительные*" цвета.

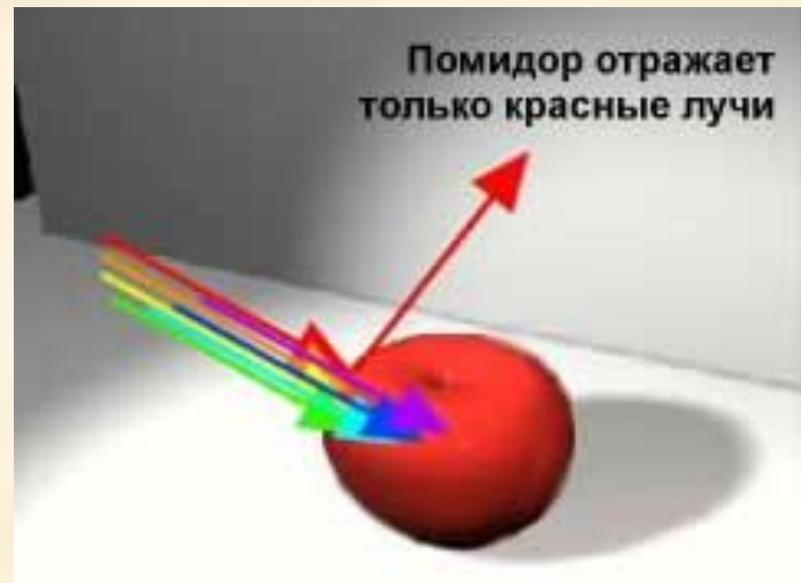
Окончательным вариантом этой модели стал **треугольник**, на вершинах которого расположены первичные цвета, а на биссектрисах – вторичные. Дополнительным считается цвет, расположенный напротив любого, принятого за основной.



# Свет и цвет

Мы приняли к сведению, что цвет – это отраженный свет и согласились с тем, что белый свет содержит в себе все остальные цвета. Пробуя применить это на практике, мы получили прямо противоположный эффект – чем больше красок мы добавляли, тем “чернее” становилась смесь.

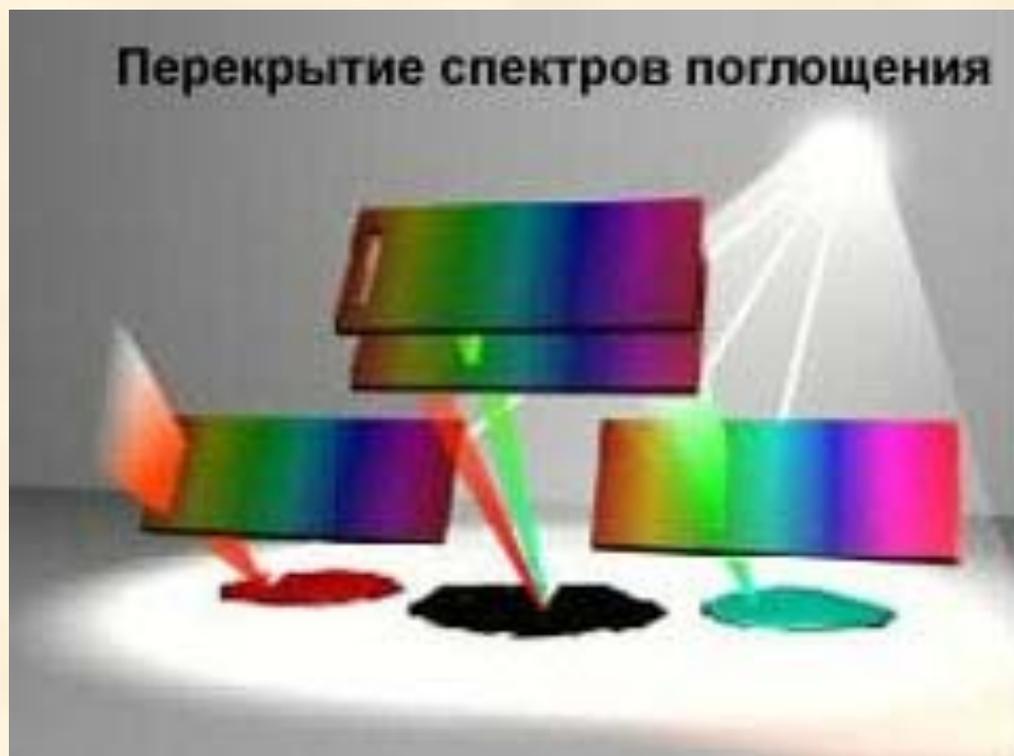
Поверхности предметов поглощают практически все падающее на них излучение, отражая только незначительную его часть. Чем ярче выражен цвет предмета, тем уже спектр его отражения: помидор отражает только красные лучи, апельсин – оранжевые и желтые, а бумага – почти весь падающий на нее свет. Поэтому помидор выглядит яркокрасным, апельсин – оранжевым, а бумага – просто белой.



Этому же закону подчиняются и пигментные краски: чем ярче цвет, тем уже спектр его отражения. Если представить спектр поглощения пигмента в виде непрозрачной пластины, перекрывающей солнечный спектр, а спектр отражения – отверстием в ней, то становится понятным неутешительный результат смешивания красок. Относительно малые размеры “окон” в сравнении с существенными расстояниями между ними практически не оставляют надежд на их совпадение.

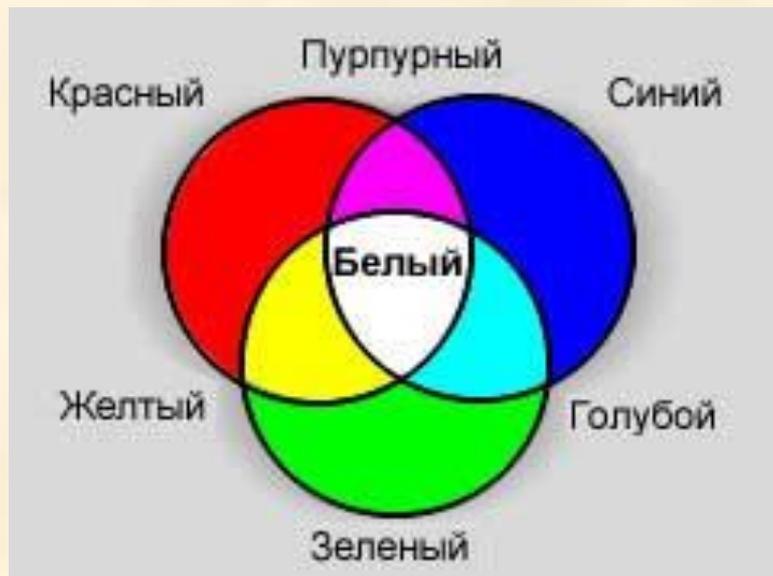
Даже если окна хотя бы частично совмещаются, в оставшуюся “дырочку” нам видны лишь периферийные участки спектров обоих пигментов, и мы получаем ослабленную и затемненную смесь исходных цветов. А если совмещения нет, то оба отверстия оказываются полностью перекрытыми и отражение практически отсутствует.

Отсюда и “чернота” большинства цветowych смесей.



# Современные цветовые модели

Для **аддитивной модели**, или модели **RGB (КЗС)**, основными цветами стали *красный, зеленый и синий*, а дополнительными – *желтый, голубой и пурпурный*. (Следует учесть, что, несмотря на совпадение названий некоторых цветов с названиями цветов “классической модели”, их частоты, а, следовательно, и оттенки, несколько отличаются от “одноименных”.) В полном соответствии с теорией, сумма всех цветов дает белый цвет, а отсутствие света – черный. Характерной особенностью модели является то, что понятия белого и черного в ней не приближительны, а математически точны и физически достоверны.



# Субтрактивная модель, или модель СМУ (ЖГП)

В определенном смысле представляет собой противоположность аддитивной. В ней основными цветами являются *желтый, голубой и пурпурный* цвета, а дополнительными – *красный, зеленый и синий*. То есть, *дополнительные* цвета аддитивной модели служат *основными* в субтрактивной, а *основные*, соответственно, – *дополнительными*. Сумма всех цветов дает черный цвет, а их отсутствие – белый. Каждый субтрактивный цвет является результатом вычитания собственного спектра поглощения из спектра излучения источника света.



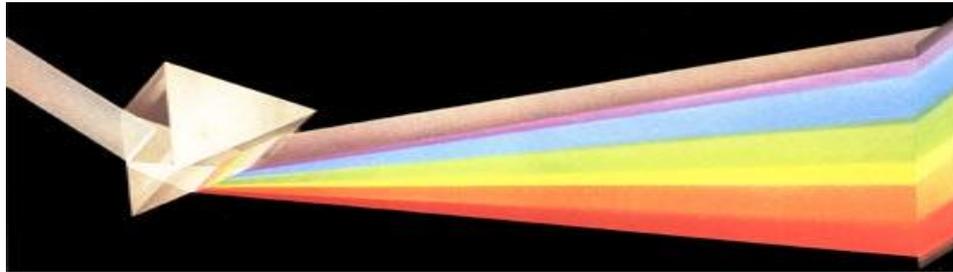
The background image shows a grand, ornate interior space, likely a ballroom or a formal hall. The walls are covered in intricate gold leaf decorations and paneling. Several large, multi-tiered chandeliers hang from the ceiling, casting a warm, golden light. In the foreground, there are three arched doorways or alcoves, each with a white curtain and a dark red valance. The overall atmosphere is one of luxury and elegance.

