



ОСНОВЫ СВЕТОТЕХНИКИ

Раздел 1. Природа и свойства излучений

Раздел 2. Источники излучения и их классификация

Раздел 3. Преобразование излучения оптическими средами

Раздел 4. Приемники излучения. Глаз как приемник излучения

Раздел 5. Основы учения о цвете

Литература

Основная

1. Чуркин А.В., Шашлов А.Б., Уарова Р.М. Основы светотехники. Учебное пособие. М.: МГУП, 2002
2. Луизов А.В. Цвет и свет. Л.: Энергоатомиздат, 1989.

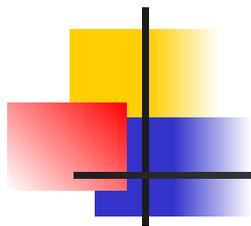
Дополнительная

1. Фрейзер Б., Мэрфи К., Брантинг Ф. Реальный мир управления цветом, искусство допечатной подготовки. М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2006.
2. Годен Ж. Колориметрия при видеообработке. М.: Техносфера, 2008.
3. Мешков В.В. Основы светотехники: Учебное пособие для вузов. Ч1. М.: Энергия, 1979.
4. Мешков В.В., Матвеев А.Б. Основы светотехники: Учебное пособие для вузов. Ч2. М.: Энергоатомиздат, 1989.
5. Тарасов Л.В. Лазеры и их применение. М.: Радио и связь, 1983.



Приставки к единицам измерения

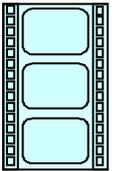
Приставка	Порядок величины
Тера Т, Т	10^{12}
Гига G, Г	10^9
Мега М, М	10^6
Кило к, к	10^3
Милли т, м	10^{-3}
Микро (микрон) μ , мк	10^{-6}
Нано п, η , н	10^{-9}
(миллимикрон т μ – устар.)	
Пика р, п	10^{-12}



Раздел 1. Природа и свойства излучений

Свет - это электромагнитное излучение с длиной волны от 380 до 780 нм и/или частотой 789×10^{12} Гц до 385×10^{12} Гц. Материальным носителем излучения является **фотон** - квант (минимальная «неделимая» порция) энергии электромагнитного излучения. Энергия фотона согласно Планку:

$$\varepsilon = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$



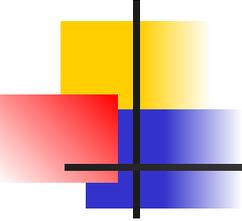
где ν – частота фотона; $h=6,626 \times 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка (фундаментальная физическая константа); $c=2,998 \times 10^8$ м/с – скорость света в вакууме (фундаментальная физическая константа); λ – длина волны излучения. Формула Планка отражает волновую природу света.

Энергия фотона по Эйнштейну:

$$\varepsilon = mc^2$$

где m – масса фотона. Формула Эйнштейна отражает корпускулярную природу света.

Выражение, связывающее массу фотона с его частотой:

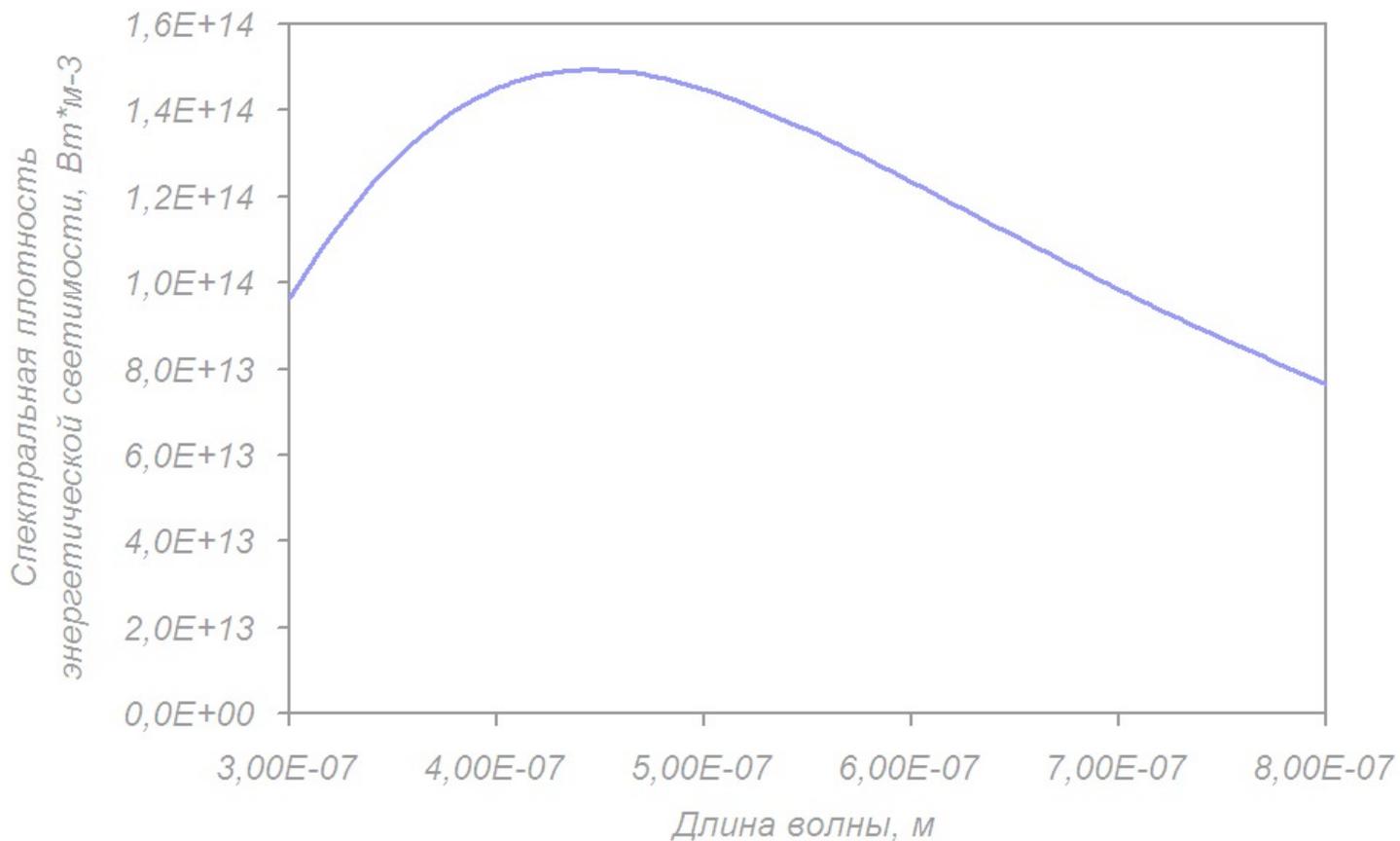

$$m = \frac{h\nu}{c^2}$$

Тот факт, что фотон может проявлять свойства и волны и частицы, получил название **корпускулярно-волнового дуализма**.

