

## Урок 1. Спектр

В этом модуле вы узнаете (или вспомните):

- Как человек воспринимает СВЕТ и ЦВЕТ
- Где находится видимый, то есть, световой, диапазон на частотном спектре,
- Как информация о цвете хранится в компьютере и почему она хранится именно так.

Из курса физики мы знаем про спектр электромагнитных колебаний

Механические колебания обычно измеряют частотой, а электромагнитные – длиной волны, хотя это и не жесткое правило.

Например, мы знаем радиодиапазоны: длинные, средние, короткие и ультракороткие волны, но радиостанции указывают свою частоту, а не длину волн. Хотя, в прошлом использовались именно длины волн – посмотрите [шкалу на старых радиоприёмниках](#).

Мы будем рассматривать спектр частот, а не какого-то из видов колебаний, то есть, не нужно думать, что, скажем, обманываясь веером очень быстро, вы можете начать светиться.

### КОЛЕБАНИЯ



#### Электро- магнитные



Распространяются в поле.  
Скорость околосветовая.

#### Механические



Распространяются в среде.  
Скорость околозвуковая.

1



Самый нижний диапазон от 0 до 16 Герц называется инфразвуком. Приставка "инфра" означает "ниже".

Например, это вибрация механизмов или отголоски землетрясений.

2



В телефонной связи используется диапазон от трёхсот до трёх тысяч четырёхсот Герц. Этого достаточно, чтобы передать голос и заодно отрезать помехи в низких и высоких частотах.

Благодаря тому, что по линиям связи передается усечённый спектр сигнала, становится возможным частотное уплотнение, когда по одному проводу передается несколько сигналов.

3



Частоты примерно с тридцати килогерц применимы для передачи сигнала в эфире – это длинные волны радиодиапазона. Они хорошо распространяются в воде и используются, например, для связи с подводными лодками.

Это всё ещё соответствует по частоте ультразвуковому диапазону, который «заканчивается» намного дальше, примерно в диапазоне средних волн радио.

За длинными, средними, короткими и ультракороткими волнами радиодиапазона начинается сверхвысокочастотный диапазон. Всё это составляющие радиодиапазона и у них тоже есть свои примечательные свойства.

4



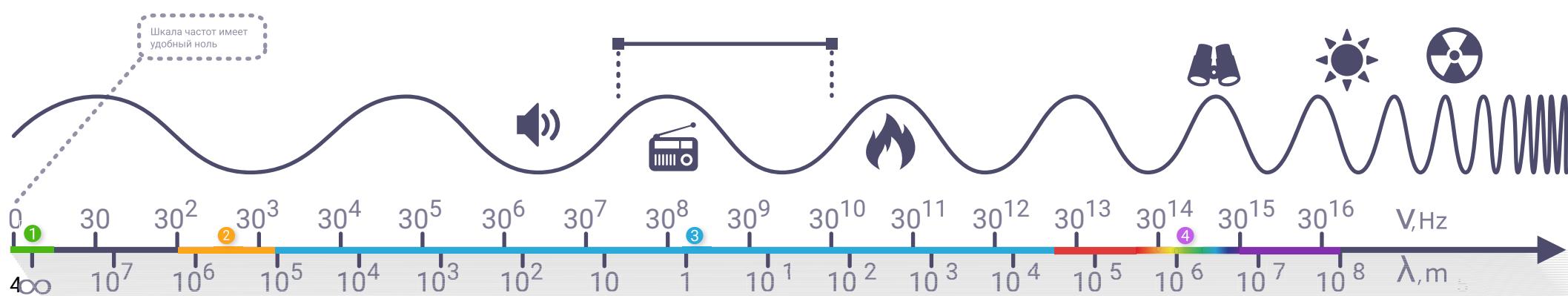
5  
каждый  
охотник  
желает  
знать  
где  
сидит  
фазан  
(стр 10)

За радиочастотами расположены оптические диапазоны: инфракрасный, видимый и ультрафиолетовый.

Сами названия этих диапазонов говорят за себя: инфракрасный – это ниже красного, видимый – тут все понятно, он для человека видимый, ультрафиолетовый – это выше фиолетового.

Очевидно, видимый диапазон начинается красным и заканчивается фиолетовым, раз соседние диапазоны имеют такие названия.

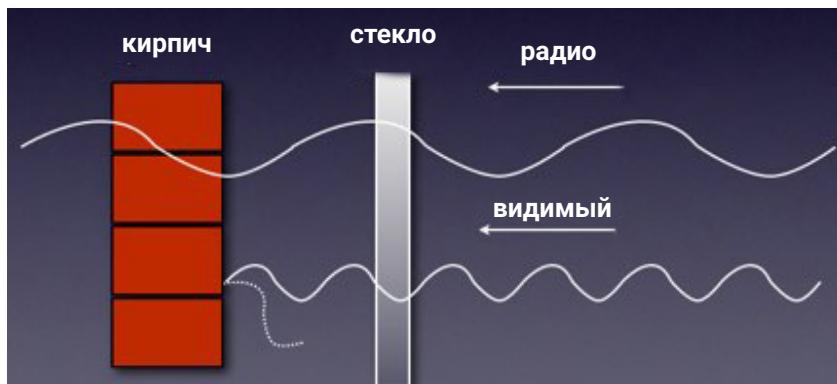
На этом спектре не заканчивается, дальше идут рентгеновский диапазон и гамма-излучение но нас более всего интересует видимый диапазон, поэтому здесь и остановимся.



Если представить сигнал в виде определенного спектра частот, в котором можно пожертвовать какой-то частью, то такой сигнал можно упаковать довольно плотно. Вроде бы, причем тут компьютерная графика? Дальше мы увидим, как это применяется.

## Прозрачность

Свойство прозрачности определенной среды зависит от длины волны того излучения, для которого мы определяем это свойство.

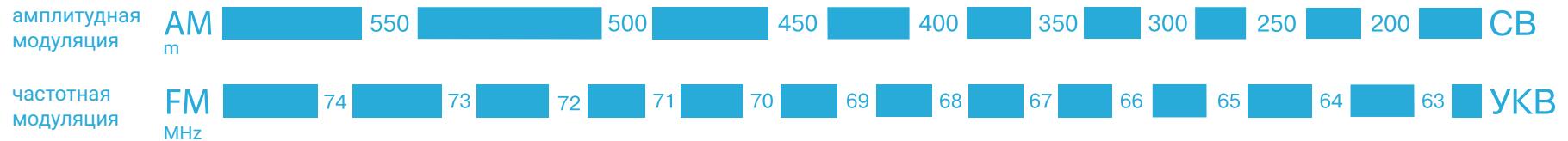


Ясное, то есть, прозрачное для видимого света, небо преимущественно непрозрачно для солнечного ультрафиолетового излучения, в противном случае жизнь на Земле была бы невозможна.

$$E = h \cdot v$$



Поэтому, если вы сидите в комнате или в транспорте на солнцепеке за закрытым окном и утешаете себя мыслью, что хотя бы позагораете, то вынужден вас огорчить – ничего, кроме дискомфорта, вы не получите, пока не откроете окно.



## Радиодиапазон

Чтобы передать голос, частоты звукового диапазона от двадцати Герц до двадцати килогерц нужно перенести в радиодиапазон.

Допустим, для средних волн на частоте два мегагерца, и для ультракоротких волн на частоте сто мегагерц. В обоих случаях мы можем поступить следующим образом: пустить несущую частоту, соответственно, два или сто мегагерц, и модулировать её уровнем сигнала.

Что здесь значит «модулировать уровнем сигнала»? Это значит, что там, где больше амплитуда голосового сигнала, будет и больше амплитуда несущей, частота же останется неизменной. Важно, что частота несущей должна быть больше частоты модулируемого сигнала. Потом на приёмнике восстановить сигнал не составит труда. Только при такой передаче все помехи в эфире будут наши – излучения на близких частотах будут легко вмешиваться в наш сигнал.

При частотной модуляции все начинается так же: берется несущая частота, берется исходный голосовой сигнал, но меняется не амплитуда несущей частоты, а ее частота. Амплитуда как раз остается неизменной.

Это уже более сложный способ кодирования сигнала, но он и более устойчив к помехам.

Одна беда – его не получится применить к передачам в низкочастотном диапазоне – потребуется занимать достаточно широкий диапазон частот для одной передачи.

С другой стороны, ультракороткие волны, которые хорошо подходят для частотной модуляции сигнала, поскольку частота там высокая, не способны «заглядывать» за препятствия. Они могут отражаться, но не могут огибать землю.

Отсюда и ограничение УКВ связи – это связь прямой видимости. Если на пути до приемника растет ёлка, это не так страшно, она не будет серьезным препятствием для радиосигнала, но горы, бетонные дома и изгиб земной поверхности гасят сигнал.

Поэтому эфирные телевизионные и радиостанции в этом диапазоне всегда вещают в очень ограниченном радиусе, как правило, в пределах города, дальше используется сеть ретрансляторов.

Так работает эфирное телевидение, к которому мы еще не раз вернемся в следующих уроках.

## Урок 2. Цвет

В этом уроке мы сосредоточимся на видимом диапазоне спектра: он располагается между инфракрасным и ультрафиолетовым. Названия соседних диапазонов подсказывают нам крайние цвета спектра видимого излучения, а как расположены промежуточные, мы помним с детства по последовательности цветов в радуге (стр. 5)

Радуга – это природное явление, когда мы видим разложение солнечного света в спектр.

Разумеется, человек тоже интересовался, как можно обуздать свет и цвет, как получить нужный оттенок и как измерить уже полученный. Несмотря на то, что художники умели получать и смешивать цвета с незапамятных времён, на научную основу работа с цветом была поставлена сравнительно недавно – в семнадцатом веке, до этого о цвете рассуждали более философски: «видимое при свете есть цвет».

Например, авторитетной для своего времени была теория Аристотеля и некоторые более поздние теории.



Линейная последовательность цветов Аристотеля

В постановке работы с цветом на научные по нашим представлениям рельсы преуспели пресловутые «британские учёные». Вы их, безусловно знаете ещё со школы, и первым здесь стоит вспомнить Исаака Ньютона.

В 1672 году Ньютон провел опыт с разложением солнечного света на составляющие цвета при помощи стеклянной призмы.

Как позже выяснилось, разложение белого света в спектр при помощи призмы – это проявление дисперсии волн.