# Свет и цвет

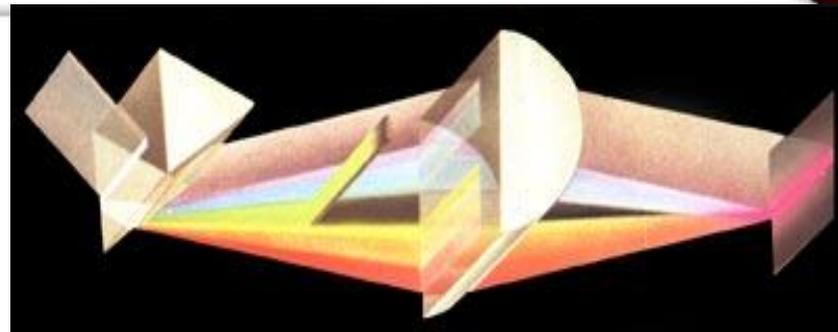
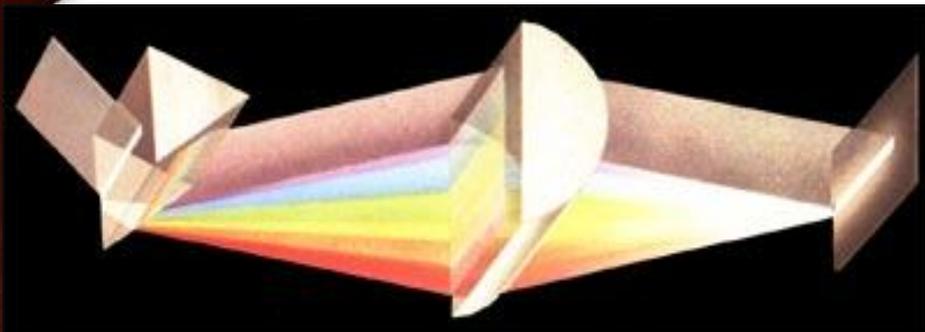
Спектральный состав света. Описание цвета.  
Особенности восприятия света.

# Спектральный состав света

В 1666 году Исаака Ньютона заинтересовало поведение солнечных лучей, проходящих через призму:



- 1) цвет возникает в результате **взаимодействия** белого света с материей
- 2) после прохождения через призму **направление** луча менялось
- 3) солнечный свет разлагается призмой на спектральные лучи от красного до фиолетового
- 4) солнечный свет – сочетание различных видов света, каждый из которых окрашен в один чистый цвет, а призма преломляет эти цвета в разной степени: красный — в наименьшей, фиолетовый — в наибольшей, остальные — в порядке расположения.



\* если **смешать** цвета спектра, например, собрав его свет линзой, то **окраска получается белая**

\* **выключая некоторые цвета** перед тем, как соединить остальные, можно получить **окрашенный свет**

**!!! Окраска любого объекта зависит от того, какой свет идет от него к глазу наблюдателя.** Это в свою очередь зависит как от характера света, падающего на объект, так и от поверхности объекта, отражающей, поглощающей и пропускающей отдельные лучи спектра.

Если поверхность при белом освещении окрашена в определенный насыщенный цвет, значит, одни спектральные лучи падающего на нее света она отражает, а другие — активно поглощает.

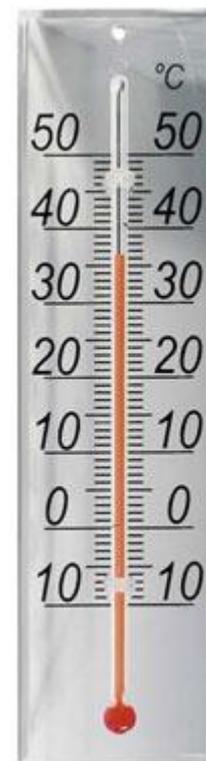


Если поверхность имеет черную окраску, значит, она **поглощает** все цвета спектра.



Некоторые вещества не только поглощают часть получаемой ими световой энергии, но и **излучают ее в виде света иной окраски**, и такие вещества называются **люминесцентными**.

Свет, поглощаемый веществом, преобразуется в **тепловую энергию**. В 1800 году английский астроном Уильям Гершель открыл невидимый компонент солнечного света в результате нагревания на солнце шарика термометра. Компонент этот находился за пределами красной части спектра, поэтому ученый назвал его **«инфракрасным»** (ниже красного) светом.



Целая гамма красок рождается в мыльном пузыре. Свет, отраженный от внутренней поверхности пузыря, смешивается со светом, отраженным от его внешней поверхности. Некоторые цвета усилены, другие ослаблены в зависимости от толщины поверхности и угла зрения.



**Ультрафиолетовый свет** — невидимый компонент света, находящийся за пределами фиолетовой части спектра, — возбуждает в некоторых веществах излучение видимого света.



← **ОТУНИТ** →

При обычном и ультрафиолетовом освещении



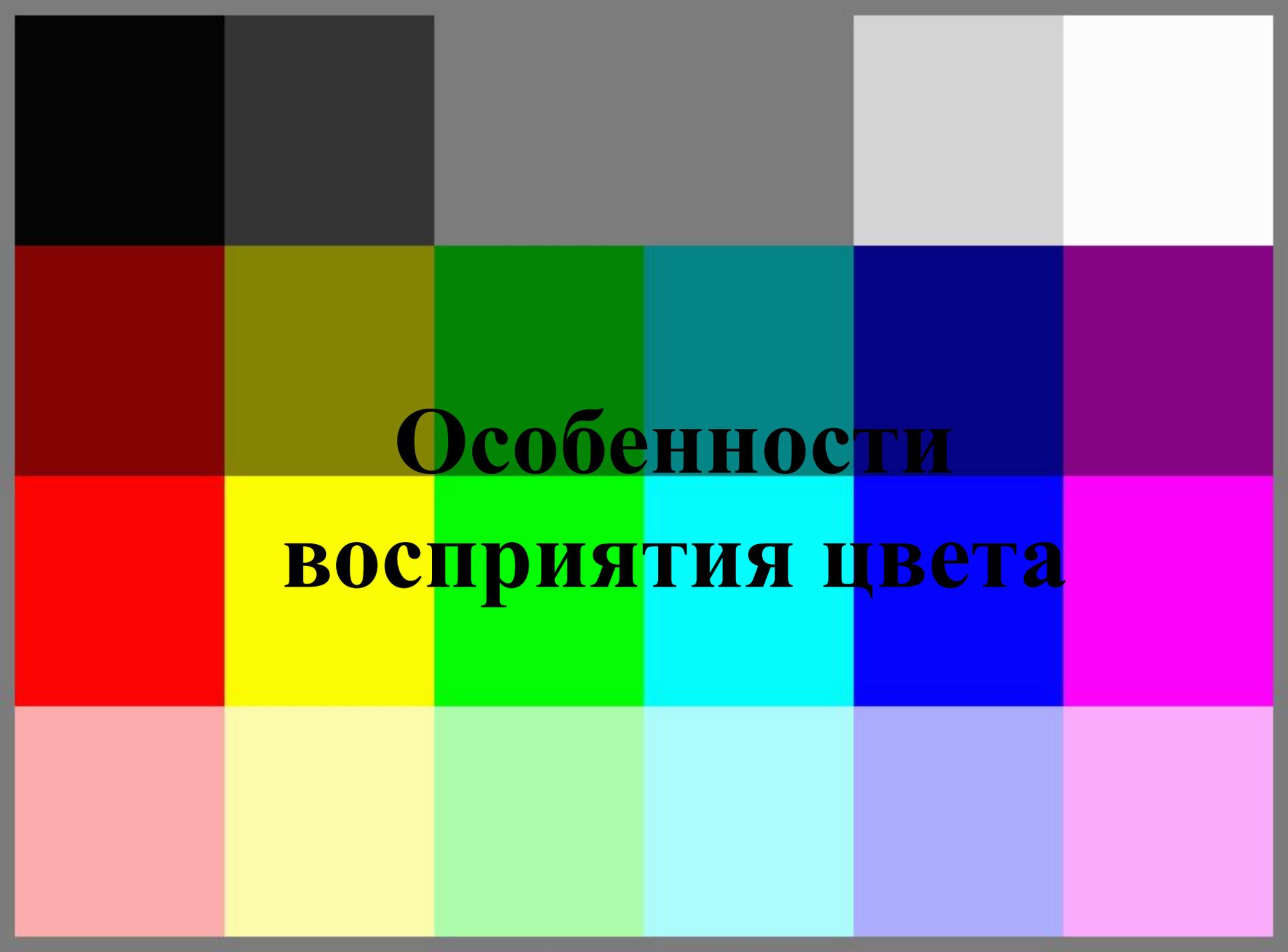
# Описание цвета

## 3 измерения: цвет, насыщенность и яркость

основной признак, по которому различаются **цветные лучи света**: красный от синего, пурпурный от желтого и так далее. Каждый цвет может изменяться в зависимости от степени насыщенности или чистоты.

**интенсивность цвета**. Световой спектр состоит из лучей очень насыщенного цвета, а цвета, которые мы ежедневно видим вокруг, большей частью ненасыщенны.

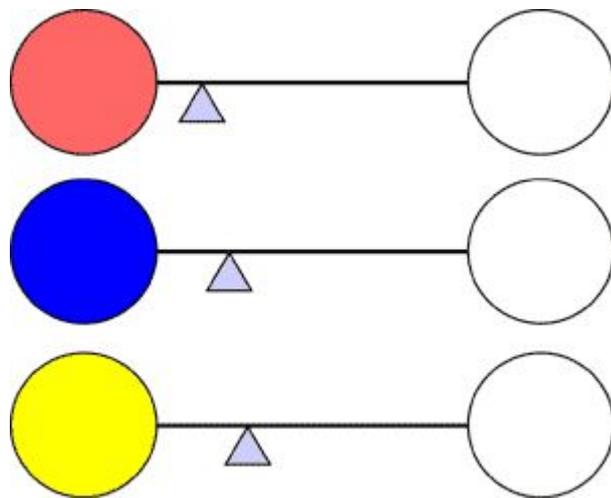
зависит в основном от **количества световых лучей, отраженных поверхностью данного цвета**, что равно его яркости по отношению к другим цветам при данном освещении.



**Особенности  
восприятия цвета**

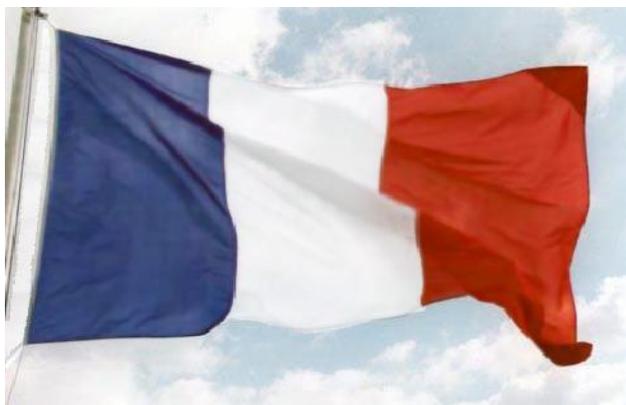
# Особенности восприятия света

Так, лабораторные опыты, проводившиеся еще в 1907 году, показали, что люди сходятся во мнении относительно **условного веса цветов**. Красный был признан самым тяжелым, за ним шли равные по весу оранжевый, синий и зеленый, затем — желтый и последним — белый.\*\*



\*\*Однако это зрительное впечатление не настолько сильное, чтобы повлиять на представление человека о весе различных цветных предметов, которые он берет в руки.