Примерные диапазоны спектра электромагнитных излучений

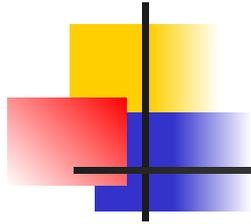
Наименование диапазона	Длина волны излучения, мкм
γ-лучи	Менее 0,0001
Рентгеновское излучение (X)	0,0001–0,01
Ультрафиолет (UV)	0,01–0,38
Видимый свет	0,38–0,78
Инфракрасное излучение (IR)	0,78–1000
Радиоволны	Более 1000

Источник света или цветной объект в физике изображается в виде кривой излучения, отражения или пропускания спектра. На этих кривых, которые также носят название **спектр**, на оси абсцисс откладывается длина электромагнитных волн, а на оси ординат – соответствующий уровень излученной, отраженной или пропущенной через объект (фильтр) энергии.



К оптической области спектра относится лишь излучение с длинами волн от 0,01 до 1000 мкм.

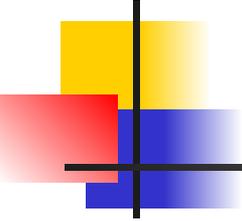
В оптической области можно выделить три основных зоны: ультрафиолетовую, видимую и инфракрасную:



Ультрафиолетовое излучение (UV) обладает самой высокой мощностью (в пределах выделенной зоны) и обладает сильным фотохимическим и фотофизическим действием.

Излучение видимого диапазона, несмотря на узость интервала, позволяет видеть все цветовое многообразие окружающего мира. Как будет показано далее, человеческий глаз практически не воспринимает излучения с крайними длинами волн. Видимый свет также обладает значительным фотохимическим и фотофизическим действием, но в меньшей степени, чем ультрафиолет.

Инфракрасное излучение (IR) обладает минимальной мощностью, и для него характерно, прежде всего, тепловое действие, и, в значительно меньшей степени фотохимическое и фотофизическое действие.



Фотометрия – раздел светотехники,
занимающийся количественными измерениями света.

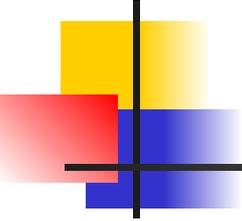
Для количественной оценки видимого излучения может быть использован достаточно широкий круг величин. Условно их можно разделить на две системы единиц: **энергетическую** и **световую**.

– в энергетической системе базовой величиной является энергия, переносимая излучением;

– световой системе излучения оцениваются по их действию на человеческий глаз.

Энергетическая система единиц

Поток (мощность) и
спектральная интенсивность


$$\Phi = \frac{dW_e}{dt}$$

Поток (мощность) излучения Φ является основной единицей в энергетической системе. За мощность (поток) излучения принимают энергию dW , переносимую излучением через некоторую поверхность в единицу времени dt , значительно превышающую период электромагнитных колебаний. Величина Φ является интегральной с точки зрения длины волны и выражается в ваттах (Вт).

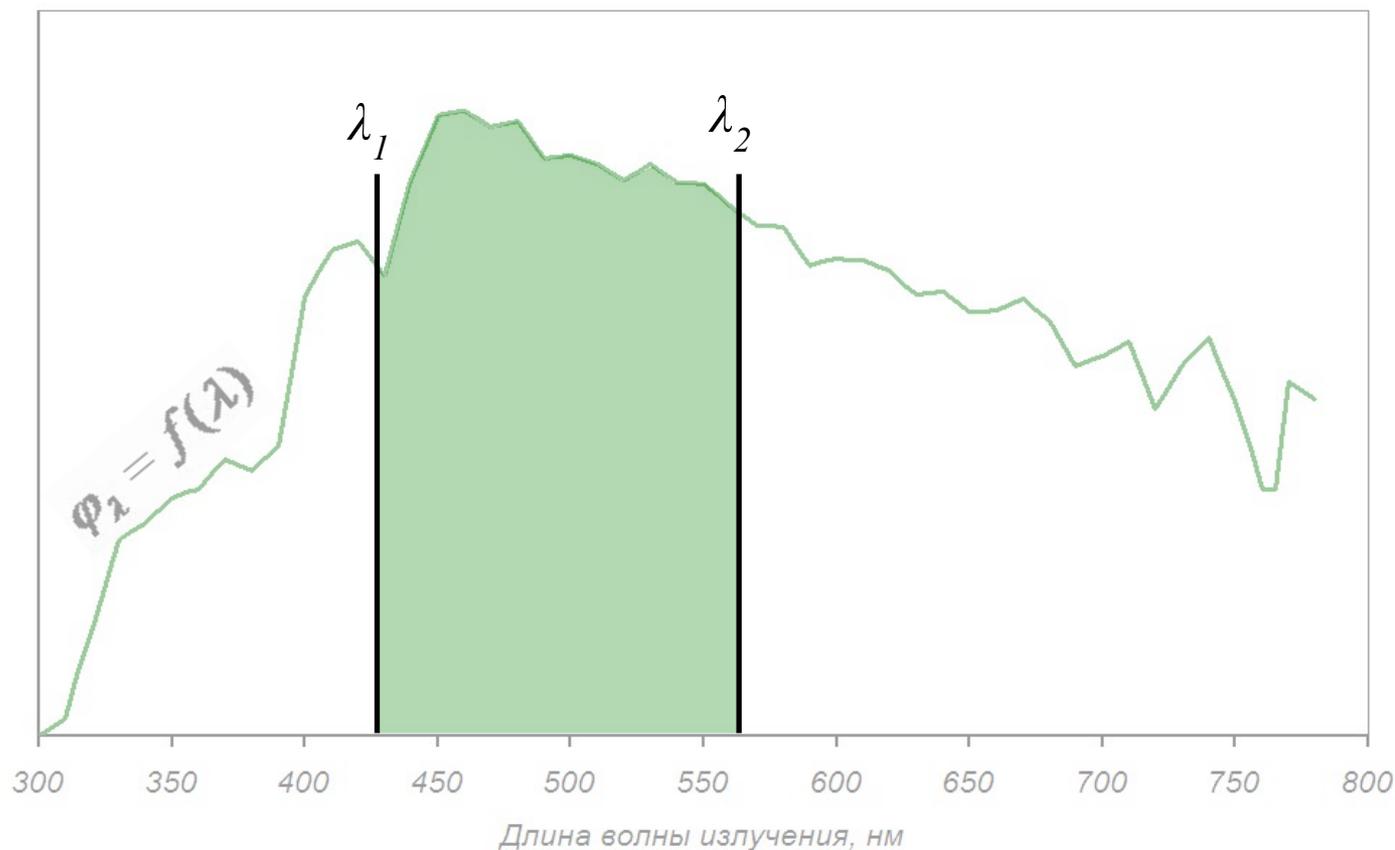
$$\Phi_\lambda = \frac{d\Phi}{d\lambda}$$