Есть три связанные характеристики волны:

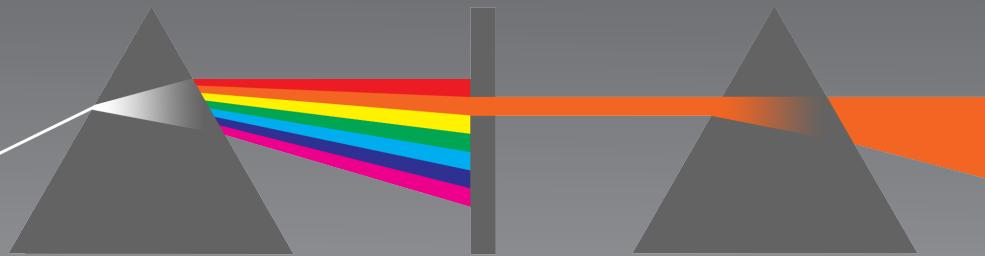
- частота,  $v$
- энергия излучения,  $E$
- длина волны,  $\lambda$ .



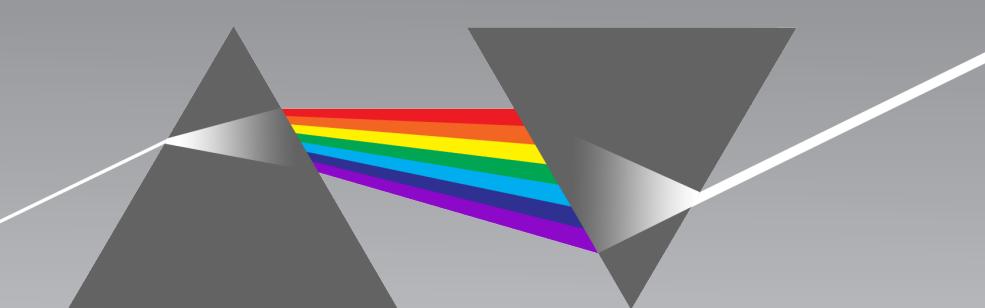
Таким образом, пропустив солнечный свет через призму, удалось показать, что он состоит из волн разной длины.

При разложении солнечного света в спектр, получаются те же цвета, что и в радуге, поэтому спектральные цвета ещё называют радужными

Если при помощи узкой щели выделить один цвет и повторно пропустить его через такую же призму, на экране будет только этот цвет.



Каждой частоте видимого диапазона спектра соответствует определенный цвет.



Ньютона, разобрав солнечный свет на составляющие, смог собрать его обратно – просто пропустив через перевернутую вторую призму все полученные при разложении цвета.

Но самое интересное для нас в опытах Ньютона состоит в следующем: Если взять два спектральных цвета и сложить лучи, то получим промежуточный цвет в спектре.

Ощущение, которое наш глаз получает от излучения одной частоты, можно получить от суммы излучений других частот того же диапазона.



Причем, если менять соотношение яркостей лучей, то результирующий цвет будет смещаться по спектру в сторону более яркого.

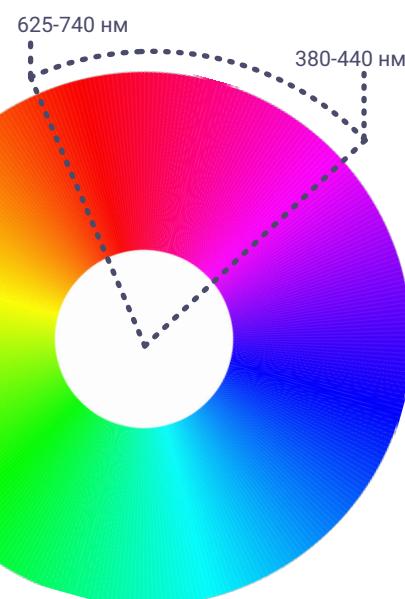
А теперь проверим теорию более сложным случаем. Пока мы выбирали цвета где-то в середине спектра, всё было хорошо. А теперь возьмём крайние – фиолетовый и красный, – и сложим их...

После предыдущего эксперимента мы ожидали появления цвета из середины спектра.

Но получился пурпурный – этого цвета вообще нет в спектре, зато он является переходным между крайними спектральными цветами, замыкая их.



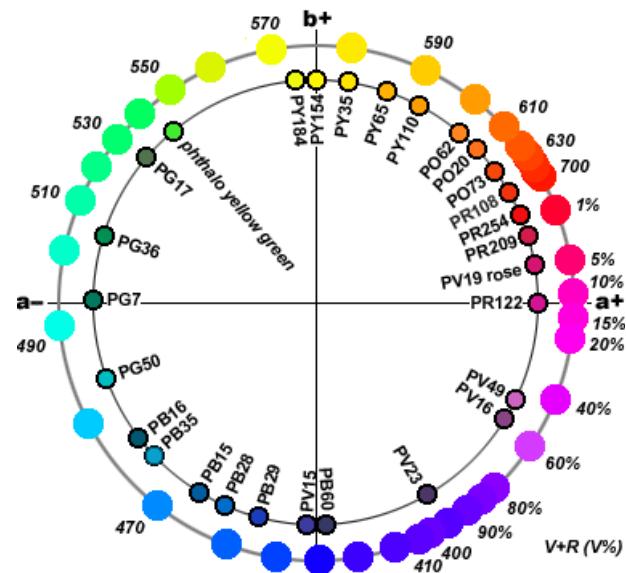
Цветовой круг, правильнее – окружность, позволяет наглядно показать закономерности в расположении цветов, а так же измерить цвет, точнее, его оттенок.



Отмеченный сектор показывает неспектральные цвета, промежуточные между красным и фиолетовым.

Это представление цвета легло в основу цветовых моделей, применяемых при обработке фотоизображений.

Можно встретить образцы цветового круга, в которых за основные цвета взяты красный, зеленый и синий, а можно и такие, где взяты красный, желтый и синий. Цвета в спектре имеют однозначное соответствие частотам. Получается, что где-то шкала идет по окружности неравномерно.

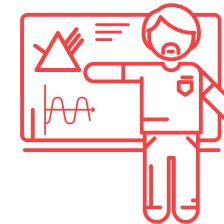


На современном цветовом круге подписаны длины волн в спектральной части и проценты сектора неспектральных цветов от красного до фиолетового.

Присмотримся к значениям длин волн: они неравномерны. Они были неравномерны и на круге Ньютона. Запомним этот факт и не будем удивляться, почему в различных представлениях на, казалось бы, одинаковом спектре на равных расстояниях оказываются разные цвета.



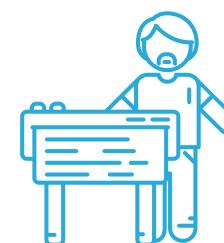
Посмотрите на цветовой круг и разделите его пополам, чтобы при этом половины имели ясное для человека противоположные свойства.



## Физик: аддитивный синтез, смешение лучей



**Художник:** субтрактивный синтез,  
смешение красок



Печатник:  
субтрактивный синтез,  
растрирование

## Синтез цвета

#### ⑥ Аддитивный: сложение яркости лучей.

7 Субтрактивный: вычитание яркости отражения света от поверхности нанесением слоёв пигмента

Работать с бесконечным количеством оттенков неудобно: чтобы синтезировать цвет, удобнее иметь ограниченное, даже правильнее сказать – минимальное, число основных цветов, которые дали бы все множество оттенков.

Как мы определяем цвет поверхности того или иного предмета? От поверхности отражаются лучи определённого цвета (или комбинации цветов) – остальные поглощаются.



Понятно, как создать цвет из спектра.  
А как получить чёрный и белый?

<b>белый</b>	осветить экран всеми доступными лучами  оставить холст чистым
<b>чёрный</b>	не пропускать свет  нанести как можно больше разных красок

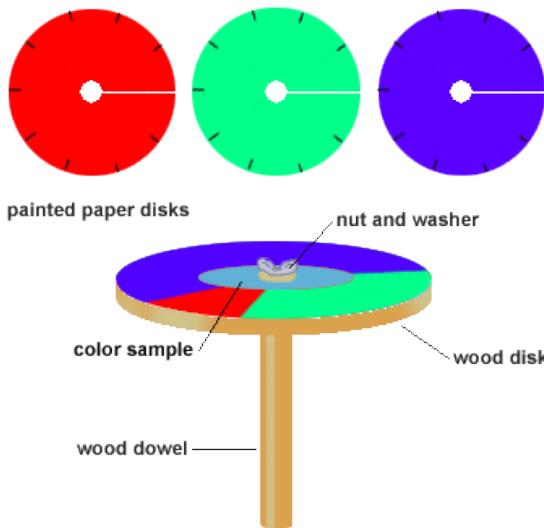
<b>основные цвета</b>		
<b>способ получения</b>		
<b>применение</b>		
<b>цветовой охват</b>		



Первым, кто предложил способ количественного измерения цвета и обосновал триаду RGB (и несостоительность RYB) для лучей света был Джеймс Максвелл

## Волчок Максвелла

Используя эти ОСНОВНЫЕ цвета в разных пропорциях, Максвелл получал тот или иной оттенок и сравнивал его с образцом.

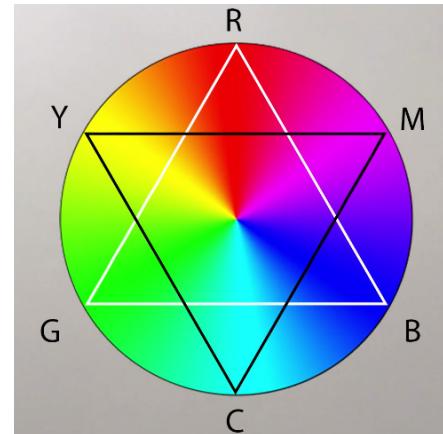


Таким образом, получив визуальное соответствие между образцом и созданным оттенком, можно выразить цвет образца значениями интенсивности основных цветов – красного, зеленого и синего.



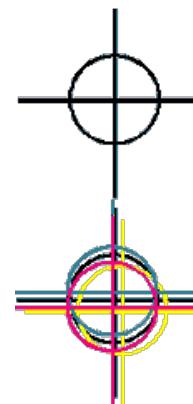
Фактически, он создал цветовую модель, применяющуюся в фотографии. И даже продемонстрировал её на примере первого цветного фотоиспомка, правда, сфотографироваться в цвете не успел.

## Цвет в полиграфии



При работе со светом, то есть, **лучами**, используются цвета, которые воспринимает наш глаз.

А при работе с цветом, то есть **пигментом**, используются обратные цвета цветового круга: голубой, пурпурный, желтый.