Цвет изменяет наше представление о **действительных размерах предметов**, причем цвета, которые кажутся тяжелыми, уменьшают эти размеры. Из равновеликих квадратов самым маленьким кажется красный, синий — побольше, белый — самым большим.



Французский трехцветный флаг обычно представляет собой синюю, белую и красную вертикальные полосы одинаковой ширины. А на кораблях соотношение этих полос меняют — 33:30:37, чтобы на расстоянии они казались равными.

Знакомая классификация цветов на **теплые и холодные** не очень-то совпадает с нашей оценкой реальной температуры. Во время одного опыта люди брали в руки синий или зеленый стержень, нагретый до 42° С, и он казался им теплее красного или оранжевого стержня, нагретого до той же температуры. Опыт, целью которого было определить, вызывает ли теплый свет в комнате ощущение тепла или уюта, показал, что теплое освещение ни в коей мере не может заменить систему отопления.

Разглядывая образцы одиночных цветов на нейтральном сером фоне, люди обычно отдают **предпочтение синим тонам** — от сине-зеленых до пурпурно-синих. Меньше других нравится зеленовато-желтый цвет. Независимо от цвета отдается **предпочтение светлым тонам**



Исследователи просили испытуемых определить также привлекательность цветowych пар и обнаружили, что людей **привлекают резко контрастные цвета**, а еще больше — цвета, отличающиеся по насыщенности и яркости

*Тем не менее тщательные исследования показывают, что во многих случаях **люди в разных странах мира реагируют на цвет одинаково.** Красный, желтый, зеленый и синий — «фокусные» цвета для человечества. Именно эти цвета предпочитают дети, пока не начинают говорить, и избегают «пограничных» цветов, лежащих между ними. Названия «фокусных» цветов первыми появляются в речи.*

**У многих людей цвета ассоциируются с другими ощущениями. Так, поэт Рембо считал, что у каждой гласной есть свой цвет: А — черная, Е — белая, I — красная, О — синяя, У — зеленая. А Римскому-Корсакову казалось, что в свой особый цвет окрашены различные музыкальные тональности: до мажор — в белый, ре мажор — в желтый, ми мажор — в синий, фа мажор — в зеленый.**

Серый, желтый и белый, как правило, считают слабыми цветами, а красный — сильным и активным. Синий почти повсюду расценивают как «хороший» цвет. В своем восприятии цвета и отношении к нему люди, по-видимому, очень похожи друг на друга.

# СВОЙСТВА СВЕТА

Волновые свойства света  
Квантовые свойства света  
Скорость света

Первые представления древних ученых о том, что такое свет, были весьма наивны. Существовало несколько точек зрения. Одни считали, что из глаз выходят особые тонкие щупальца и зрительные впечатления возникают при ощупывании ими предметов. Эта точка зрения имела большое число последователей, среди которых был Эвклид, Птолемей и многие другие ученые и философы.

Такое неопределенное положение относительно природы света сохранялось до начала XIX века, когда были открыты явления дифракции света и интерференция света. Эти явления присущи исключительно волновому движению. Объяснить их с помощью корпускулярной теории нельзя. Поэтому казалось, что волновая теория одержала окончательную и полную победу.

Такая уверенность особенно окрепла, когда Максвелл во второй половине XIX века показал, что свет есть частный случай электромагнитных волн. Работами Максвелла были заложены основы электромагнитной теории света.

После экспериментального обнаружения электромагнитных волн Герцем никаких сомнений в том, что при распространении свет ведет себя как волна, не осталось.

Однако в начале XIX века представления о природе света начали коренным образом изменяться. Неожиданно выяснилось, что отвергнутая корпускулярная теория все же имеет отношение к действительности.

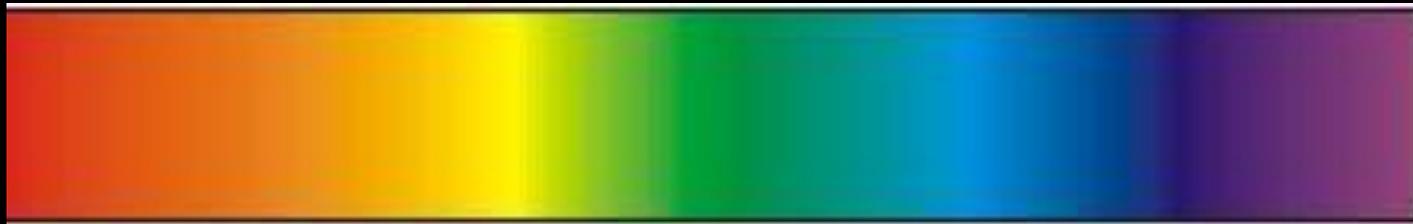
При излучении и поглощении свет ведет себя подобно потоку частиц.

Были обнаружены прерывистые, или, как говорят, квантовые, свойства света. Возникла необычная ситуация: явления интерференции и дифракции по-прежнему можно объяснить, считая свет волной, а явления излучения и поглощения – считая свет потоком частиц. Эти два, казалось бы, несовместимых друг с другом представления о природе света в 30-х годах XX века удалось непротиворечивым образом объединить в новой выдающейся физической теории – квантовой электродинамике.

# 1. Волновые свойства света

## 1.1. Дисперсия

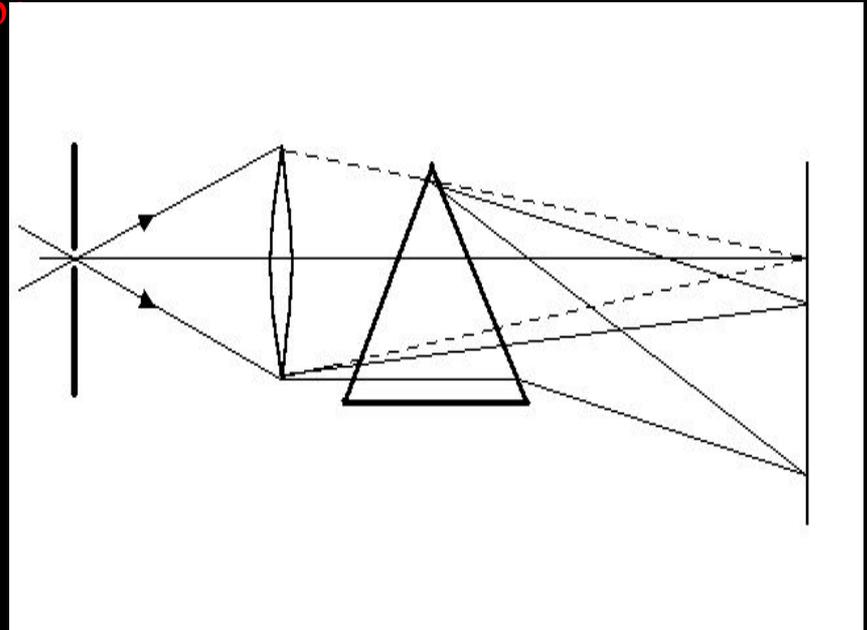
Занимаясь усовершенствованием телескопов, Ньютон обратил внимание на то что, что изображение, даваемое объективом, по краям окрашено. Он заинтересовался этим и первый «исследовал разнообразие световых лучей и проистекающие отсюда особенности цветов, каких до того никто даже не »(слова из надписи на могиле Ньютона) Основной опыт Ньютона был гениально прост. Ньютон догадался направить на призму световой пучок малого поперечного сечения. Пучок солнечного света проходил в затемненную комнату через маленькое отверстие в ставне. Падая на стеклянную призму, он преломлялся и давал на противоположной стене удлиненное изображение с радужным чередованием цветов. Следуя многовековой традиции, согласно которой радуга считалась состоящей из семи основных цветов, Ньютон тоже выделил семь цветов: фиолетовый, синий, голубой, зеленый, желтый, оранжевый и красный. Саму радужную полосу Ньютон назвал спектром.



Важный вывод, к которому пришел Ньютон, был сформулирован им в трактате по «Оптике» следующим образом: «Световые пучки, отличающиеся по цвету, отличаются по степени преломляемости» Наиболее сильно преломляются фиолетовые лучи, меньше других – красные.

Зависимость показателя преломления света от его цвета носит название

В дальнейшем Ньютон усовершенствовал свои наблюдения спектра, чтобы получить более чистые цвета. Ведь круглые цветные пятна светового пучка, прошедшего через призму, частично перекрывали друг друга. Вместо круглого отверстия использовалась узкая щель (А), освещенная ярким источником. За щелью располагалась линза (В), дающая на экране (D) изображение в виде узкой белой полоски. Если на пути лучей поместить призму (С), то изображение щели растянется в спектр, окрашенную полоску, переходы цветов, в которой от красного к фиолетовому подобны наблюдаемым в радуге.



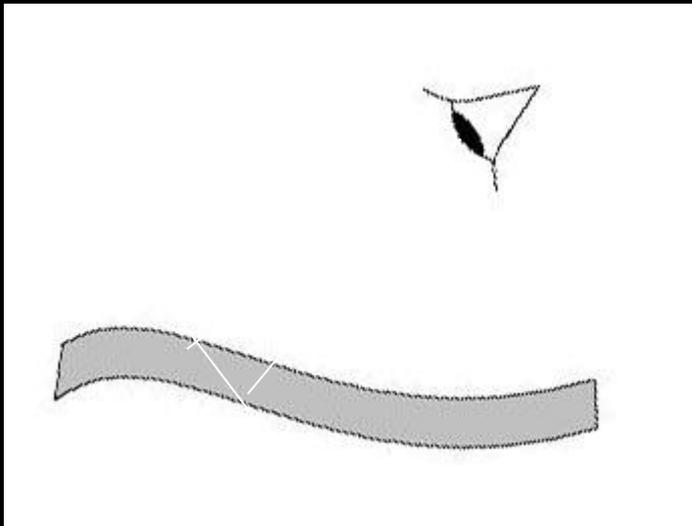
Таким образом, в основных опытах Ньютона заключались два важных открытия:

1. Свет различного цвета характеризуется различными показателями преломления в данном веществе (дисперсия).

2. Белый цвет есть совокупность простых цветов.