Интересует, как правило, не сам поток излучения, а его распределение по спектру излучения. В этом случае пользуются дифференциальной величиной, называемой **спектральной интенсивностью** или **спектральной плотностью излучения**.

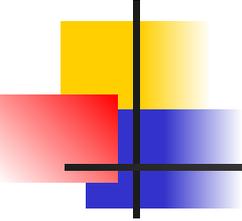
Зная вид функции распределения спектральной интенсивности, можно определить как полный поток излучения, так и мощность излучения любой части спектра подбором соответствующих пределов интегрирования.

$$\varphi_{\lambda} = f(\lambda)$$

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_{\lambda} d\lambda$$



Энергетическая освещенность и энергетическая светимость



Для пространственного распределения потока излучения используют две смежных величины: **энергетическая освещенность** (в литературе можно также встретить термин облученность) – для несамосветящихся тел; и **энергетическая светимость** – для самосветящихся тел и для оценки отраженного потока несамосветящихся тел.

$$E_e = \frac{d\Phi}{dQ}$$

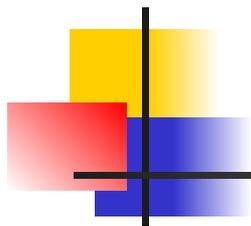
Под освещенностью понимается поток излучения, приходящийся на единицу освещаемой поверхности dQ .

$$R_e = \frac{d\Phi}{dQ}$$

Под светимостью понимают поток излучения, испускаемый с единицы площади светящейся или отражающей поверхности.

Размерности обеих величин – ватт на квадратный метр (Вт/м²).

Сила излучения (энергетическая сила света) и телесный угол

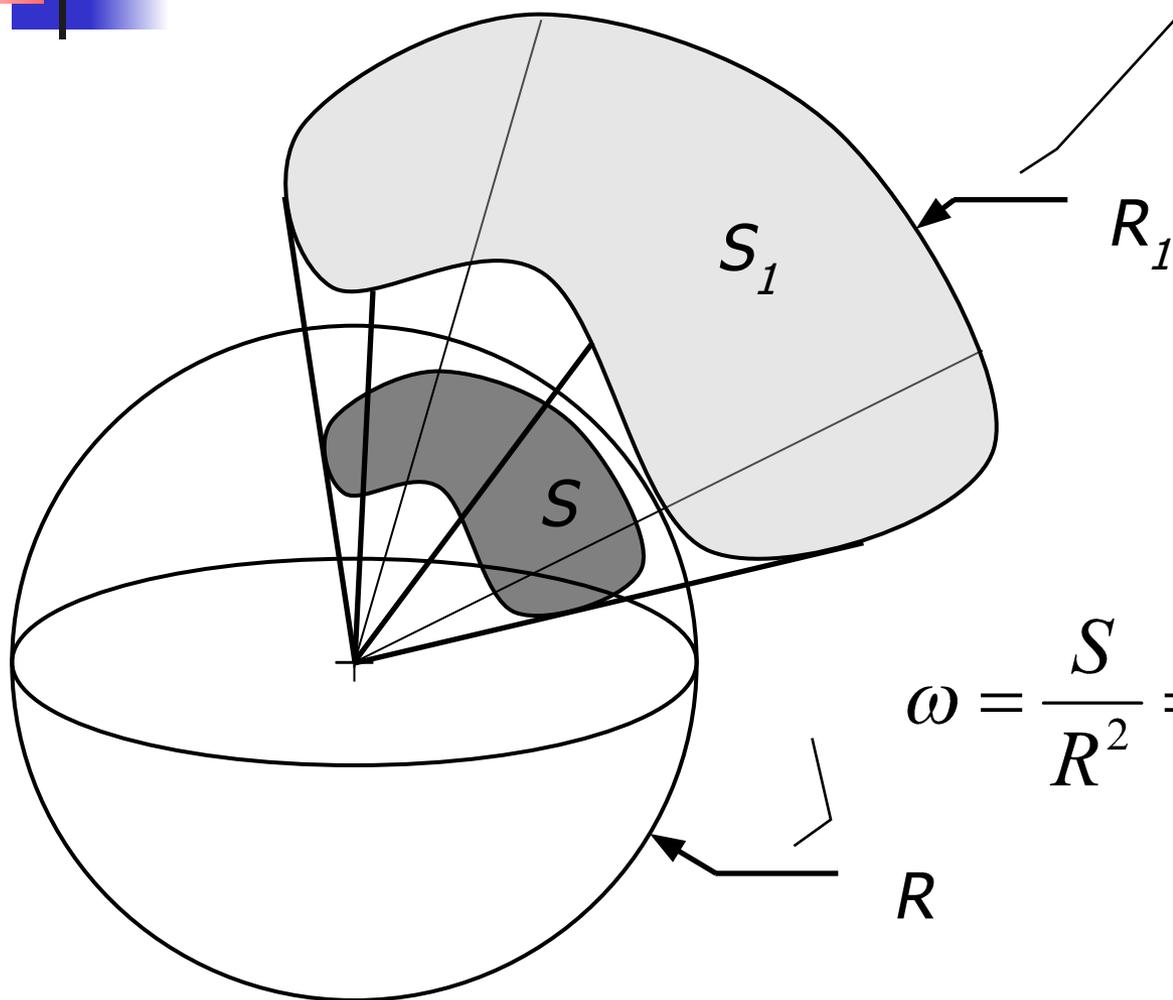


$$I_e = \frac{d\Phi}{d\omega}$$

Сила излучения (энергетическая сила света) I_e есть аналог силы света, используемой в световой системе единиц. Под энергетической силой света в данном направлении понимается поток излучения, приходящийся на единицу телесного угла $d\omega$, в пределах которого распространяется излучение. Также используется для пространственного распределения потока света. Единица измерения – Ватт на стерадиан (Вт/ср).