Откуда черная краска в триаде CMY?

1. Черный цвет – самый контрастный для белой бумаги и текст печатают обычно им. Нет нужды тратить дорогие цветные краски, когда есть дешевая черная.
2. Попасть строго в одно место тремя красками сложно. Мелкие элементы (а весь текст из них и состоит) будут расплыватьсь, если печатать их составным цветом.



Ещё Генри Форд заметил, что чёрная краска сохнет быстрее и стоит меньше, поэтому его первые автомобили были исключительно чёрного цвета. Это справедливо и сейчас – чёрная краска и дешевле и быстрее сохнет.



«Цвет автомобиля может быть любым при условии, что он чёрный» – Генри Форд.

Когда мы говорим о цвете, то что мы имеем в виду?  
Существует четыре вида света: излучённый, отражённый, зрительный и осознанный. Рассмотрим каждый из них:



Каждый из нас наверняка хоть раз фотографировал закат. Цвет неба, который нас так восхищает – это результат прохождения лучей солнца через земную атмосферу.

То есть, это некий набор волн, пусть несколько отфильтрованный, но по сути это излучение в определенном диапазоне спектра видимого света.

Ключевое слово – излучение. Носителем цвета здесь является сам свет.



Мы фотографируем то, что производит на нас впечатление, которое мы получаем по визуальному каналу – посредством зрения.

Если выражаться техническими терминами, то глаза – это датчики, изображение – это сигнал.

Итак, здесь мы говорим о цвете, как комбинации сигналов, зарегистрированных глазом.

Это уже не характеристика объективно существующего излучения, а результат его преобразования.



Важным фактором для восприятия изображения является опыт. Существует легенда, что индейцы Америки, увидев прибывших европейцев, сочли, что те вышли из воды, так как никогда раньше не видели кораблей.



Сделав фотографию, мы редактируем её. Корректируя цветопередачу, мы опираемся на то, что видели, когда фотографировали, то есть, подгоняем изображение на мониторе компьютера под свои воспоминания.

Если мы отправим этот кадр тем, кто видел тот же закат, то они будут сравнивать уже изображение на *своих* мониторах со своими воспоминаниями.

Цвет в этом случае – продукт нашего восприятия. Носителем цвета является сознание.



Мы до сих пор любовались закатом напрямую: фотографировали его и редактировали на компьютере – все это была работа с лучами света, откуда бы они ни исходили.

Напечатав фотографию, мы увидим результат отражения света от бумаги, покрытой красками.

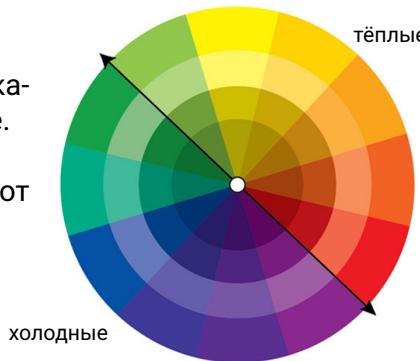
Здесь мы имеем дело с **материалным** цветом. То есть, здесь носителем цвета является пигмент – та краска, которой напечатано изображение.

## Урок 3. Температура цвета.

Говоря о цветовом круге, мы часто делим цвета на «тёплые» и «холодные». Здесь проявляются некоторые интересные свойства.

Например, теплые цвета кажутся ближе, чем холодные.

Есть объяснение, откуда этот эффект в нашем сознании:



Атмосфера имеет голубоватый оттенок.

Точнее, она рассеивает солнечное излучение в высокочастотной части спектра и оттого небо светится холодным голубым светом.



Объяснение могло бы быть в оптический эффекте, который называется хроматическими аберрациями.

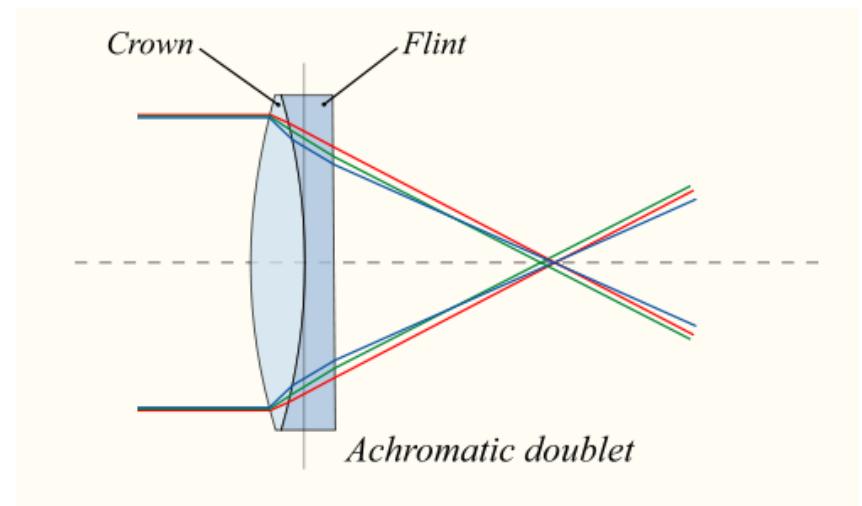
Любители фотографии хорошо знакомы с цветным ореолом на контурах объектов, особенно при длиннофокусной съемке.



Эффект имеет много общего с экспериментом Ньютона. [стр 11](#)

Луч, попадая в линзу, преломляется, но разные его частоты преломляются по-разному, и получается, что чем выше частота, тем ближе она фокусируется.

В фототехнике на этот случай есть ахроматические линзы – они отчасти исправляют это смещение, правда, лишь отчасти.



Но глаз обходится лишь одной линзой – хрусталиком. И исправлять этот эффект там нечему.

Другой подход к измерению температуры цвета – из физики.



Мы рассматриваем свет как излучение в видимом диапазоне. Раз так, давайте вспомним, откуда берется излучение.

Уильям Томпсон, более известный как лорд Кельвин, доказал, что при температуре минус двести семьдесят три градуса по Цельсию движение молекул вещества прекращается.

Это температура, при которой не происходит никакого излучения, то есть, абсолютный ноль. Хорошая новость заключается в том, что при температурах выше абсолютного нуля любое вещество излучает.

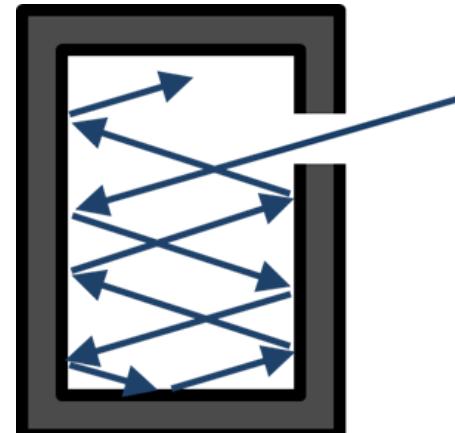
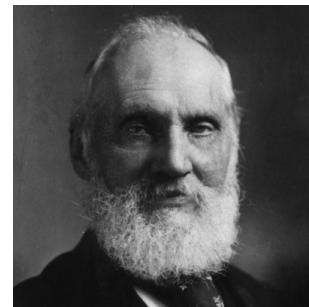


Представьте себе, лёд, имея отрицательную по привычной нам шкале Цельсия температуру, имеет тепловое излучение.

В физике и близких науках температуру принято измерять в Кельвинах. У спектральных цветов тоже есть своя температура, но относительно тёплых и холодных цветов из круга – в обратную сторону.

Цветовая температура – это температура абсолютно чёрного тела, при которой оно испускает излучение того же цветового тона, что и рассматриваемое излучение.

Абсолютно чёрное тело – это объект, который поглощает всё падающее на него излучение без отражения.



Вернемся к температуре цвета. В качестве объекта, который будет светиться, представим себе нить накала электрической лампочки.

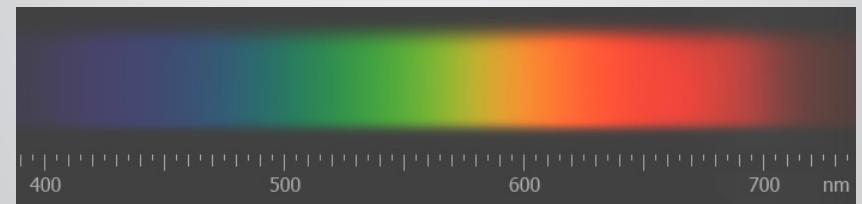
По мере того, как мы нагреваем нить, она излучает всё сильнее. С какого-то момента она начинает излучать в видимом диапазоне.



Наименьшей энергией обладает красный цвет, с него и начинается видимое излучение.

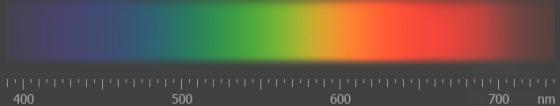
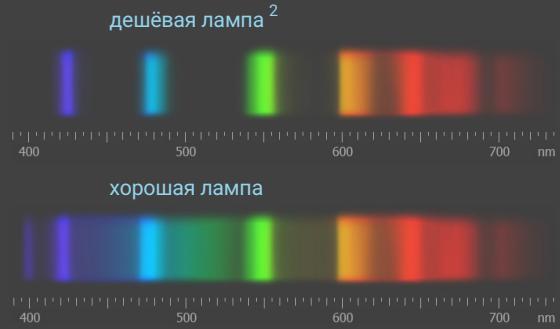
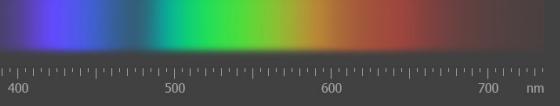
Чем больше мы увеличиваем температуру нити, тем больше будет энергия излучения и, соответственно, тем дальше будет смещаться цвет излучения по спектру в сторону высоких энергий.

Идеальное же абсолютно чёрное тело должно продолжить движение вверх по спектру по мере увеличения температуры, остановившись в синей области примерно на длине волны 470 нанометров.



Излучение не достигает фиолетовой части спектра, как видно на этой иллюстрации.

В реальной жизни все ещё интереснее: разные лампы имеют разный спектр свечения. Рассмотрим их свойства подробнее.