Зная, что белый свет имеет сложную структуру, можно объяснить удивительное многообразие красок в природе. Если предмет, например, лист бумаги, отражает все падающие на него лучи различных цветов, то он будет казаться белым. Покрывая бумагу слоем краски, мы не создаем при этом света нового цвета, но задерживаем на листе некоторую часть имеющегося. Отражаться теперь будут только красные лучи, остальные поглотятся слоем краски. Трава и листья деревьев кажутся нам зелеными потому, что из всех падающих на них солнечных лучей они отражают лишь зеленые, поглощая остальные. Если посмотреть на траву через красное стекло, пропускающее лишь красные лучи, то она будет казаться почти черной.

## 1.2. Интерференция



- Интерференцию света наблюдали очень давно, но только не отдавали себе в этом отчет. Многие видели интерференционную картину, когда в детстве развлекались пусканием мыльных пузырей или наблюдали за радужным переливом цветов тонкой пленки керосина на поверхности воды. Именно интерференция света делает мыльный пузырь столь достойным восхищения.
- Английский ученый Томас Юнг первым пришел к гениальной мысли о возможности объяснения цветов тонких пленок сложением двух волн, одна из которых (А) отражается от наружной поверхности пленки, а вторая (В)– от внутренней.

При этом происходит интерференция световых волн — сложение двух волн, вследствие которого наблюдается усиление или ослабление результирующих световых колебаний в различных точках пространства. Результат интерференции (усиления или ослабления результирующих колебаний) зависит от толщины пленки и длины волны. Усиление света произойдет в том случае, если преломленная волна 2 (отражающаяся от внутренней поверхности пленки) отстанет от волны 1 (отражающейся от наружной поверхности пленки) на целое число длин волн. Если же вторая волна отстанет от первой на половину длины волны или на нечетное число полуволн, то произойдет ослабление света.

Для того чтобы при сложении волн образовалась устойчивая интерференционная картина, волны должны быть когерентными, т.е. должны иметь одинаковую длину волны и постоянную разность фаз. Когерентность волн, отраженных от наружной и внутренней поверхности пленки, обеспечивается тем, что обе они являются частями одного светового пучка. Волны же, испущенные двумя обычными независимыми источниками, не дают интерференционной картины из-за того, что разность фаз двух волн от таких источников не постоянна.

Юнг также понял, что различие в цвете связано с различием в длине волны (или частоте световых волн). Световым потокам различного цвета соответствуют волны различной длины. Для взаимного усиления волн, различающихся друг от друга длиной, требуется различная толщина пленки. Следовательно, если пленка имеет неодинаковую толщину, то при освещении ее белым светом должны появиться различные цвета.

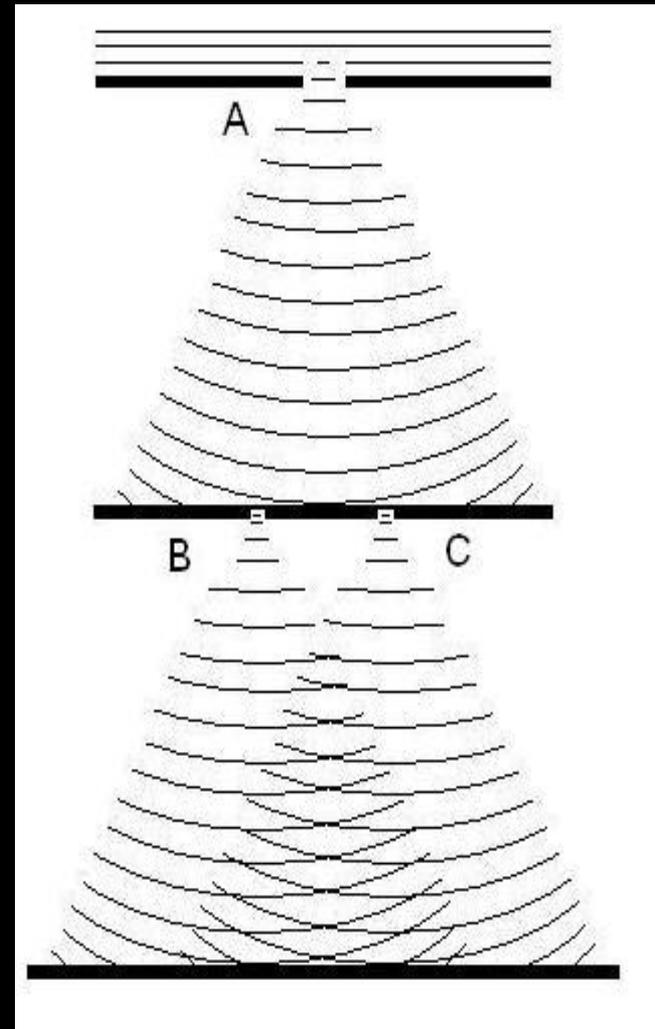
### 1.3. Дифракция. Опыт Юнга.

Дифракция света в узком смысле - явление огибания светом препятствий и попадание света в область геометрической тени; в широком смысле - всякое отклонение при распространении света от законов геометрической оптики.

Определение Зоммерфельда: под дифракцией света понимают всякое отклонение от прямолинейного распространения, если оно не может быть объяснено как результат отражения, преломления или изгибания световых лучей в средах с непрерывно меняющимся показателем преломления.

В 1802г. Юнг, открывший интерференцию света, поставил классический опыт по дифракции.

В непрозрачной ширме, он проколол булавкой два маленьких отверстия В и С, на небольшом расстоянии друг от друга. Эти отверстия освещались узким световым пучком, прошедшим в свою очередь через малое отверстие А в другой ширме. Именно эта деталь, до которой очень трудно было додуматься в то время, решила успех опыта. Интерferируют только когерентные волны. Возникшая в соответствии с принципом Гюйгенса сферическая волна от отверстия А возбуждала в отверстиях В и С когерентные колебания. В следствии дифракции из отверстий В и С выходили два световых конуса, которые частично перекрывались. В результате интерференции световых волн на экране появлялись чередующиеся светлые и темные полосы. Закрывая одно из отверстий, Юнг обнаруживал, что интерференционные полосы исчезали. Именно с помощью этого опыта впервые Юнгом были измерены длины волн, соответствующие световым лучам разного цвета, причем весьма точно.



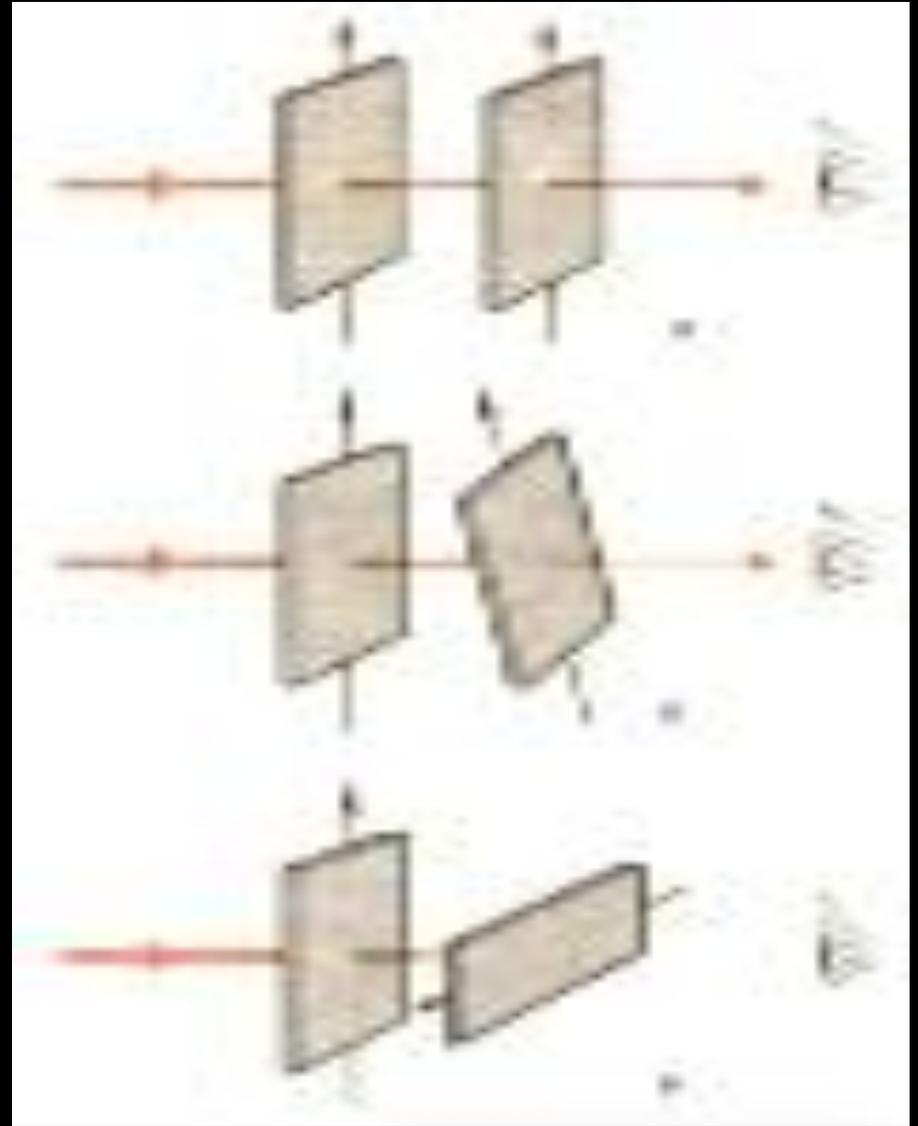
Исследование дифракции получило свое завершение в работах Френеля. Он детально исследовал различные функции дифракции на опытах и построил количественную теорию дифракции, позволяющую рассчитать дифракционную картину, возникающую при огибании светом любых препятствий.

С помощью теории дифракции решают такие проблемы, как защита от шумов с помощью акустических экранов, распространение радиоволн над поверхностью Земли, работа оптических приборов (так как изображение, даваемое объективом, - всегда дифракционная картина), измерения качества поверхности, изучение строения вещества и многие другие.

## 1.4. Поляризация

- Новые свойства о характере световых волн показывает опыт над прохождением света через кристаллы, в частности через турмалин.
- Возьмем две одинаковые прямоугольные пластинки турмалина, вырезанные так, что одна из сторон прямоугольника совпадает с определенным направлением внутри кристалла, носящим название оптической оси. Наложим одну пластинку на другую так, чтобы оси их совпадали по направлению, и пропустим через сложенную пару пластинок узкий пучок света от фонаря или солнца.