Телесным углом называется часть пространства, заключенная внутри одной полости конической поверхности с замкнутой направляющей. Размерности телесный угол не имеет. Единица измерения – стерадиан (ср). Стерадиан равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы.

К понятию телесный угол



Полный телесный
угол равен 4π
стерадиан

$$\omega = \frac{S}{R^2} = \frac{S_1}{R_1^2}$$



Энергетическая яркость

$$B_e = \frac{dI_e}{dQ}$$

Энергетическая яркость – величина, равная отношению энергетической силы света dI_e элемента излучающей поверхности к площади dQ проекции этого элемента на плоскость, перпендикулярную направлению наблюдения.

$$B_e = \frac{d^2\Phi}{dQ \cdot d\omega}$$

Связь между энергетической яркостью и основной величиной – потоком излучения можно установить, подставив в числитель выражение для энергетической силы света.

Единица измерения – Ватт на стерадиан-метр квадратный (Вт/(ср×м²)).



Энергия излучения и энергетическая экспозиция

$$W_e = \int_0^t \Phi(t) dt$$

Энергия излучения есть интеграл потока по времени. $\Phi(t)$ – функция изменения потока излучения во времени.

$$H_e = \frac{dW_e}{dQ}$$

Под **энергетической экспозицией** понимают отношение плотности энергии dW_e к элементу облучаемой поверхности dQ .



Понятие эффективной величины

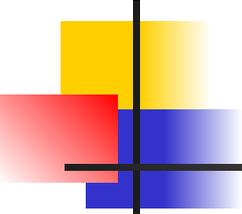
Согласно закону сохранения энергии любой процесс взаимодействия излучения со средой может быть описан равенством:

$$dW_{\text{полн}} = dW_{\text{эфф}} + dW_{\text{потерь}}$$

$dW_{\text{полн}}$ – полная энергия, переданная среде;

$dW_{\text{эфф}}$ – энергия, преобразуемая средой в другие формы (энергия химических реакций, электрический ток и т.д.) и характеризующая полезную ее часть;

$dW_{\text{потерь}}$ – нежелательный сопутствующий процесс расходования энергии (например, нагрев).



Понятие эффективной величины (продолжение)

Тела и среды, в которых происходит преобразование энергии оптического излучения в другие формы энергии, в фотометрии принято называть **приемниками** оптического излучения. Примерами могут служить человеческий глаз, фотоэмульсии, электронные фотоэлементы.

Продифференцировав выражение для энергии по времени, можно перейти к потокам (мощностям):

$$\Phi = P_{\text{эфф}} + N_{\text{потерь}}$$

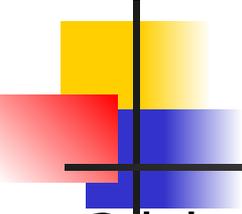
- Φ – поток излучения (по определению);
- $P_{\text{эфф}}$ – **эффективный поток** – практически используемая полезная часть потока (мощности) излучения;
- $N_{\text{потерь}}$ – мощность потерь.



Понятие эффективной величины (продолжение)

$$S(\lambda) = k \frac{P_{эфф}(\lambda)}{\Phi(\lambda)}$$

Отношение эффективного потока к потоку, упавшему на приемник излучения, в фотометрии называется **светочувствительностью** (спектральной чувствительностью, световой эффективностью). Она в общем случае зависит от длины волны падающего излучения (k – коэффициент, связанный с выбором единиц, в которых измеряются входящие в формулу величины).



Понятие эффективной величины (окончание)

Эффективный поток представляет собой величину, отличающуюся от потока излучения лишь тем, что он оценивается мерой реакции приемника. Следовательно, при определении его должна быть принята во внимание спектральная чувствительность приемника. Во всех других отношениях эффективный поток аналогичен потоку излучения.

Можно говорить об эффективной силе излучения, эффективной яркости и т.д. Подобным образом можно построить систему эффективных величин, опирающуюся на эффективный поток как на исходную величину. Примером такой системы эффективных величин является **световая система единиц**.



Световая система единиц

Сила света

Сила света является основной единицей в световой системе единиц.

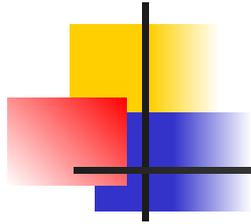
Единица измерения – кандела (кд). Кандела равна силе света, испускаемого в заданном направлении точечным источником монохроматического излучения с частотой 540×10^{12} Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет $1/683$ Вт/ср.

На этой частоте, соответствующей длине волны 555 нм, человеческий глаз обладает максимальной спектральной чувствительностью.

$$I = \frac{dF}{d\omega}$$

Сила света также может быть определена как отношение светового потока точечного источника испускаемого в телесный угол.

Световой поток



Единица измерения светового потока – люмен
 $1 \text{ лм} = 1 \text{ кд} \times 1 \text{ ср}$ (лм). Люмен – это световой поток, испускаемый точечным монохроматическим источником с силой света, равной одной канделе, в телесный угол в один стерадиан.

$$dF = Id\omega$$

Световой поток представляет собой количество энергии, излучаемой в секунду в определенном телесном угле, что касается области видимого.

$$F = 4\pi I$$

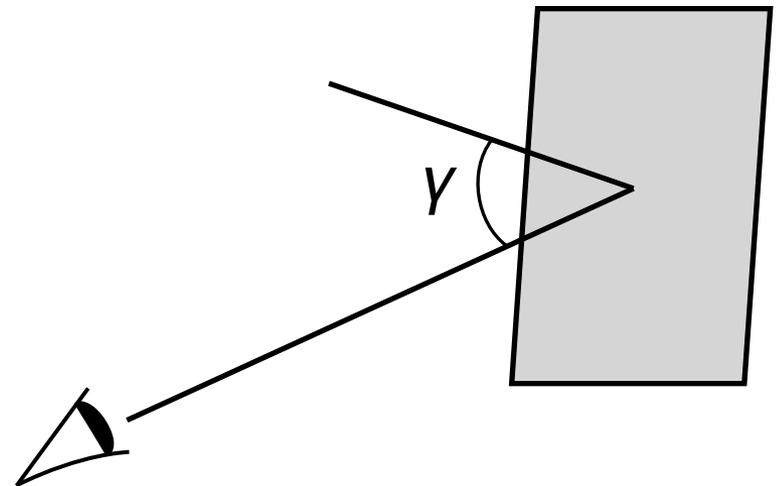
Световой поток точечного источника, испускаемый в полный телесный угол.