	получение свечения	излучение тепла	спектр излучения	искажение цвета
 лампа накаливания (Ильича)	Раскаляется вольфрамовая спираль	Мощное тепловое излучение за счёт нагревания нити	 400 500 600 700 nm	Даёт жёлтый оттенок (тёплый цвет)
 энерго-сберегающая лампа	Светится люминофор	Незначительное тепловое излучение	 400 500 600 700 nm дешёвая лампа <sup>2</sup> хорошая лампа	Искажение цвета в дешёвых лампах <sup>2</sup>
 свето-диодная лампа	Свет излучается диодом <sup>3</sup>	Тепловое излучение минимальное	 400 500 600 700 nm	Может излучать необходимые частоты. Не искажает цвета.

<sup>1</sup> Люминофор – специальное покрытие, которое переизлучает энергию в видимом спектре. От типа люминофора зависит, какого спектрального состава будет свет.

 Люминофор использовался в трубках в телевизорах. Там он изначально имел голубоватый оттенок, отчего старые ч-б телевизоры называли "голубым экраном", а новогоднюю телепередачу – голубым огоньком.

<sup>2</sup> Дешевые лампы используют люминофор, который имеет основное излучение в синих и жёлтых областях спектра, а в красной и зелёной менее интенсивен. Глаз воспринимает этот свет как белый, но в отражении он искажает цвета.

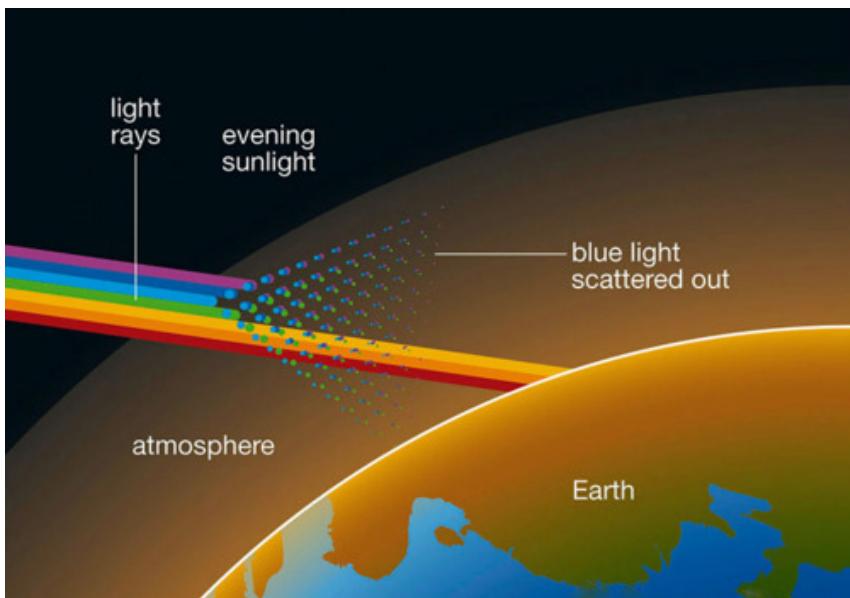
<sup>3</sup> Диод – полупроводниковый прибор с одним р-п переходом. От состава полупроводников зависит частота излучаемого света. Но важно, что спектр излучения будет очень узким.

## Баланс белого

Если включить днем в комнате свет и сравнить его с уличным, то мы увидим, что обычно уличный свет отдаёт в синеву, а комнатный – в желтизну. Как мы теперь понимаем, это разная температура цвета.

В лучах заката свет часто становится оранжевым и даже красным. Это объясняется тем, что, находясь в зените, солнце испускает лучи под максимальным углом к поверхности Земли, а следовательно – и к атмосфере.

На закате солнечные лучи проходят по касательной к поверхности Земли и преодолевают значительно большее расстояние в атмосфере, там рассеивается значительно больше синей и даже зеленой составляющей спектра, оставляя нам красное закатное солнце и окружающее его небо.



Если мы попробуем сфотографировать закатное небо из окна дома, на улице и при свете фонарей, зафиксировав настройки камеры, то получим странные по цвету кадры, это результат нарушения **баланса белого**.

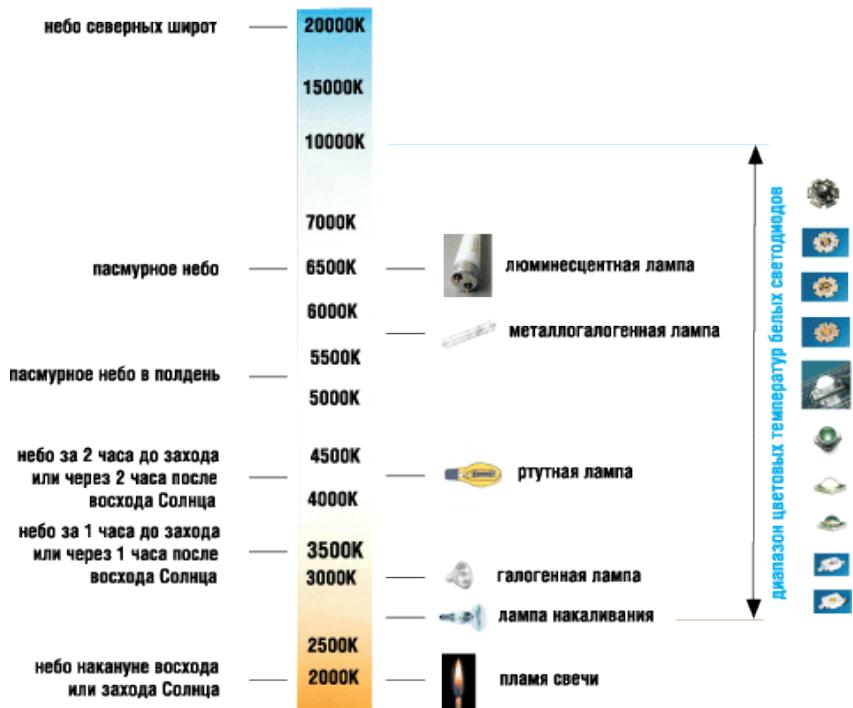


**Баланс белого** – смещение цветовых составляющих, чтобы объект заведомо белого цвета выглядел белым вне зависимости от цветовой гаммы источника света.

У человеческого зрения есть свойство цветопостоянства. Это значит, что белый лист при любом свете будет казаться нам белым, так как мозг обрабатывает изображение, корректируя цветовые составляющие. Примерно тем же приходится заниматься фотоаппарату, если установлен режим автоматического баланса белого. Отсюда и основные режимы предустановок: теперь вы понимаете, почему отличаются настройки солнечного дня и облачной погоды.

<b>AWB</b>	AUTO
	DAYLIGHT
	CLOUDY
	SHADE
	TUNGSTEN
	FLUORESCENT
	FLASH
	CUSTOM

Подытоживая тему температуры цвета и баланса белого, предлагаем взглянуть на иллюстрацию на следующем шаге, там можно увидеть типовые источники света и их цветовые температуры.



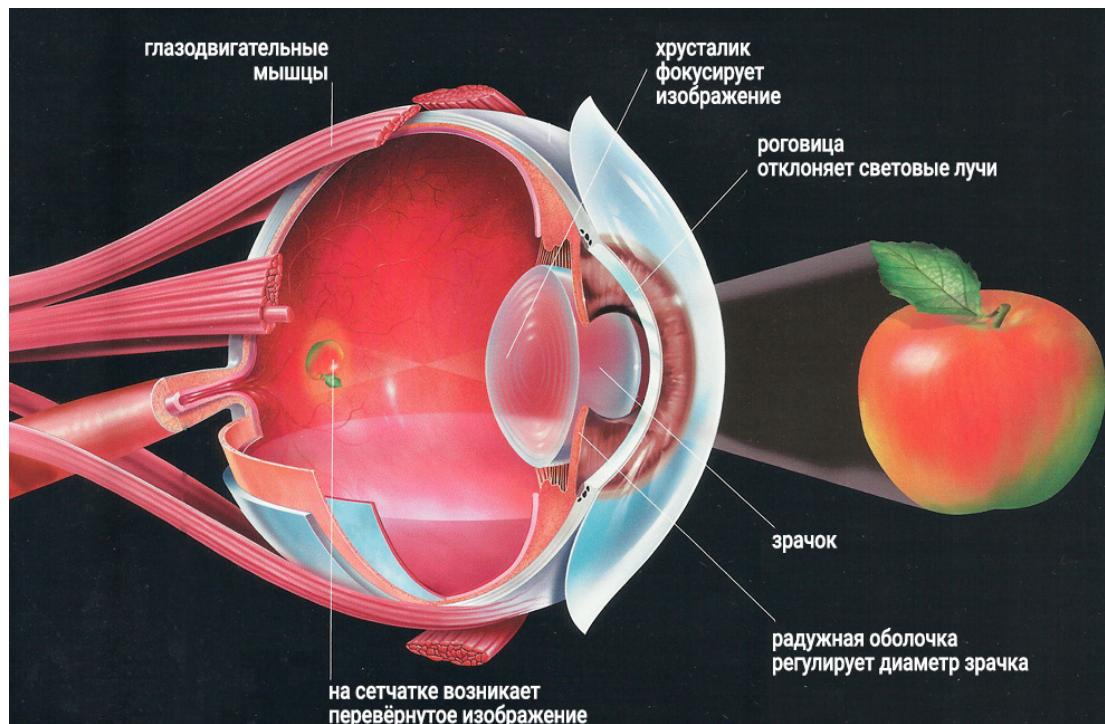
## Урок 4. Цветовосприятие.

### Устройство глаза

Определим, что такое цвет. Мы уже измерили его температуру, посчитали частоту, но к зрительным ощущениям это не близко. Цвет – качественная субъективная характеристика электромагнитного излучения оптического диапазона, определяемая на основании возникающего физиологического зрительного ощущения.

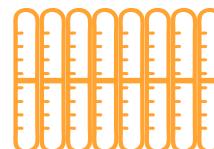
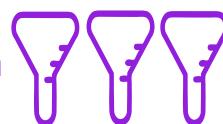
То есть, наши представления о цвете – это ощущения от увиденного. Значит, следует вспомнить, как устроен человеческий глаз.

Оптическая система глаза – это хрусталик, выполняющий роль системы линз объектива и радужка, выполняющая роль диафрагмы в объективе. Через неё свет попадает на сетчатку, аналогом которой в цифровой фотокамере является матрица.



Сетчатка содержит рецепторы двух видов:

колбочки

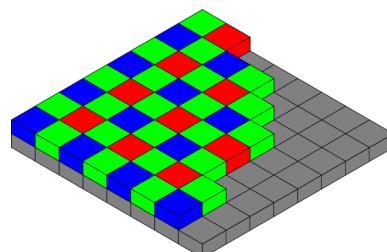


палочки.