Турмалин представляет собой кристалл буро – зеленого цвета, след прошедшего пучка на экране представится в виде тёмно – зеленого пятнышка. Начнем поворачивать одну из пластинок вокруг пучка, оставляя вторую неподвижной. Мы обнаружим, что след пучка становится слабее, и когда пластинка повернётся на  $90^\circ$ , он совсем исчезнет. При дальнейшем вращении пластинки проходящий пучок вновь начнет усиливаться и дойдет до прежней интенсивности, когда пластинка повернется на  $180^\circ$ , т.е. когда оптические оси пластинок вновь расположатся параллельно. При дальнейшем вращении турмалина пучок вновь слабеет.



Из данных явлений можно сделать следующие выводы:

1. Световые колебания в пучке направлены перпендикулярно к линии распространения света (световые волны поперечны).

2. Турмалин способен пропускать световые колебания только в том случае, когда они направлены определенным образом относительно его оси.

3. В свете фонаря (солнца) представлены поперечные колебания любого направления и притом в одинаковой доле, так что ни одно направление не является преимущественным.

# §2. Квантовые свойства света

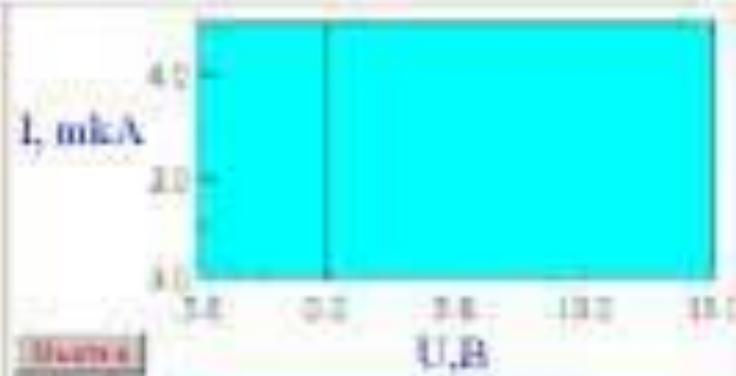
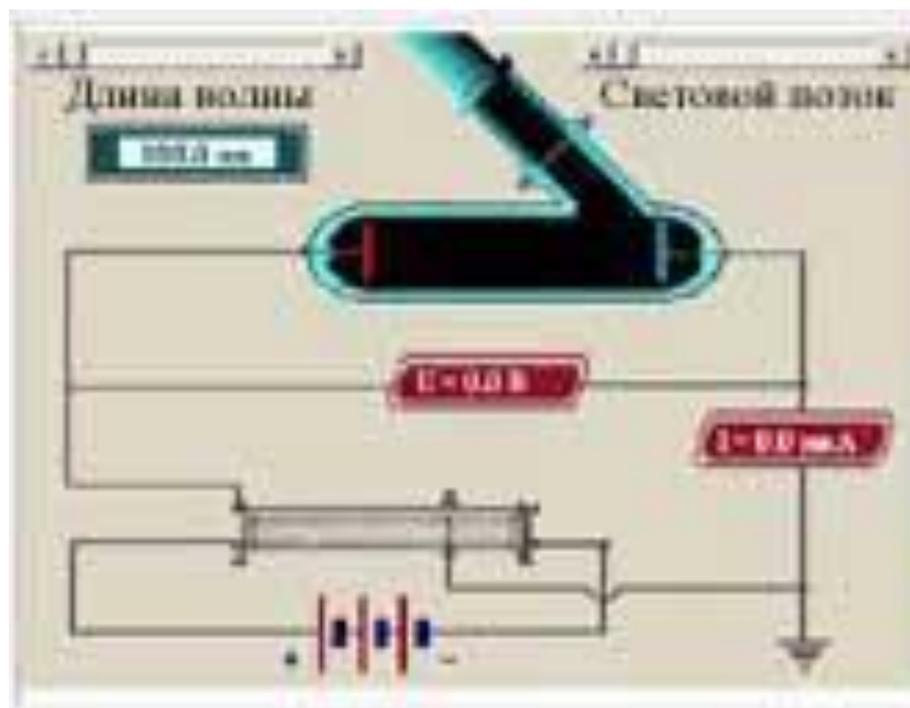
□ Фотоэффект



□ Эффект Комптона

- Открытие фотоэффекта началось с наблюдения Г.Герца (1887г.): электрический пробой воздуха происходит при меньшем напряжении, если освещать шары разрядника ультрафиолетовым излучением. В дальнейшем выяснилось, что причина этого – вырывание электронов под действием падающего света. Это явление назвали **фотоэффектом**. А.Г.Столетов подверг фотоэффект систематическому экспериментальному исследованию и установил ряд закономерностей этого явления. Оказалось, что явление основано на удалении *отрицательного* электричества с поверхности металла под действием ультрафиолетового света. В его многочисленных опытах, а также экспериментах Ф.Ленарда, О.Ричардсона, К. Комптона, Р.Милликена, А.Ф.Иоффе, П.И.Лукирского и С. С.Прилежаева исследованы все характерные свойства явления.

- **Установка для наблюдения**
- В нашем распоряжении есть установка для изучения фотоэффекта. Внутри откачанной трубки расположены две пластины, присоединенные к источнику напряжения, и в ту же цепь включен прибор для измерения тока. Одна из пластин освещается светом. Длину волны света можно менять в широком диапазоне: от невидимого ультрафиолетового (на старте  $\lambda=100$  нм) до инфракрасного. Величина светового потока регулируется диафрагмой. Электроны, испускаемые под действием света, можно подвергнуть действию либо задерживающего ( $U < 0$ ) либо ускоряющего ( $U > 0$ ) электрического поля. Вольтметр позволяет следить за разностью потенциалов между электродами. На графиках справа отражаются значения измеряемого тока  $I$ , разности потенциалов  $U$  и величина светового потока  $\Phi$ . Графики в любой момент, например, приступая к новому опыту, можно очистить. Включение реостата позволяет не только регулировать разность потенциалов между электродами, но и менять ее полярность.



- Различают фотоэффект внешний, внутренний, вентильный и многофотонный фотоэффект.
- **Внешним фотоэффектом** называется испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения. *Внешний фотоэффект* наблюдается в твердых телах (металлах, полупроводниках, диэлектриках), а также в газах на отдельных атомах и молекулах (фотоионизация).
- **Внутренний фотоэффект** – это вызванные электромагнитным излучением переходы электронов внутри полупроводника или диэлектрика из связанных состояний в свободные без вылета наружу. В результате концентрация носителей тока внутри тела увеличивается, что приводит к возникновению фотопроводимости (повышению электропроводности полупроводника или диэлектрика при его освещении) или к возникновению электродвижущей силы (ЭДС).



- **Вентильный фотоэффект** является разновидностью внутреннего фотоэффекта, – это возникновение ЭДС (фото ЭДС) при освещении контакта двух разных полупроводников или полупроводника и металла (при отсутствии внешнего электрического поля). Вентильный фотоэффект открывает пути для прямого преобразования солнечной энергии в электрическую.
- **Многофотонный фотоэффект** возможен, если интенсивность света очень большая (например, при использовании лазерных пучков). При этом электрон, испускаемый металлом, может одновременно получить энергию не от одного, а от нескольких фотонов.



- А.Г. Столетов установил три закона фотоэффекта, не утратившие своего значения и в настоящее время. В современном виде законы внешнего фотоэффекта формулируются следующим образом:
- **I. При фиксированной частоте падающего света число фотоэлектронов, вырываемых из катода в единицу времени, пропорционально интенсивности света** (сила тока насыщения пропорциональна энергетической освещенности  $E_e$  катода).
- **II. Максимальная начальная скорость** (максимальная начальная кинетическая энергия) **фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой  $\nu$ .**
- **III. Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, т.е. минимальная частота света** (зависящая от химической природы вещества и состояния его поверхности), **ниже которой фотоэффект невозможен.**





# Эффект Комптона

- **КОМПТОНА ЭФФЕКТ**, изменение длины волны, сопровождающее рассеяние пучка рентгеновских лучей в тонком слое вещества. Явление было известно еще за несколько лет до работы А.Комптона, который опубликовал в 1923 результаты тщательно выполненных экспериментов, подтвердивших существование этого эффекта, и одновременно предложил его объяснение. (Вскоре независимое объяснение было дано П.Дебаем, почему явление иногда называют эффектом Комптона – Дебая.) В то время существовали два совершенно разных способа описания взаимодействия света с веществом, каждый из которых подтверждался значительным числом экспериментальных данных. С одной стороны, теория электромагнитного излучения Максвелла (1861) утверждала, что свет представляет собой волновое движение электрического и магнитного полей; с другой, квантовая теория Планка и Эйнштейна доказывала, что при некоторых условиях пучок света, проходя через вещество, обменивается с ним энергией, причем процесс обмена напоминает столкновение частиц. Важное значение работы Комптона состояло в том, что она явилась важнейшим подтверждением квантовой теории, поскольку, показав неспособность теории Максвелла объяснить экспериментальные данные, Комптон предложил простое объяснение, основанное на гипотезе квантов.

- С помощью рентгеновского спектрометра (изображен на рис.1) А.Комптон произвел точные измерения длины волны рентгеновских лучей, рассеянных на мишени. А. Комптон обнаружил (см. рис.2), что излучение бывает двух сортов: у одного длина волны совпадает с длиной волны первичного излучения (пунктирная кривая), а другое обладает бóльшей длиной волны (сплошная кривая). Им были установлены две особенности процесса: 1) разность длин волн рассеянного и первичного излучений не зависит от природы рассеивателя и длины волны первичного излучения; 2) при возрастании атомного номера рассеивателя интенсивность несмещенной линии возрастает, интенсивность смещенной линии падает.