Яркость поверхности (визуальная яркость)

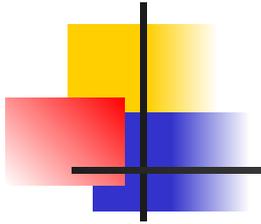
$$B = \frac{dI \cos \gamma}{dQ}$$

Яркость поверхности (визуальная яркость) – световой аналог энергетической яркости, применяемый для протяженных поверхностей. Единица измерения визуальной яркости – кандела на квадратный метр (кд/м²).

Кандела на квадратный метр – это яркость однородной излучающей поверхности площадью в 1 м², с нормального угла наблюдения, причем сумма сил света точечных источников, составляющих поверхность, равна 1 кд. γ – угол наблюдения к нормали поверхности.



Освещенность

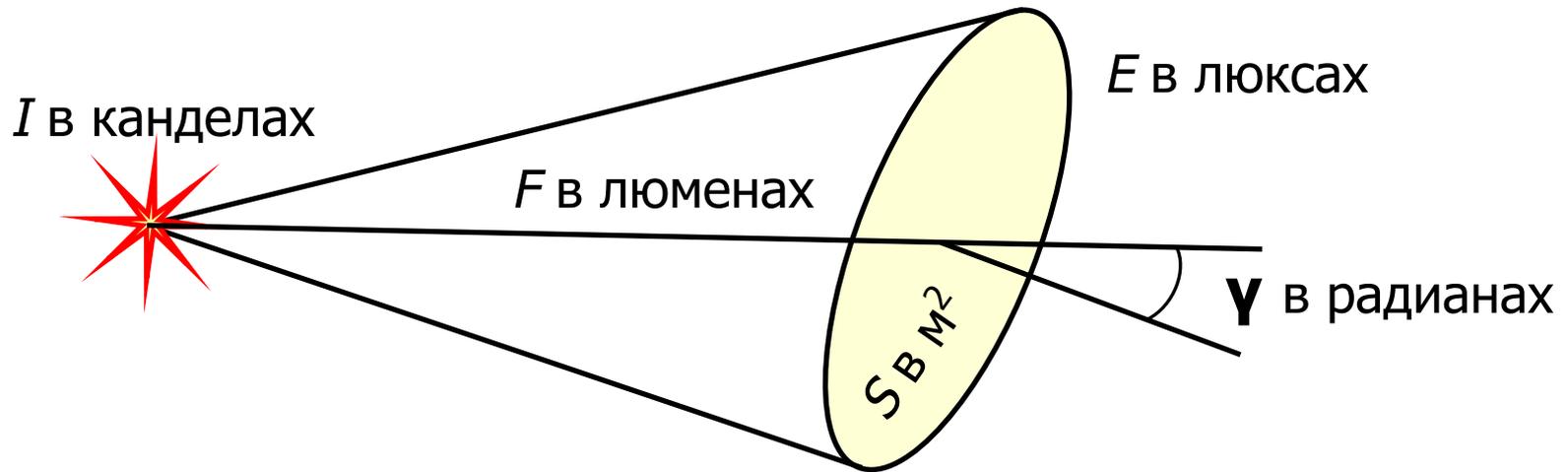


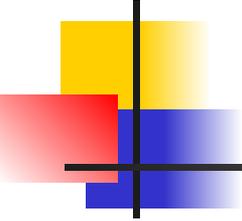
$$E = \frac{dF}{dQ} \cos \gamma$$

$$1 \text{ лк} = \frac{1 \text{ лм}}{1 \text{ м}^2}$$

Освещенность – световой аналог энергетической освещенности. Единица освещенности – люкс (лк).

Люкс – это освещенность, создаваемая равномерным световым потоком в один люмен, падающего перпендикулярно на поверхность площадью в 1 м².





Закон обратных квадратов «закон эр-квадрат»

$$E = \frac{dF}{dQ}$$

Если в выражение для освещенности подставить выражения для потока и площади освещаемой поверхности, получим формулу, связывающую освещенность и силу света источника.