Как уже было сказано, сетчатка глаза выполняет роль матрицы в объективе. Рассмотрим их сходства и отличия.

### 1. Пиксели

Матрица оперирует пикселями и сетчатка, в каком-то смысле, тоже. То есть, существуют точечные рецепторы, которые передают в мозг сигнал о регистрации в данном месте излучения одной из трёх частот, соответствующих красному, зеленому или синему цветам.



### 2. Датчики света.

Здесь начинаются отличия. В кремниевой матрице все датчики одинаковые, но ситуация с сетчаткой немного сложнее.



Считается, что рецепторы-колбочки отвечают за цветное зрение и делятся на три неравные группы.

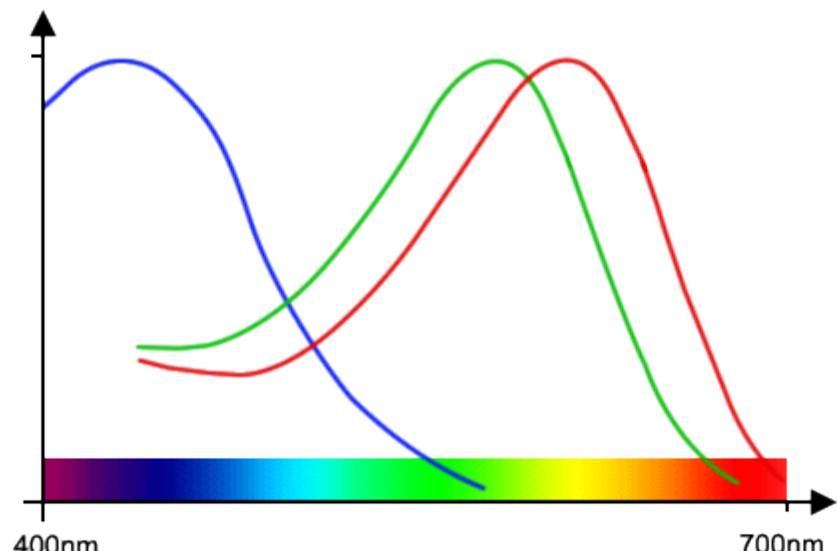
Колбочки, воспринимающие длинные волны спектра (L)  
условно – красный цвет



Колбочки, воспринимающие средние волны спектра (M)  
условно – зелёный цвет



Колбочки, воспринимающие короткие волны спектра (S)  
условно – синий цвет



На диаграмме чувствительности колбочек видно, что они имеют максимум чувствительности в трех частях спектра, соответствующих красному, зеленому и синему цветам, хотя реагируют и на другие частоты. В противном случае мы бы не видели излучение промежуточных частот.

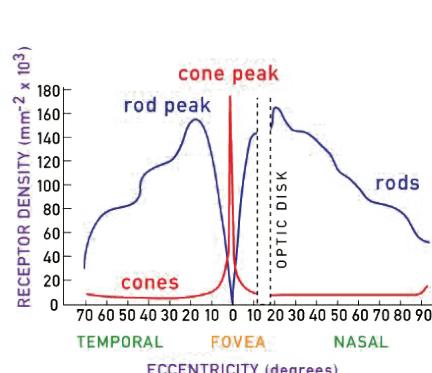


Палочки отвечают за сумеречное и периферийное зрение. Они не так чувствительны к цвету и предназначены для того, чтобы замечать происходящее вне зависимости от освещения.

Периферийное зрение имеет более низкую детализацию – несколько рецепторов могут находиться на одном канале в мозг.



Сетчатка неоднородна и по плотности расположения палочек и колбочек, и даже по расположению колбочек разной спектральной чувствительности.



На рисунке вы видите сетчатку и основные её зоны: так называемая ямка, где концентрация колбочек максимальна, а так же слепое пятно – это место выхода зрительного нерва, там нет чувствительных элементов, и видно, что есть довольно большая зона периферийного зрения.

 Слепое пятно – любопытная штука. Представьте себе, в поле вашего зрения есть довольно заметная слепая область. Даже две – по одной в левом и правом глазу.



Вперёд, смотреть на слепое пятно!

Тот факт, что мы не замечаем слепое пятно в обычной жизни, говорит о том, что мозг ретуширует для нас это место, домысливая недостающее.

Поскольку оно находится на периферии, то основное внимание у нас всегда сосредоточено в другой области и ретушь проходит для нас незаметно.

## Спектральная чувствительность глаза

Вернемся к диаграмме со спектральной чувствительностью колбочек [стр 33](#). Можно заметить, что пики чувствительности распределены довольно странно: красный почти совпадает с зелёным, а синий где-то вдалеке.

Добавим к этому также разное количество колбочек:

- 63% L
- 31% M
- 6% S.

К тому же, рецепторы неравномерно расположены (коротковолновые, например, преимущественно на периферии)

Важное обстоятельство мы уже упоминали ранее -- это хроматические aberrации.

Обратите внимание, что красная и зеленая зоны находятся очень близко на спектре, то есть, длины волн у них близкие. И это 94% всех рецепторов. Отдельно стоящие на спектре синие рецепторы, хоть и чувствительны, но составляют пренебрежимо малое число.

- Если представить ход луча, то видно, что синяя составляющая будет фокусироваться ближе, чем красная. Но если фокусировать глаз по красной и зеленой составляющим, то можно пренебречь синей.
- В отличие от матрицы фотокамеры, сетчатка имеет сферическую форму и это сглаживает эффект хроматических aberrаций по периферии.
- Глаз фильтрует высокочастотную составляющую, поскольку она небезопасна. Излучение ниже 470 нм существенно гасится уже в глазу.

- Мало того, что коротковолновых синих рецепторов в глазу совсем мало, так они ещё и расположены преимущественно по периферии. Это помогает избежать расфокусировки в зоне основного внимания.

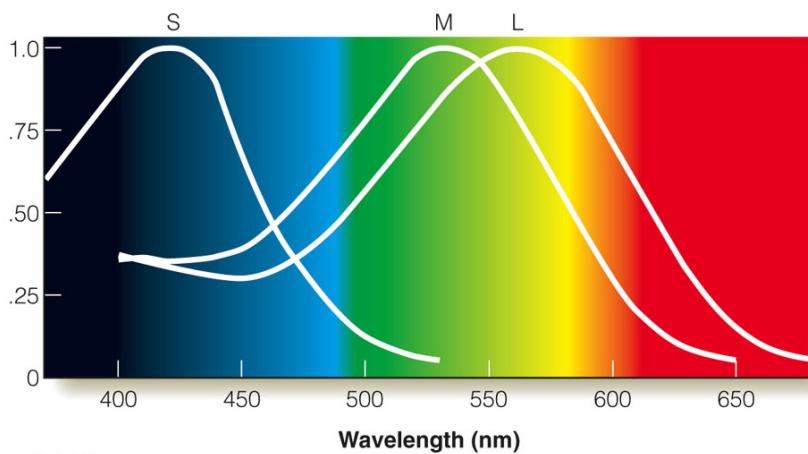
И, наконец, мы пришли к важной особенности нашего зрения: несмотря на то, что зрение у нас основывается преимущественно на трех цветах, мозг работает с визуальной информацией в другом формате – отдельно цвет, отдельно свет.

## Теории цветоощущения

Теории цветоощущения сформировались после того, как стали общепринятыми идеи о трех базовых цветах.

Рассмотрим две теории, которые вместе объясняют процесс цветного зрения.

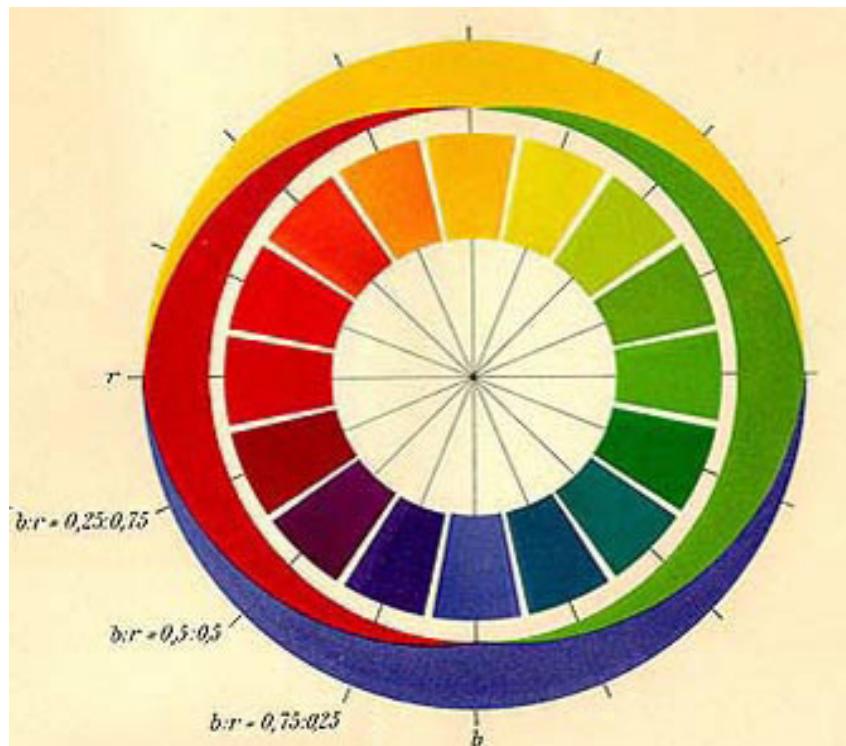
Трехкомпонентная теория цветоощущения была предложена в разное время разными учеными. Здесь и Михаил Ломоносов, и Джордж Палмер и Томас Юнг, и, наконец, Герман фон Гельмгольц. Именно Гельмгольц предложил теорию о трех пересекающихся диапазонах чувствительности. [стр 33](#)