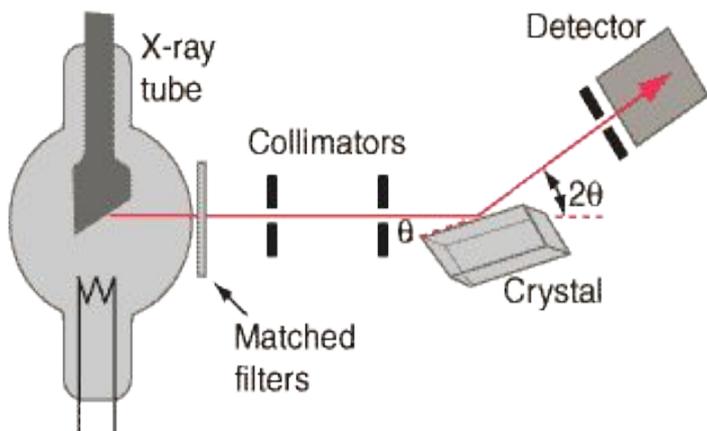


Рис. 1 Рентгеновский спектрометр У.Г.Брегга

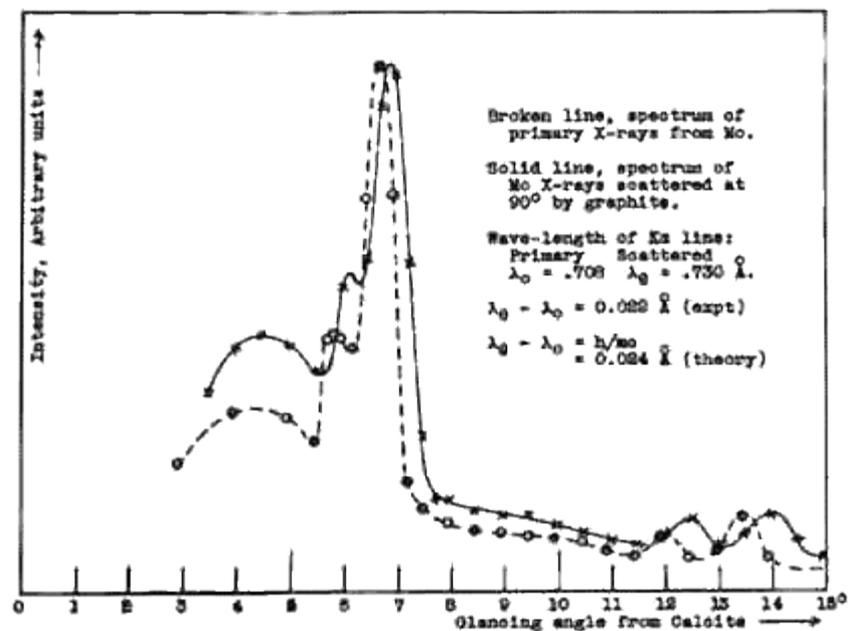


Рис. 2 Спектр первичных и рассеянных X-лучей

- **Расчет эффекта Комптона**

- Пусть фотон с энергией  $h\nu$  падает на покоящийся электрон (см. рис.3).  
Запишем уравнения, выражающие законы сохранения энергии и импульса:  
1. энергия до столкновения (энергия фотона  $h\nu$  плюс энергия покоя электрона) должна равняться энергии после столкновения (энергия  $h\nu'$  рассеянного фотона плюс полная энергия получившего отдачу электрона)
- $h\nu + mc^2 = h\nu' + mc^2$ , (1)
- где  $m_0$  - масса покоящегося электрона,  $m$  - масса движущегося электрона,  $c$  - скорость света;
  
- 2. импульс падающего фотона  $p$  должен равняться сумме импульсов электрона  $p_e$  и рассеянного фотона  $p'$
- $p = p' + p_e$  (2)
- Энергия фотона связана с импульсом соотношением
- $|p| = h\nu/c$ . (3)
- Преобразуем выражение (1): перенесем энергию рассеянного кванта в левую часть, выразим энергии квантов через импульсы в соответствии с (3), разделим обе части равенства на  $c$  и возведем в квадрат
- $(p - p' + mc)^2 = (mc)^2$ . (4)

- В законе сохранения импульса (2) перенесем импульс рассеянного кванта в левую часть и возведем в квадрат обе части равенства
- $p^2 - 2pp' + p'^2 = pe^2$ . (5)
- После вычитания последнего равенства из (4) получим
- $-2pp' + 2pp'\cos\Theta + 2p\hbar\omega - 2p'\hbar\omega + m_0^2c^2 = m^2c^2 - pe^2$  (6)
- Квадрат полной энергии электрона
- $Ee^2 = (mc^2)^2 = pe^2c^2 + m_0^2c^4$ .
- Учитывая это, замечаем, что правая часть (6) равна  $m_0^2c^2$ . Точно такое же слагаемое есть и в левой части (6). После сокращений получим выражение для модуля импульса рассеянного фотона
- $p' = p/[1 + (p/mc)(1 - \cos\Theta)]$ . (7)
- Поскольку импульс фотона  $p = h/\lambda$ , получаем окончательное выражение для изменения длины волны рассеянного фотона
- $\lambda' - \lambda = (h/m_0c)(1 - \cos\Theta)$ . (8)
- Величина  $h/m_0c$  называется *комптоновской длиной волны электрона*, ее численное значение равно  $h/m_0c = 2.4263096(15) \cdot 10^{-12}$  м. Это длина волны фотона с энергией, равной  $m_0c^2$  - энергии покоя электрона.

- Квантование **энергии** электромагнитной волны доказано ранее в опытах по [фотоэффекту](#). Но при фотоэффекте импульс фотона передается всему образцу металла и испущенному из него электрону. Импульс, приобретенный металлом в таких условиях, слишком мал и не поддается измерению. Эффект А.Комптона демонстрирует, что фотон обладает **импульсом**.
- А.Комптон не был бы настоящим ученым, если бы не задался вопросом, какие еще экспериментальные подтверждения можно найти приведенному выше объяснению смещения длины волны рассеянного излучения. Если обе части равенства (7) умножить на  $c$ , получим энергию рассеянного фотона
- $h\nu' = h\nu/[1 + (h\nu/moc^2)(1 - \cos\Theta)]$ . (9)
- Разность энергий первичного и рассеянного фотонов равна кинетической энергии электрона, который А.Комптон назвал "электроном отдачи",  $T_e = h\nu - h\nu'$ . На [снимках](#) в камере Вильсона по длине следов электронов измерялась их энергия. Экспериментальные значения оказались в хорошем согласии с расчетными.
- В 1927г. А.Комптон у присуждена нобелевская премия.



# Скорость света

- Скорость света в свободном пространстве (вакууме) – скорость распространения любых электромагнитных волн, в том числе и световых. Представляет собой предельную скорость распространения любых физических воздействий и инвариантна при переходе от одной системы отсчета к другой.

Скорость света в среде зависит от показателя преломления среды  $n$ , различного для разных частот  $\nu$  излучения:  $c'(\nu) = c/n(\nu)$ . Эта зависимость приводит к отличию групповой скорости от фазовой скорости света в среде, если речь идет не о монохроматическом свете (для скорости света в вакууме эти величины совпадают). Экспериментально определяя  $c'$ , всегда измеряют групповую скорость света.

Впервые скорость света определил в 1676 году О. К. Рёмер по изменению промежутков времени между затмениями спутников Юпитера. В 1728 году её установил Дж. Брайдей, исходя из своих наблюдений аберрации света звезд. В 1849 году А. И. Л. Физо первым измерил скорость света по времени прохождения светом точно известного расстояния (базы), так как показатель преломления воздуха очень мало отличается от 1, то наземные измерения дают величину весьма близкую к скорости.

- В опыте Физо пучок света от источника света S, отраженный полупрозрачным зеркалом 3, периодически прерывался вращающимся зубчатым диском 2, проходил базу 4-1 (около 8 км) и, отразившись от зеркала 1, возвращался к диску. Попадая на зубец, свет не достигал наблюдателя, а попавший в

промежуток между зубцами свет можно было наблюдать через окуляр 4. По известным скоростям вращения диска определялось время прохождения светом базы. Физо получил значение  $c = 313300$  км/с.

В 1862 году Ж. Б. Л. Фуко реализовал высказанную в 1838 году идею Д. Арго, применив вместо зубчатого диска быстровращающееся зеркало (512 оборотов в секунду). Отражаясь от зеркала пучок света направлялся на базу и по возвращении вновь попадал на то же зеркало, успевшее повернуться на некоторый малый угол. При базе всего 20 м Фуко нашёл, что скорость света равна  $298000\ 500$  км/с. Схемы и основные идеи методов Физо и Фуко были многократно использованы в последующих работах по определению скорости света.

- Определение скорости света методом вращающегося зеркала (Метод Фуко): S – источник света; R – быстровращающееся зеркало; C – неподвижное вогнутое зеркало, центр которого совпадает с осью вращения R (поэтому свет, отраженный C, всегда попадает обратно на R); M – полупрозрачное зеркало; L – объектив; E – окуляр; RC – точно измеренное расстояние (база). Пунктиром показаны положение R, изменившееся за время прохождения светом пути RC и обратно, и обратный ход пучка лучей через объектив L, который собирает отраженный пучок в точке S', а не в точке S, как это было бы при неподвижном зеркале R. Скорость света устанавливается, измеряя смещение SS'.

Полученное А. Майкельсоном в 1926 году значение  $c = 2997964$  км/с было тогда самым точным и вошло в интернациональные таблицы физических величин.

Измерение скорости света в 19 веке сыграли большую роль в физике, дополнительно подтвердив волновую теорию света. Выполненное Фуко в 1850 году сравнение скорости света одной и той же частоты в воздухе и воде показало, что скорость в воде  $u = c/n(n)$  в соответствии с предсказанием волновой теории. Была так же установлена связь оптики с теорией электромагнетизма: измеренная скорость света совпала со скоростью электромагнитных волн, вычисленной из отношения электромагнитных и электростатических единиц электрического заряда.

- В современных измерениях скорости света используется модернизированный метод Физо с заменой зубчатого колеса на интерференционный или какой-либо другой модулятор света, полностью прерывающий или ослабляющий световой пучок. Приемником излучения служит фотоэлемент или фотоэлектрический умножитель. Применение лазера в качестве источника света, УЗ – модулятора со стабилизированной частотой и повышение точности измерения длины базы позволит снизить погрешности измерений и получить значение  $c = 299792,50,15$  км/с. Помимо прямых измерения скорости света по времени прохождения известной базы, широко применяются косвенный методы, дающие большую точность.

Скорость света в вакууме принято считать  $2999792458$  1,2 м/с.

# Корпускулярно-волновой дуализм света. Спектр света.



# Корпускулярно-волновой дуализм



— это теория о том, что свет представляется на микроуровне одновременно и как мельчайшие частицы (корпускулы), и как волны.