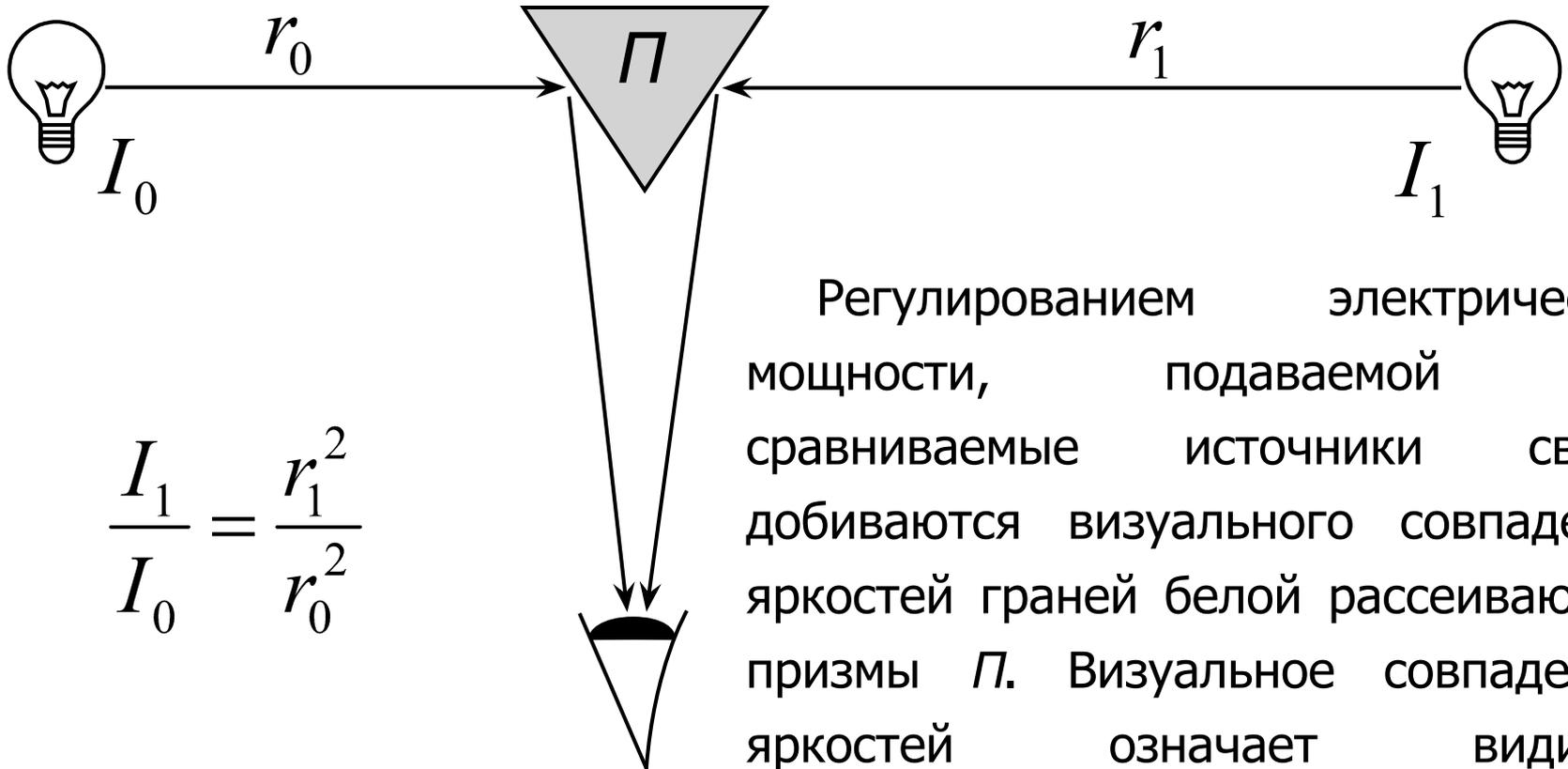
$$dF = Id\omega$$

Формула имеет простой физический смысл: освещенность поверхности, перпендикулярной к направлению распространения света, прямо пропорциональна силе света источника и обратно пропорциональна квадрату расстояния до него (т.н. «закон эр-квадрат»).

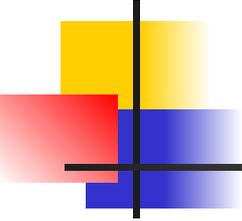
$$dQ = r^2 \cdot d\omega$$

$$E = \frac{I}{r^2}$$

К иллюстрации закона обратных квадратов (схема простейшего фотометра)



$$\frac{I_1}{I_0} = \frac{r_1^2}{r_0^2}$$



Связь между энергетическими и световыми величинами

Установить связь между энергетическими и световыми величинами можно, только изучив спектральную чувствительность глаза. Из всего спектра электромагнитных излучений глаз воспринимает как свет лишь небольшую область от 380 до 780 нм. Но и в этом узком интервале чувствительность глаза к различным длинам волн весьма различна.

Способом количественных измерений служит визуальное выравнивание яркости на колориметре двух фотометрических полей: стандартного и измеряемого.

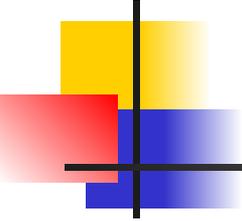


Связь между энергетическими и световыми величинами (продолжение)

На одну из граней призмы направляется излучение монохроматического источника с длиной волны λ_0 , мощностью Φ_0 , а на другую – излучение с длиной волны λ_1 , мощность которого варьируют до тех пор, пока не уравнивается визуальная яркость граней призмы.

Яркости равны, следовательно визуальный эффект *одинаков*, а мощности *различны*. Чувствительность глаза к излучению определенной длины $V(\lambda)$ тем выше, чем меньше затрачиваемая мощность.

$$\frac{V_1(\lambda_1)}{V_0(\lambda_0)} = \frac{\Phi_0}{\Phi_1}$$



Связь между энергетическими и световыми величинами (продолжение)

Получив такие выражения для многих излучений с различными длинами волн, определили ту, для которой чувствительность максимальна, и эту чувствительность приняли за единицу.

Остальные чувствительности выразили в этих единицах и получили для каждой длины волны величину, называемую **относительной спектральной чувствительностью**.

$$v(\lambda) = \frac{V(\lambda)}{V_{\max}(\lambda)}$$

Относительная спектральная чувствительность (относительная спектральная световая эффективность) является важной характеристикой, представляющей практический интерес для установления связи между энергетическими и световыми единицами.



Связь между энергетическими и световыми величинами (окончание)