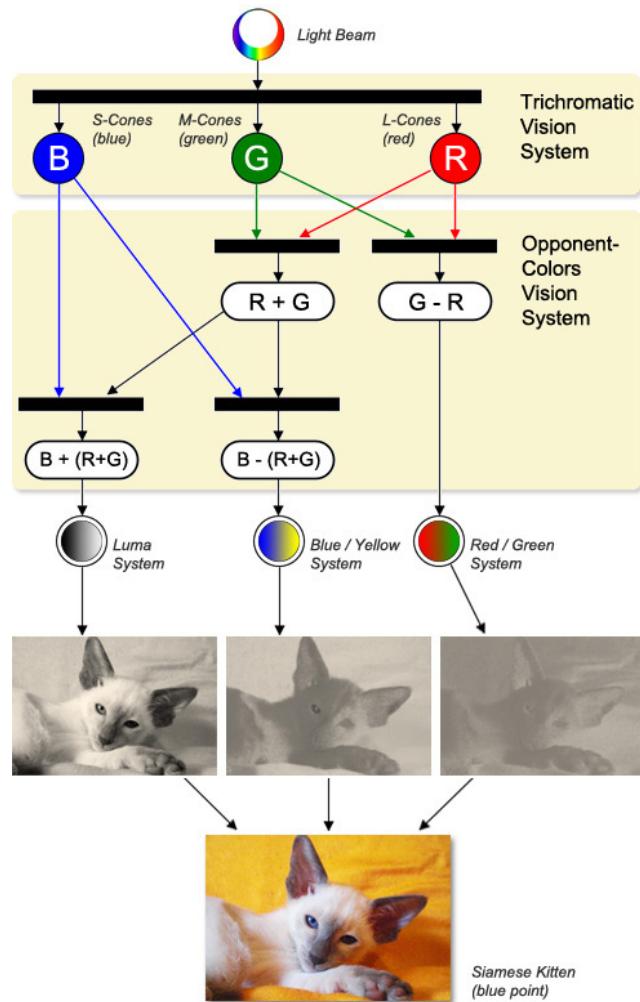
Однако для полного описания восприятия этой теории оказалось недостаточно. Теория, которая описывает не процесс получения информации через органы зрения, а процесс её восприятия, называется оппонентной теорией цветоощущения Геринга.

Выводы его теории такие: есть пары цветов, которые дают нейтральный, то есть, серый, оттенок. В качестве таких оппонентных процессов выделяются пары красный-зеленый и синий-желтый.

Приложив эту теорию к цветовому кругу, получим такую картину. Круг разделен на секторы для иллюстрации пропорций, в которых смешаны компоненты, на самом деле он непрерывный. Подписи пропорций вы видите в левом нижнем секторе круга.



Совместив эти теории, мы получаем вот такую схему:



## Цветовые модели и цветовые пространства

Модели представления цвета в технических системах появились задолго до компьютеров. Мы рассмотрим те модели, с которыми так или иначе есть большая вероятность столкнуться в быту или в рамках профессиональной деятельности.

Существуют термины "цветовая модель" и "цветовое пространство".

**Цветовая модель** – абстрактная модель описания представления цветов в виде кортежей чисел, другими словами – цветовыми компонентами или координатами. Определяет принцип формирования цвета, единицы измерения и границы отсчета шкал.

Цветовая модель – это математический инструмент описания цветов, но реальность часто вносит свои корректизы и некоторые цвета, которые, вроде бы, можно описать в отдельно взятой модели, на практике воспроизвести невозможно и требуется введение ограничений.

**Цветовое пространство** определяет реально достижимые цвета в рамках выбранной цветовой модели.

Из всего этого важно запомнить, что при всех тонкостях распределения спектральной чувствительности S, M и L колбочек, основными цветами являются все-таки красный, зеленый и синий.

## Классификация цветовых моделей

	Аппаратно- <sup>5</sup> зависимые	Аппаратно- <sup>6</sup> независимые
Аддитивные 	RGB	
Субтрактивные 	CMY, CMYK	Здесь в качестве примера вполне подойдёт цветовая модель художников. (Основные цвета: красный, синий, жёлтый). Цвет зависит от пигмента, но не от устройства.
Перцепционные 	YUV, YCbCr	HSB, HSL, HSI
Математические 	Сложно назвать хотя бы одну аппаратно-зависимую универсальную модель, т.к. эти два понятия противоречат друг другу.	Lab, XYZ

① Аддитивные – результирующий цвет является суммой (по яркости) его составляющих, которые добавляются к черному. Так, например, на темный экран светят красным, зеленым и синим лучами, чтобы получить белый. Когда нет ничего, то есть, в основании отсчета, мы видим черный, когда все компоненты находятся на максимуме, мы видим белый.

② Субтрактивные – результирующий цвет вычитается (по яркости) из белого. Так, печатая на белом листе красками, мы уменьшаем яркость отраженного света. В этом случае в основании координат мы имеем белый, а в максимуме – черный, складывающийся из цветовых составляющих.

③ Перцепционные – основанные на восприятии цвета человеком. Здесь принцип формирования цвета основывается не на технической реализации – освещении экрана или печати краской, а на том, как мозг воспринимает цвет. Мы выделяем яркость и цветность, вот эти модели воплощают описанную разницу на практике.

④ Универсальные или математические – максимально полные по своему охвату. Эти модели шире по охвату, чем могут отобразить или напечатать обычные устройства. Ранее описанные модели так же имеют меньший цветовой охват. Зато универсальные модели являются опорными для остальных моделей. Они описывают пределы зрительного восприятия, они помогают конвертировать цвета между другими моделями с меньшими потерями.

⑤ Аппаратно-зависимые модели описывают цвет, применительно к устройству цветовоизпроизведения. Такие цветовые модели зависят от конкретного вида устройств. Разные мониторы, например, имеют разные границы цветопередачи, то есть, разный цветовой охват и разную яркость и контрастность. В любом случае, цветовые модели, исходящие из способа синтеза цвета тех или иных устройств, мы называем аппаратно зависимыми.

⑥ Аппаратно-независимые модели однозначно описывают информацию о цвете. Раз они шире всех прочих и на реальном оборудовании их не воспроизвести, то, стало быть, и зависеть от возможностей этого оборудования они не могут.

## Цветовой охват

Когда речь идет о цветовых моделях, то, в первую очередь, определяется, к чему они применимы. Например, мы говорим, что RGB применима к излучающим, CMYK – к печатным устройствам.

Рассмотрим пример. Допустим, у нас одно измерение. Шкала серого. И мы определяем крайние точки – четный и белый. При этом, рассчитываем, что белый – это яркий солнечный свет, а черный – это совсем черный, как в плотно запечатанной коробке.



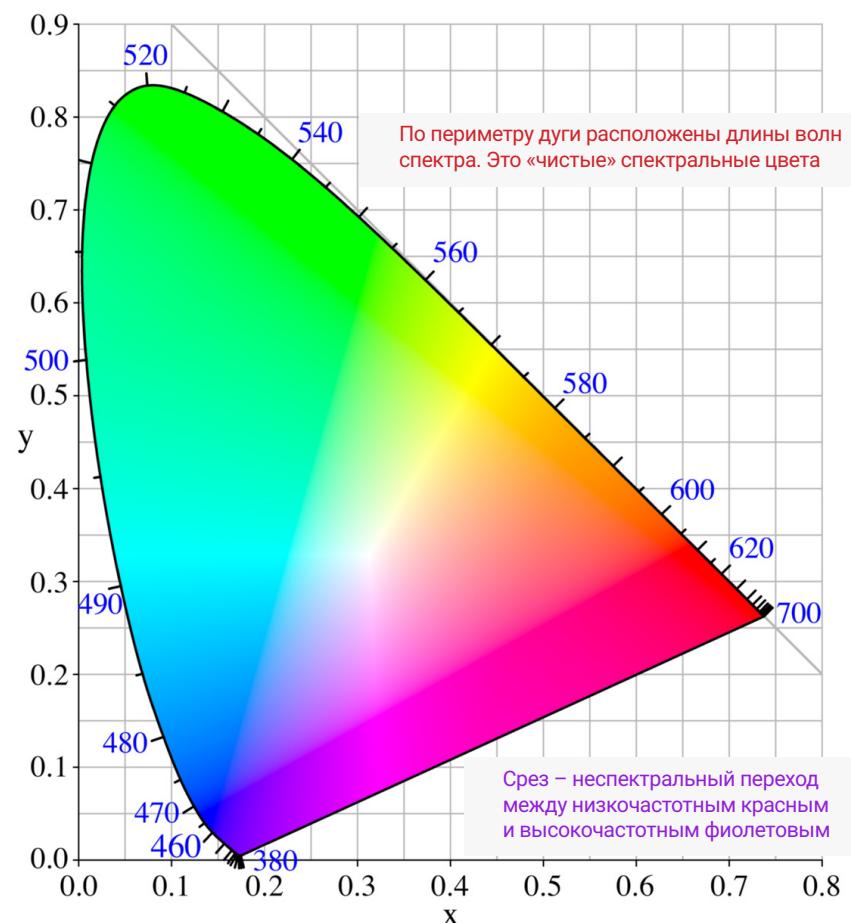
Это очень большой диапазон значений яркости.

И теперь мы хотим воспользоваться этой «моделью» на компьютере. Но монитор не способен воспроизвести ни уровень яркости солнечного света, ни абсолютную черноту – на первое ему не хватит мощности подсветки, а второе не получится, потому что есть отражение внешнего света от поверхности, есть пропускание подсветки матрицей, и прочие технические факторы.

Получается, что реальный охват, который мы можем себе позволить на мониторе – это лишь фрагмент от полного охвата цветовой модели. И «0» монитора – это далеко не ноль цветовой модели, то же касается противоположного конца шкалы.

Второй вопрос, который уже непосредственно относится к охвату, – это допустимые значения компонент. Цветовой охват определяется не сам по себе, а относительно эталонного цветового пространства.

Картинка ниже описывает все цвета, которые может увидеть человек. Это общепринятая карта цвета, на которой можно сравнить цветовой охват всех моделей.



## Аддитивный синтез и модель RGB

Итак, у нас есть три основных спектральных цвета, которыми мы можем светить на экран, чтобы получить всё богатство промежуточных цветов и яркостей. Сумма всех трех лучей даёт нейтральный серый цвет.