Рис. 1

# **Развитие взглядов на природу света.**

Первые представления о природе света, возникшие у древних греков и египтян, в дальнейшем, по мере изобретения и усовершенствования различных оптических приборов, развивались и трансформировались.

# Средние века.

Количественный закон преломления света при прохождении границы раздела двух сред установил в **1620 г.** В. Снеллиус (Рис. 2).

Математическая запись этого закона принадлежит Р. Декарту (**1637 г.**)

Он же попытался объяснить этот закон исходя из корпускулярной теории.

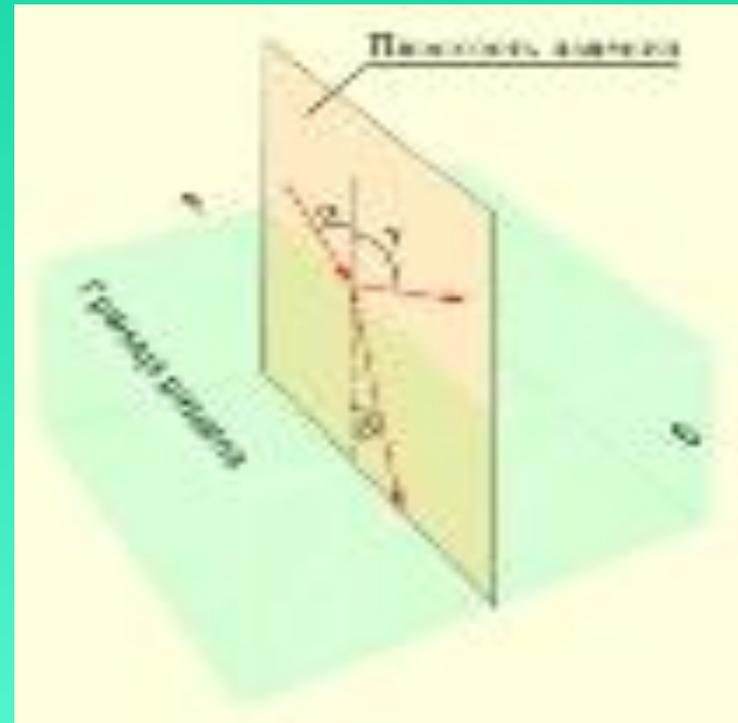
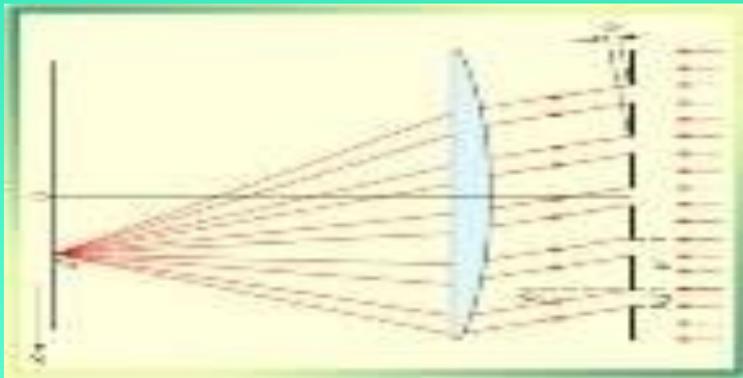


Рис. 2

# Средние века.



**Интерференция света**



**Дифракция света**

Дальнейшее развитие оптики связано с открытиями дифракции и интерференции света (Ф. Гримальди, 1665 г.), двойного лучепреломления (Э. Бартолин, 1669 г.) и с работами И. Ньютона, Р. Гука, Х. Гюйгенса.

# Конец XVII века.

на основе многовекового опыта и развития представлений о свете возникли две мощные теории света

корпускулярная теория  
(Ньютон – Декарт)

Волновая теория  
(Гук – Гюйгенс)

# Корпускулярная теория.

Свет – corpuscules, испускаемые телами и летящие с огромной скоростью. К анализу движения световых corpuscul Newton применил сформулированные им законы механики. Из этих представлений он легко вывел законы отражения и преломления света (рис. 5).

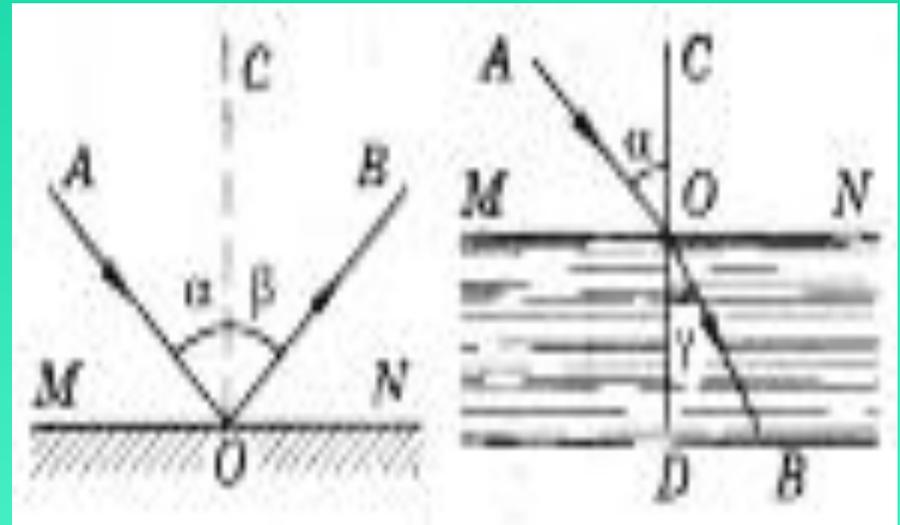


Рис. 5 Законы отражения и преломления света

# Корпускулярная теория.



Рис. 6

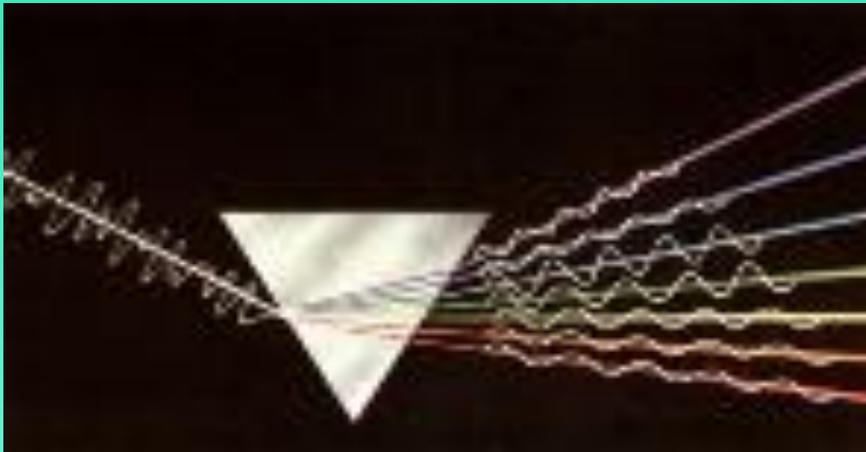


Рис. 7

В 1666 г. Ньютон показал, что белый свет является составным и содержит «чистые цвета», каждый из которых характеризуется своей преломляемостью (рис. 6, 7), т.е. дал понятие дисперсии света.

# Волновая теория.

В то же время в XVII в. развивалась противоположная, **волновая теория** Гука – Гюйгенса о том, что свет есть процесс распространения продольных деформаций в некоторой среде, пронизывающей все тело, – в мировом эфире.

# Недостатки теорий.

- Недостатки волновой теории:

Гюйгенс не смог объяснить физической причины наличия различных цветов и механизм изменения скорости распространения света в эфире, пронизывающем различные среды.

- Минусы корпускулярной теории:

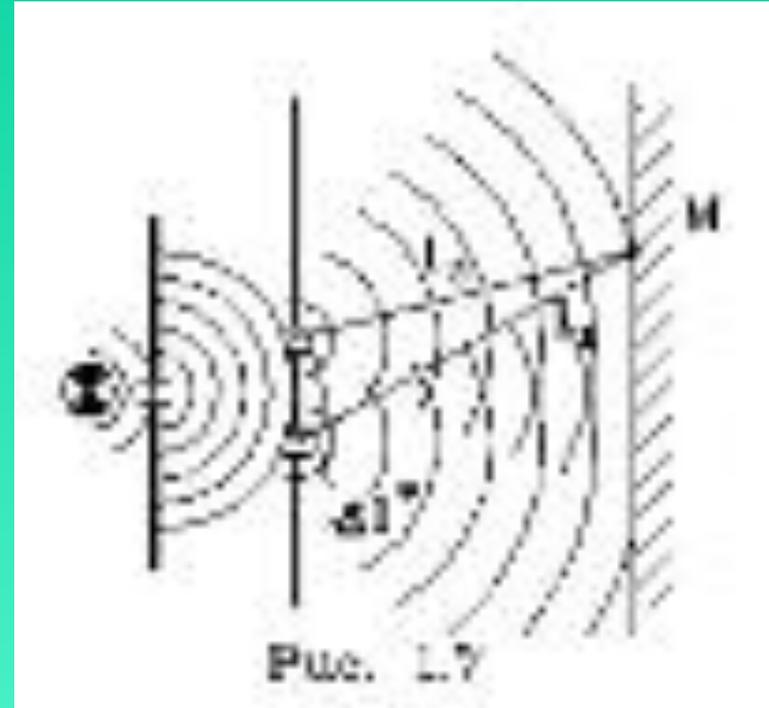
Ньютону трудно было объяснить, почему при падении на границу двух сред происходит частичное и отражение, и преломление, а также интерференцию и дисперсию света.

# XIX век.

Начало XIX в. характеризуется интенсивным развитием математической теории колебаний и волн и ее применением к объяснению ряда оптических явлений. В связи с работами Т. Юнга и О. Френеля победа временно перешла к волновой оптике.

# История ...

- **1801 г.** Т. Юнг формулирует принцип интерференции и объясняет цвета тонких пленок.
- **1818 г.** О. Френель объясняет явление дифракции.
- **1840 г.** О. Френель и Д. Арго исследуют интерференцию поляризованного света и доказывают поперечность световых колебаний.
- **1841 г.** О. Френель строит теорию кристаллооптических колебаний.