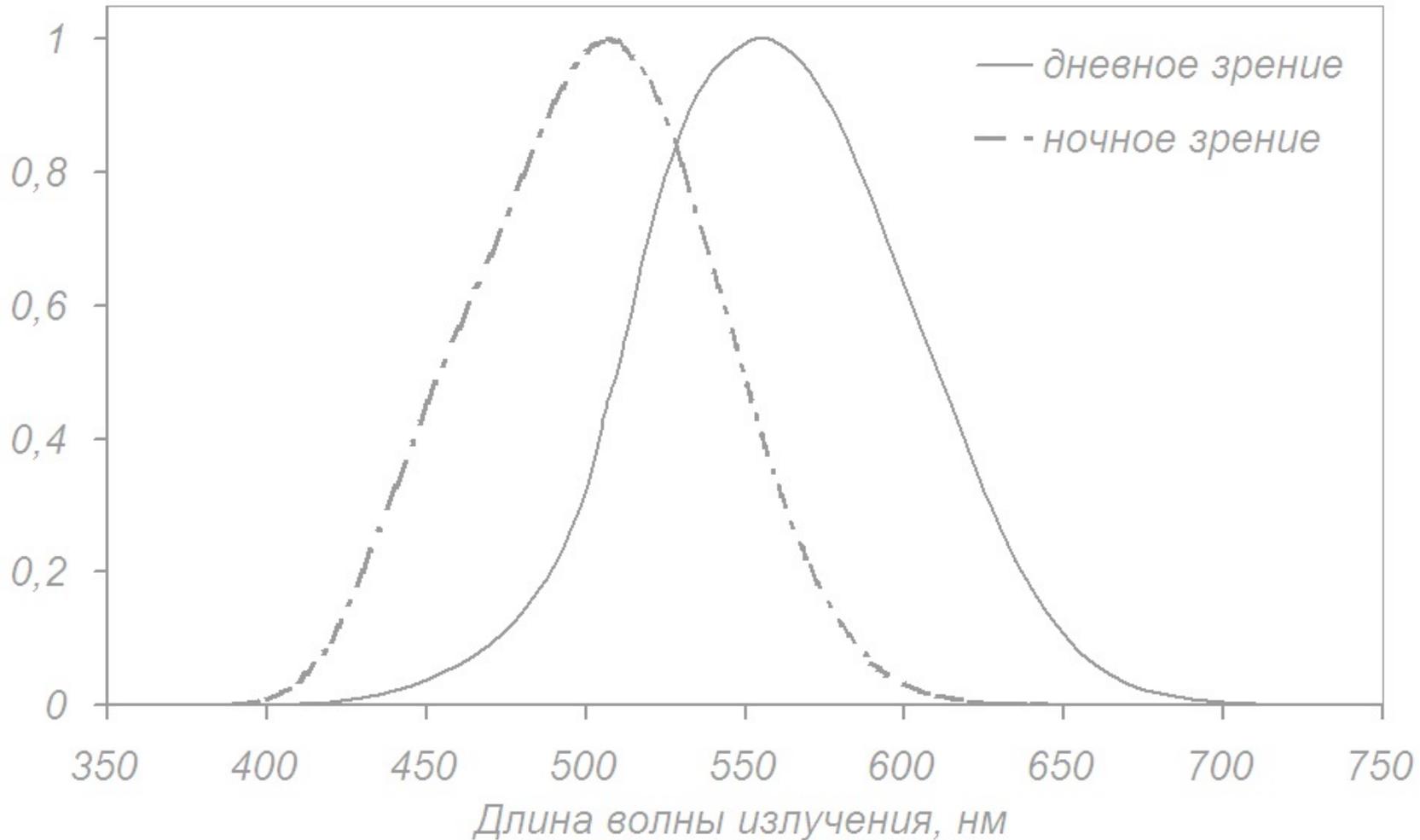
Переход от мощности к световому потоку для монохроматического излучения с длиной волны λ в узком интервале длин волн $d\lambda$.

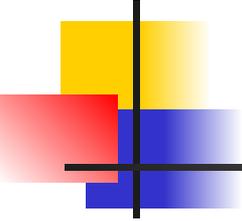
$$dF = kv(\lambda)\varphi_\lambda d\lambda$$

k – максимальная спектральная световая эффективность, т.е. световой поток, создаваемый одним ваттом излучения с длиной волны, для которой $v(\lambda) = 1$.

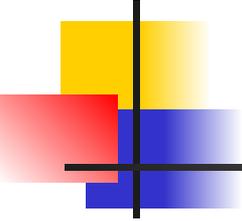
Значению $v(\lambda) = 1$ соответствует $\lambda = 555$ нм. Экспериментально найдено, что $k = 683$ лм/Вт.

Относительная спектральная световая эффективность (график)



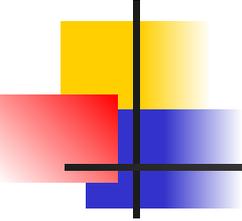


Раздел 2. Источники излучения и их классификация



Классификация источников оптического излучения

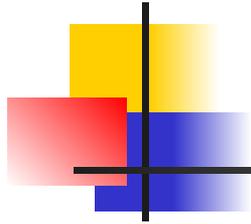
Источник оптического излучения – устройство, преобразующее любой вид энергии в энергию электромагнитного излучения оптического диапазона спектра. В светотехнике за источники излучения принимают не только те тела, которые являются самосветящимися, но также и тела, отражающие или пропускающие свет (несамосветящиеся). Самосветящиеся источники называют также первичными источниками, несамосветящиеся – вторичными.



Классификация источников оптического излучения (продолжение)

- по размеру;
- по характеру распределения силы излучения в пространстве (по форме фотометрического тела);
- по спектральному составу излучения;
- по времени действия (непрерывного свечения и импульсные);
- по цветовой температуре;
- по световой отдаче. **Световая отдача** η – величина (аналог КПД), выражаемая в $лм/Вт$, показывающая сколько света в люменах излучает лампа на каждый ватт подведенной электрической мощности.

Размер



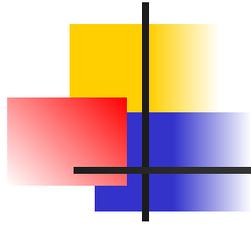
В зависимости от соотношения размеров излучателя и расстояния до исследуемой точки фотоприемника источники излучения условно делятся на две категории:

- точечные источники
- источники конечных размеров

Точечным называется источник, максимальный линейный размер которого минимум на порядок (т.е. в 10 раз) меньше расстояния до точки наблюдения. Все остальные считаются источниками конечных размеров. Для точечных источников выполняется закон обратных квадратов. α – угол между направлением излучения и нормалью к освещаемой поверхности.