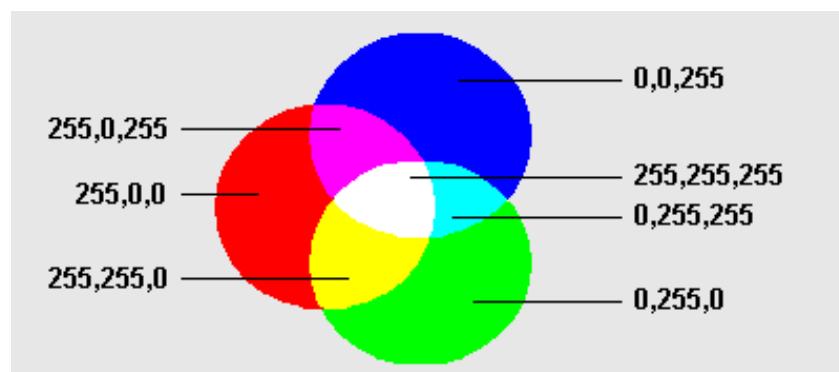
Если мы представим себе монитор (неважно, будет это жидкокристаллический или старомодный с электронно-лучевой трубкой), то запись цвета в RGB фактически сообщает монитору яркость каждой из цветовых составляющих. Никакого пересчета – написано, что нужно полностью включить красный и зеленый, не включать синий – вот и получим яркий жёлтый цвет, как сумму красного и зеленого без лишних примесей

Как записываются цвета в RGB? Обычно используется два формата: десятичными числами по компонентам и шестнадцатиричной записью. Например, желтый цвет будет записан так:

255, 255, 0

или

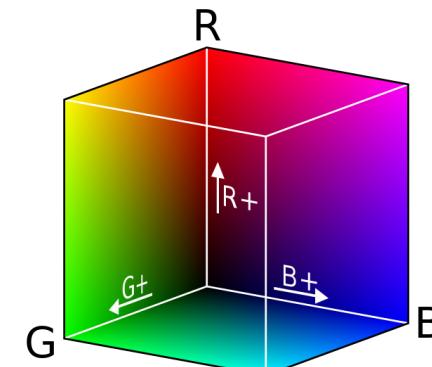
#FFFF00.



Почему 255? Потому что обычно (но не всегда!) изображения записываются в так называемом “восьмибитном” формате, то есть, с глубиной цвета 8 бит на канал. Заметьте, не на пиксель, а на канал – это важно. На пиксель получится 24 бита. У нас есть три цветовых канала, каждый по 8 бит, то есть, по 256 значений яркости.

Общее количество оттенков в таком случае:

$256^3$  – чуть меньше семнадцати миллионов.



Представим цветовую модель на кубе.

Пусть все нули – это черный, то все единицы – это белый.

Если попарно выводить основные цвета в максимум, а третий оставлять на нуле, то мы получим любопытный набор цветов: голубой, пурпурный и жёлтый.

То есть, это основные цвета следующей модели – CMY. Эти цвета окажутся на соответствующих вершинах куба. Запомним это, скоро пригодится.

Если посмотреть на этот куб таким образом, чтобы главная диагональ совпала с оптической осью нашего взгляда, то мы увидим шестиугольник с равномерно расположенными в перемешку цветами моделей RGB и CMY – все шесть оставшихся вершин куба будут на одном расстоянии от оси. Если провести через эти вершины окружность, то получим цветовой круг.

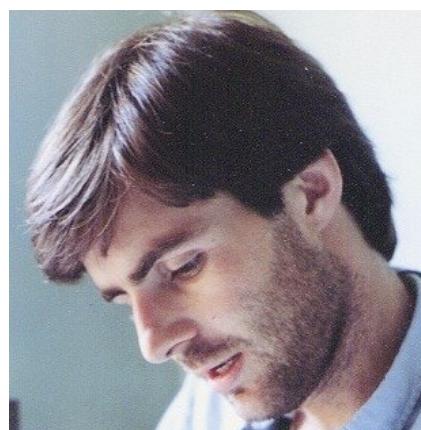


## Гамма-коррекция

Гамма-коррекция – это технический термин, относящийся к нелинейности передачи яркости изображений в некоторых устройствах – фото, видео и телевизионной технике и записывается, как степенная функция с коэффициентом.

Сначала нелинейность была вынужденной и проявлялась в телевидении и фотографии – все зависимости и функции в технике были нелинейными, и для каждого прибора вводились свои поправки. С появлением цифровой фотографии и цифрового видео остро встал вопрос экономии места, которое занимает снимок и, тем более, видеозапись. И здесь снова вспомнили про гамму, но уже в другом ключе.

Известно, что в нормальных условиях глаз лучше различает перепады освещённости в тенях, чем в светлых областях. При отсутствии гамма-коррекции, в светах цифрового изображения кодируется слишком много полутонаов, которые неспособен различить зритель. Напротив, в тенях остаётся слишком мало информации, снижая качество изображения. В случае линейного кодирования файлов JPEG по существующей 8-битной системе, неизбежна «постеризация» изображения, когда глаз различает ступенчатые тональные переходы.

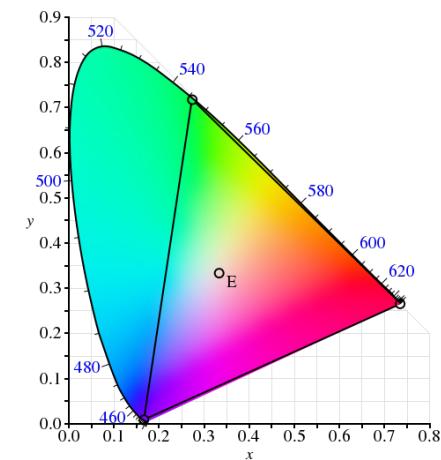


Визуально, гамма-коррекция позволяет «проявить» детали, которые оказались слишком затененными на фотографии, не изменяя крайних значений яркости, что отличает её от простого изменения яркости и контрастности. Если у вас есть снимок, который уже содержит черные и белые пиксели, то изменять яркость – значит уводить эти и примыкающие к ним по яркости пиксели за шкалу, так получатся или провалы в черное или блики в белое, уже невосстановимые. А гамма позволяет изменять передачу полутонов, не затрагивая крайние значения.



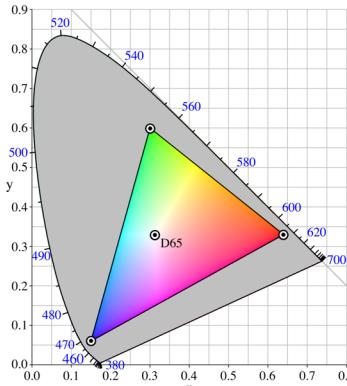
## Цветовые пространства RGB

Если мы представим модель RGB на модели XYZ [стр 43](#), то получим вот такой треугольник



Но обозначить эти цвета мало, надо же ещё их суметь воспроизвести, и здесь начинаются сложности.

Такой треугольник реальными дисплеями воспроизвести не удавалось, поэтому пришлось исходить из возможностей техники, а не красивых физических моделей.



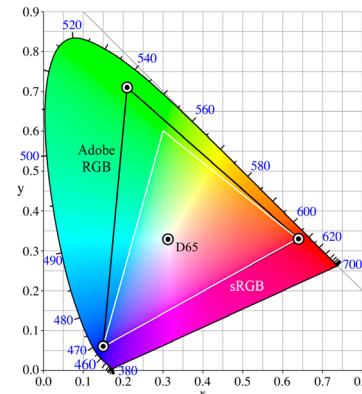
Из всех RGB пространств самым малоёмким является sRGB. Это как раз то самое пространство, которое используется по умолчанию во всех мониторах и фотокамерах.

Когда его создавали в 1996 году, то опирались на имевшиеся в то время мониторы и принтеры.

Нужно было обеспечить сколько-нибудь похожую цветопередачу, чтобы одинаковые изображения отображались на разных устройствах одинаково. С тех пор технологии производства мониторов развивались, а ставшее уже стандартным цветовое пространство sRGB так и осталось, теперь оно жмёт всем, даже обычным пользователям.

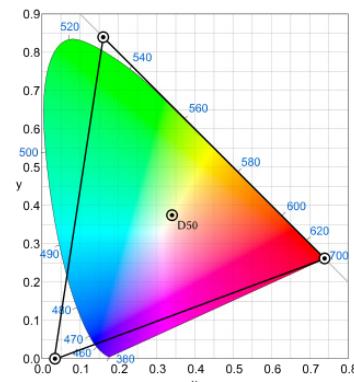
Профессионалы изначально не были довольны таким ограниченным пространством и, располагая техникой получше, чем бытовые мониторы и струйные принтеры, могли себе позволить лучшую цветопередачу.

Для них в 1998 году Adobe разработала расширенное цветовое пространство Adobe RGB 1998. В сравнении с sRGB оно существенно больше, около сорока процентов прироста, но все равно это лишь половина пространства видимого цвета.



На этих двух пространствах прогресс не остановился и Adobe выпустила спецификацию ещё более ёмкого цветового пространства – Wide Gamut RGB. На этот раз покрывается  $\frac{3}{4}$  доступного пространства, в то время, как Adobe RGB покрывала только половину, а sRGB – лишь немного больше трети.

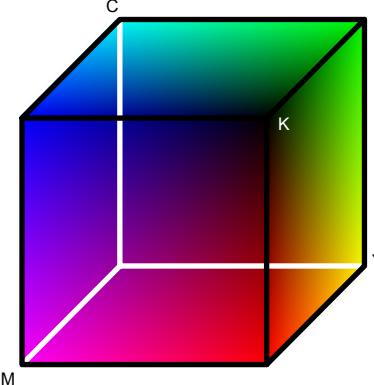
Разумеется, в этом цветовом пространстве с восьмибитным цветом делать уже нечего, вместо плюсов от расширенной цветопередачи есть все шансы получить эффект постерилизации, когда плавные переходы будут отображаться «лесенкой».



Обзор цветовых пространств закончим ProPhoto RGB, так же известным как ROMM RGB. Здесь покрытие составляет уже 90%, правда, местами выходит за пределы возможных цветов и примерно 13% значений этого пространства указывают на несуществующие цвета. Разумеется, здесь так же не предполагается работать с восьмибитным цветом.

## Субтрактивные модели

Итак, мы уже смотрели на единичный куб, в основании которого находится чёрный и, на противоположном конце главной диагонали – белый. Смотрели и вдоль главной диагонали – видели “почти цветовой круг”.



Теперь возьмем этот же куб и перевернем его таким образом, чтобы в основании системы отсчета был белый, а в конце главной диагонали был чёрный. Основными цветами теперь станут голубой, пурпурный и желтый.

Вот мы и получили модель CMY: в начале отсчета белый лист, в максимуме всех компонент – чёрное пятно. Попарно компоненты этой цветовой модели дают основные цвета модели RGB.

Для описания цвета в модели CMYK пользуются процентной шкалой. Это удобно при печати, можно примерно посчитать расход краски. Например, есть устоявшиеся значения: текстовая страница обычно считается заполненной чёрной краской на 5%. Таким образом, можно рассчитать расход краски на печать тиража книги.