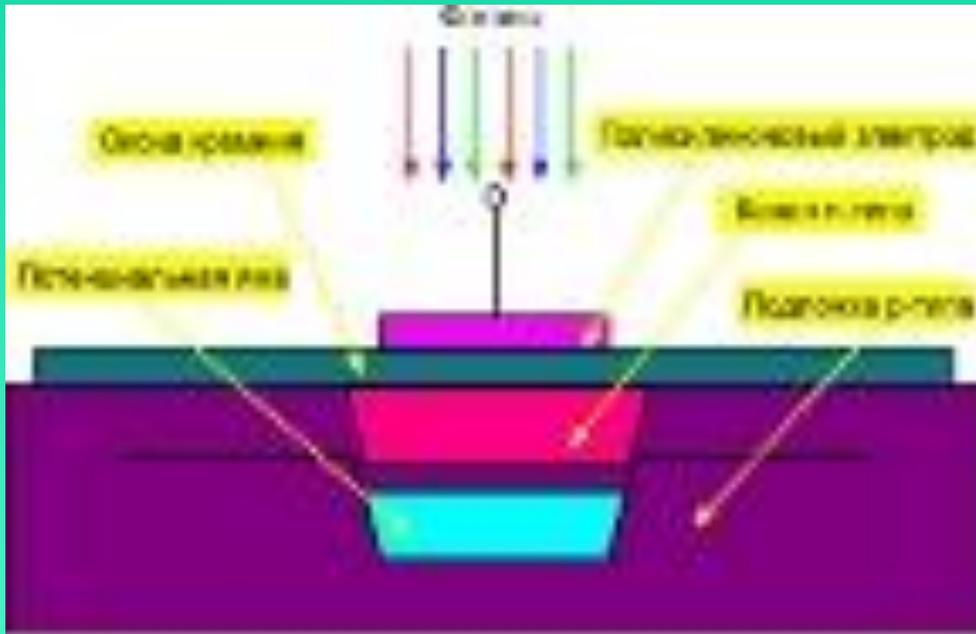


Интерференция света

# История ...

- **1849 г.** А. Физо измерил скорость света и рассчитал по волновой теории коэффициент преломления воды, что совпало с экспериментом.
  - **1848 г.** М. Фарадей открыл вращение плоскости поляризации света в магнитном поле (эффект Фарадея).
- **1860 г.** Дж. Максвелл, основываясь на открытии Фарадея, пришел к выводу, что свет есть электромагнитные волны, а не упругие.
  - **1888 г.** Г. Герц экспериментально подтвердил, что электромагнитное поле распространяется со скоростью света  $c$ .
  - **1899 г.** П.Н. Лебедев измерил давление света.

# Фотоэффект.

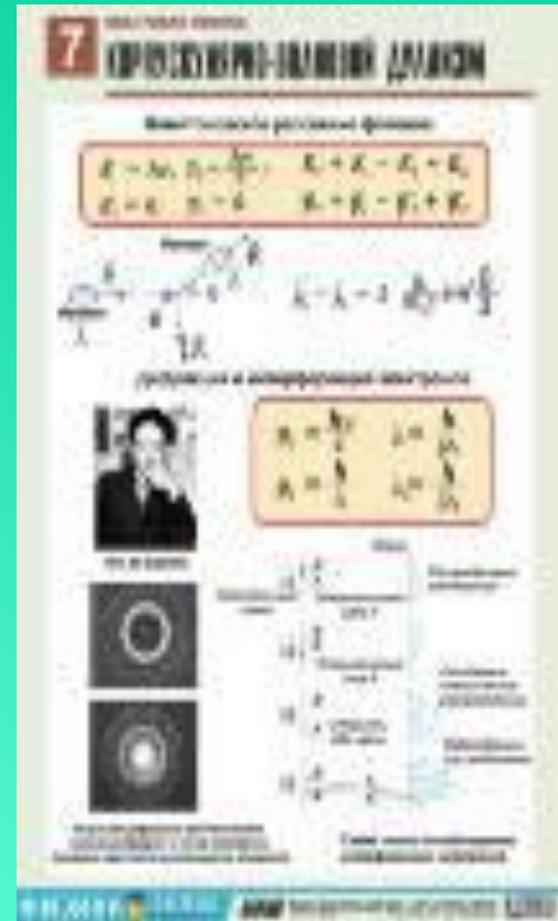


Явление фотоэффекта.

Волновая теория не смогла объяснить распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела и явление фотоэффекта, которое в **1890 г.** исследовал А.Г. Столетов.

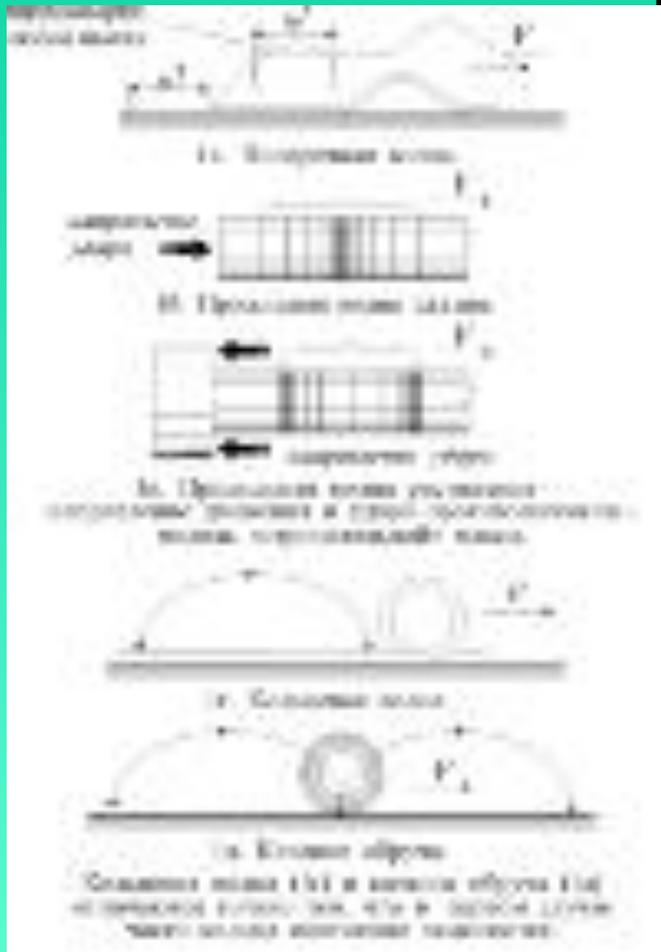
# Корпускулярно-волновой дуализм

Французский ученый Луи де Бройль (1892—1987), осознавая существующую в природе симметрию и развивая представления о двойственной корпускулярно-волновой природе света, выдвинул в 1923 г. гипотезу об универсальности корпускулярно-волнового дуализма.



# Корпускулярно-волновой дуализм.

Так как дифракционная картина исследовалась для потока электронов, то необходимо было доказать, что волновые свойства присущи каждому электрону в отдельности. Это удалось экспериментально подтвердить в 1948 г. советскому физику В. А. Фабриканту.



# Корпускулярно-волновой дуализм.

Современная трактовка корпускулярно-волнового дуализма может быть выражена словами физика **В. А. Фока** (1898—1974): «Можно сказать, что для атомного объекта существует потенциальная возможность проявлять себя, в зависимости от внешних условий, либо как волна, либо как частица, либо промежуточным образом».

# Спектр света.



Декарт еще в 1629 году выяснил ход лучей в призме и в стеклах различной формы. Он даже придумал механизмы для полировки стекол. Таким образом, уже тогда практическая оптика достигла значительной степени совершенства и была одной из наук, наиболее занимавших тогдашний ученый мир.

Рис. 12 Спектр света

# Спектр света.

В оптике спектральным разложением называют разложение белого света на монохроматические составляющие, а спектром-возникающую при этом цветную картину, в которой яркость цветов каждого участка зависит от интенсивности соответствующей составляющей.



Рис. 12 Спектр света

# Спектр света.

Открытие различной преломляемости лучей послужило исходным пунктом целого ряда научных открытий.

Дальнейшее развитие идеи Ньютона привело в новейшее время к открытию так называемого спектрального анализа

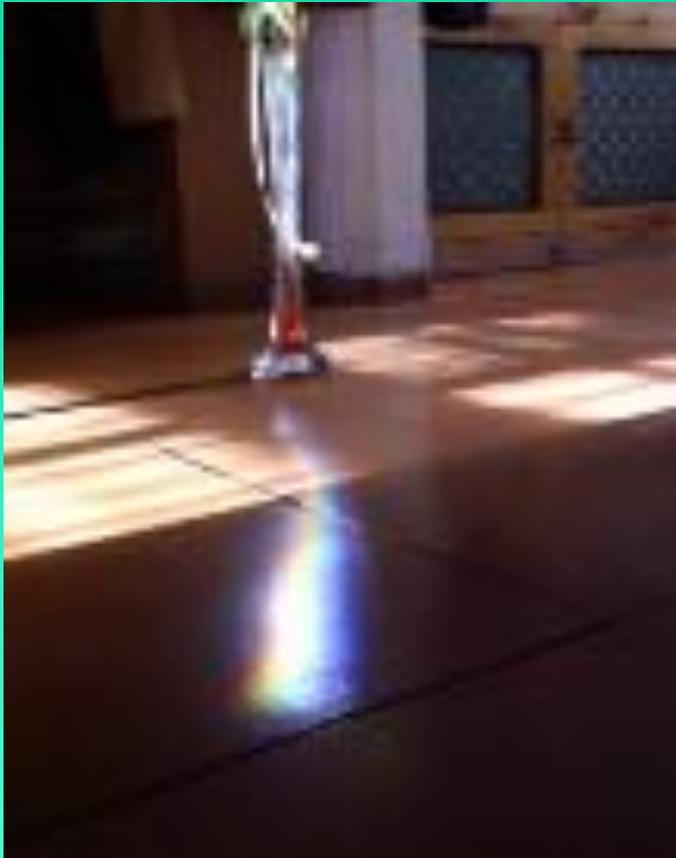


Рис. 12 Спектр света

# Заключение.

- Итак, обе теории – и волновая, и квантовая – одновременно развивались, имея свои несомненные достоинства и недостатки, и как бы дополняли друг друга. Ученые уже начали приходить к мнению, что свет является одновременно и волнами, и корпускулами.
- Таким образом, длительный путь исследований привел к современным представлениям о двойственной корпускулярно-волновой природе света.