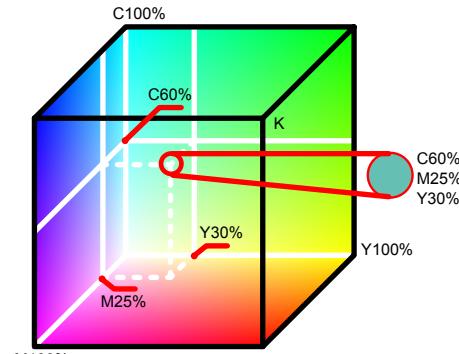
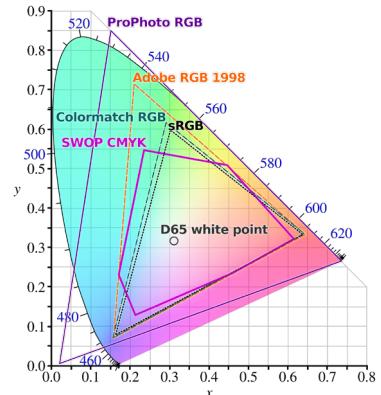
**Вопрос на сообразительность:** как, имея под рукой графический редактор, быстро узнать процент заполнения по краскам в произвольном графическом файле?

Давайте ещё раз посмотрим на цветовой охват CMYK.

Вот он в сравнении с популярными пространствами RGB. Выходит, что CMYK – самое малоёмкое пространство.

Для приличных офсетных машин оно побольше, для бытовых дешевых принтеров – поменьше. В любом случае, цветопередача получается очень ограниченной.

Наше сознание компенсирует потери, когда мы смотрим на цветные картинки, но объективно – монитор краше. Фотоспособом можно получить цвета побогаче, но тоже не беспредельно.

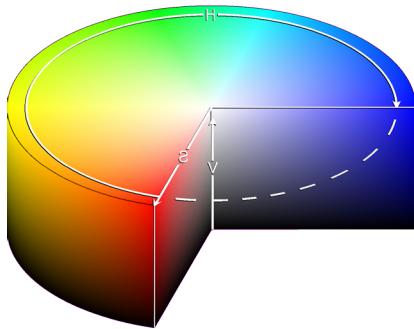


Здесь выходят из положения ещё и введением так называемых плашечных цветов.

Это заранее подготовленные цвета, которые получаются не смешанием основных, а заправляются отдельно. Как правило, они не смешиваются с триадными, а печатаются как есть там, где нужно закрасить какую-нибудь плашку или текст именно таким цветом. Поэтому их и называют плашечными. В создании таких красок и их каталогов особенно преуспела фирма Pantone, поэтому её имя стало практически нарицательным, по крайней мере, в России.

## Перцепционные цветовые модели

Для того, чтобы внести ясность в то, что из себя представляют перцепционные модели, вернёмся к цветовому кругу.



Таким образом, смещая круг выше или ниже по шкале яркости мы делаем цвета светлее или темнее.

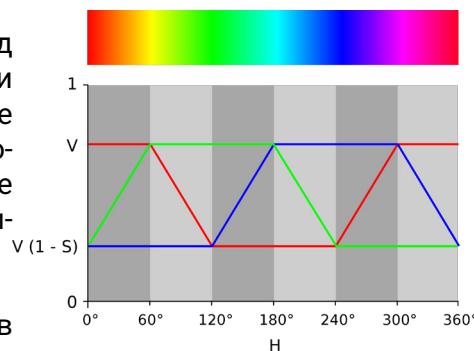
Так устроены цветовые модели HSL, HSB, HSI, HSV.

Что мы можем сказать о цветовом охвате этих моделей?

И о переводе из RGB и обратно?

Здесь все хорошо, перевод однозначный, практически без потерь. Единственные потери, которые могут получиться – это округление дробных значений при вычислениях.

Для этого в ряде случаев есть соответствия цветов между моделями, чтобы сохранять целочисленные значения и избегать округлений, но такое сопоставление есть не для всех случаев. Например, из RGB в HSV есть, а обратно – уже не для всех цветов.

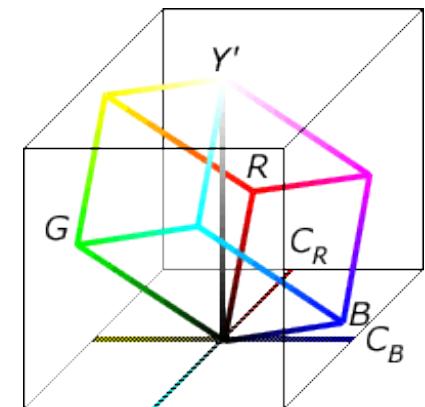


Охват – это охват соответствующего пространства RGB, что тоже удобно. То есть, мы можем переключаться между этими моделями по мере необходимости. Но не повторяйте такого с CMYK, там преобразование будет с потерями.

## Цветовые пространства YUV

Теперь перейдем к семейству Y-моделей. Обычно про них мало пишут в учебниках и на обзорных сайтах, а напрасно. Вот в чем их особенность.

Согласно оппонентной теории, несмотря на то, что наши глаза воспринимают излучение трех основных частот, которые мы условно называем красным, зеленым и синим цветами, наш мозг предпочитает другую схему восприятия: канал яркости и два цветоразностных канала: красно-зеленый и сине-желтый.



В разных моделях эти каналы называют по-разному, в наиболее нас интересующей модели, используемой в компьютерной графике – Cb и Cr, а канал яркости – Y. Получается модель со сложным названием – YCbCr.

Когда рисуют эту модель условно, то канал яркости обозначают белым, а цветоразностные соответственно – синим и красным. Легко запомнить, получается флаг России.

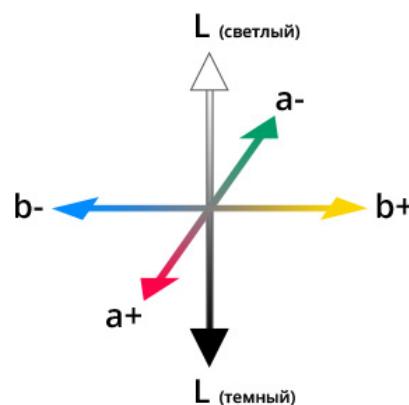


Запомнить пары цветов в цветоразностных каналах тоже несложно – такие цвета имеют флаги Белоруссии и Украины. Никакой политики, просто удобная ассоциация. Теперь вы их точно не перепутаете.



## Модель Lab

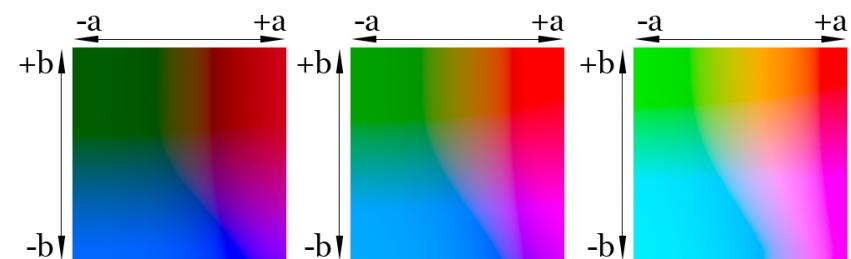
Модели, которые мы рассматривали до сих пор были так или иначе применимыми в реальности – их цвета можно отобразить на экране или напечатать на принтере, пусть и не на каждом, пусть и не всегда в явном виде, как в случае с перцепционными – они однозначно пересчитываются в аппаратные пространства RGB. В случае с математическими или, так называемыми, универсальными моделями всё выглядит более абстрактно и назначение у них другое.



Сначала рассмотрим модель Lab, которая существует лишь в математическом пространстве, хотя и похожа на перцепционные. Её цветовое пространство – самое ёмкое из всех компьютерных моделей, что определяет её использование – она применяется для работы с цветом, когда нужно проводить какие-либо операции, требующие значительных преобразований цвета с минимальными потерями, в частности, – конвертации сложных изображений между разными цветовыми пространствами.

Канал L – это lightness. Этот канал адаптирован для восприятия цвета человеком и разные цвета будут визуально одной яркости, в отличие, например, от HSB, где визуально яркость меняется в разных оттенках.

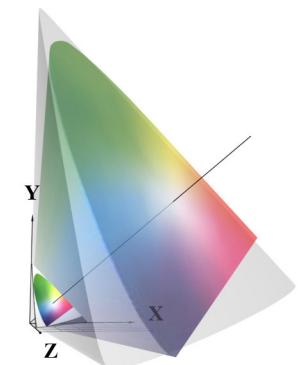
Каналы a и b – это цветоразностные каналы, здесь от зеленого до красного и от синего до жёлтого, как в YUV-пространствах.



В этой модели, как мы видим, значения яркости и цветности разделены. Цвет в этой модели определяется однозначно и безотносительно внешних факторов, в отличие от аппаратно-зависимых моделей RGB и CMYK. Поэтому модель LAB используется в программном обеспечении, связанном с обработкой фотоизображений. Особенно ценно её применение в работе с зашумленными фотографиями и при устранении муара на сканированных изображениях. Когда на изображении появляется цветовой шум, то, работая отдельно с каналами цветности, можно эффективно устраниить его, не затрагивая основное изображение.

## Модель стандартного наблюдателя CIE XYZ

Модель XYZ – это самая старая из используемых моделей. Основная задача этой модели и соответствующего ей цветового пространства – описать границы восприятия человеком цвета. Это эталонная модель, остальные с ней сравниваются. Именно на цветовом пространстве XYZ мы рисовали все другие цветовые пространства. Больше его – может быть, но нет смысла, так как цвета вне этого пространства для человека невидимы. Меньше – значит, мы упускаем часть видимого диапазона.



Эта модель появилась ещё в 1931 году. В компьютере её место занимает ранее описанный Lab. А почему было не обойтись такой устоявшейся за годы моделью, зачем понадобилось что-то изобретать? Оказалось, что модель хоть и эталонная, но не очень удобная для практического вычисления цветов: она имеет неравномерное изменение цвета по периметру, например, зажатую жёлтую область и растянутую зеленую. Тем не менее, если вы откроете описание любой цветовой модели, то там приводятся формулы пересчета цветов именно из XYZ, как эталонной модели человеческого зрения.

Это не единственная модель такого рода, например, существовала модель LMS – по названию диапазонов, в которых воспринимают цвет колбочки (длинные, средние и короткие волны видимого спектра), но используется именно XYZ, в которой координаты опираются так же на спектральную чувствительность колбочек L, M и S типа.