$$dE = dI \frac{\cos \alpha}{r^2}$$

Фотометрическое тело



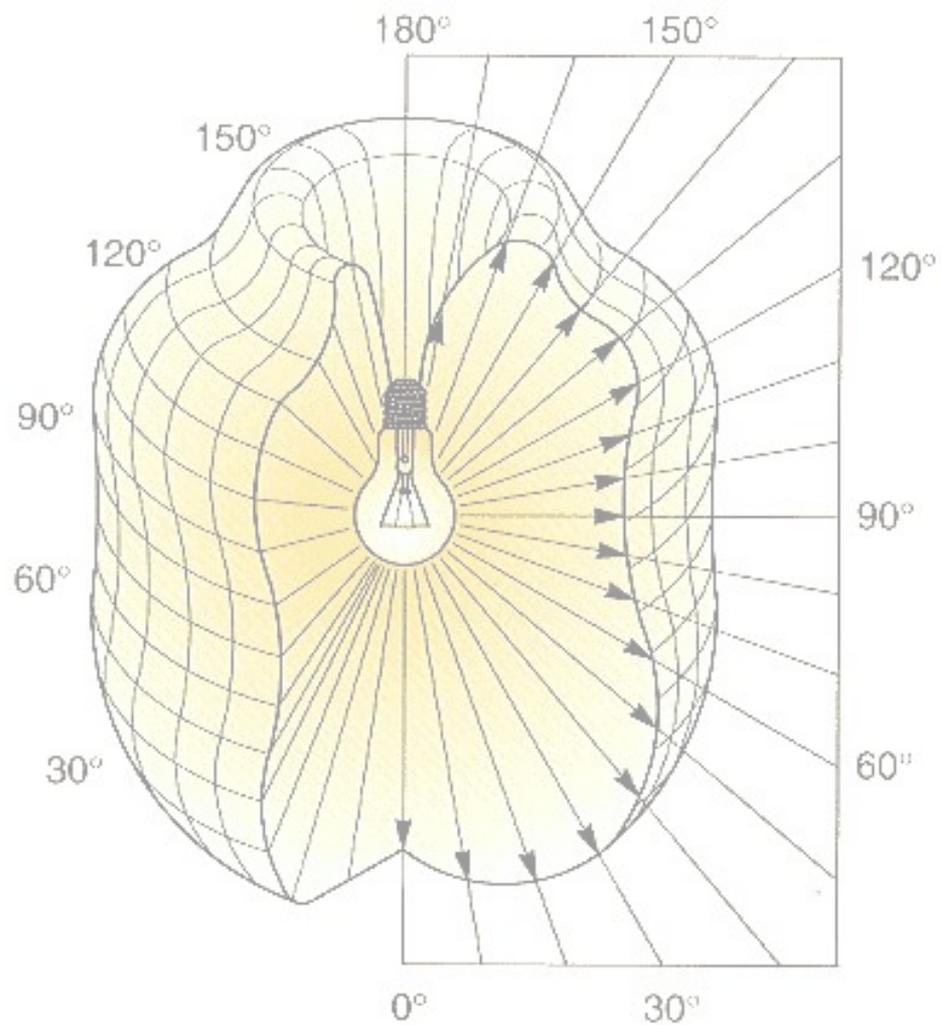
Если из точки, в которой расположен точечный источник излучения, отложить в различных направлениях пространства векторы силы света и через их концы провести поверхность, то получится **фотометрическое тело** источника.

По форме фотометрического тела источника излучатели делятся на:

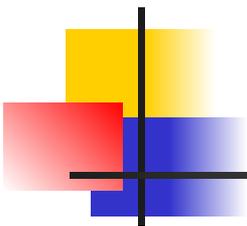
- симметричные;
- несимметричные.

Симметричным называется источник, фотометрическое тело которого есть тело вращения.

Фотометрическое тело (продолжение)



Спектральный состав

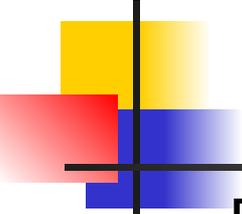


По характеру зависимости спектральной

$\varphi_\lambda = f(\lambda)$ плотности источника света различают спектры:

- **линейчатые** (набор достаточно узких линий);
- **полосатые** (набор полос – достаточно широких участков спектра);
- **сплошные** (непрерывные).

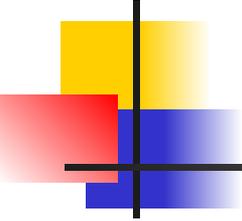
Спектр излучения определяет его цветность: линейчатый спектр – насыщенный хроматический цвет излучения; сплошной спектр – белый цвет излучения с некоторым, слабо выраженным, хроматическим оттенком.



Спектральный состав (продолжение)

По спектральному распределению в светотехнике различают три основных источника излучения: тепловые, газоразрядные (люминесцентные), лазерные.

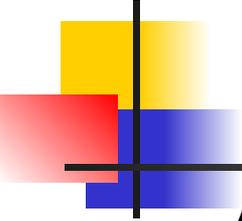
Источник	Спектр
Тепловой	Сплошной
Газоразрядный	Полосатый
Лазерный	Линейчатый



Тепловые источники излучения

Любое тело нагретое выше температуры абсолютного нуля ($0\text{K} = -273,16^\circ\text{C}$), становится излучателем электромагнитных волн. Т.к. возбужденное состояние атомов и молекул вызвано нагреванием, то излучение, посылаемое телом в пространство, называется **тепловым**, а само тело – тепловым источником излучения.

Для оценки и сравнения характеристик тепловых излучателей используют математическую модель – **абсолютно черное тело** (АЧТ или просто – черное тело). АЧТ – идеальный поглотитель: $a=1$ (модель).



Тепловые источники излучения. Формула Планка

Для определения спектральных характеристик АЧТ используется формула Планка:

$$r_{\lambda}(T) = 2\pi h c^2 \lambda^{-5} \left(\exp\left(\frac{ch}{\lambda k T}\right) - 1 \right)^{-1}$$

r_{λ} – спектральная плотность энергетической светимости, т.е. мощность излучения с единицы поверхности (энергетическая светимость), приходящаяся на единичный интервал длин волн;

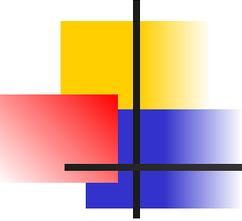
$c = 2,998 \times 10^8$ м/с – скорость света;

λ – длина волны излучения;

$h = 6,626 \times 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка;

$k = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж·К – постоянная Больцмана;

T – термодинамическая температура.

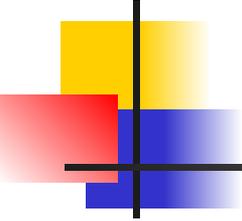


Формула Планка. Закон Стефана-Больцмана

Формула Планка обобщает выведенные до квантовой теории света законы Стефана-Больцмана, Вина, Релея-Джинса.

Проинтегрировав выражение для формулы Планка по всем возможным значениям длин волн, можно получить выражение для энергетической светимости – **закон Стефана-Больцмана**, который гласит: энергетическая светимость абсолютно черного тела растет пропорционально четвертой степени абсолютной температуры:

$$E_e = \sigma T^4, \quad \sigma = 5,67 \times 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$$



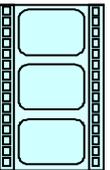
Формула Планка.

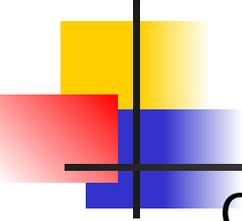
Закон смещения максимума (закон Вина)

Закон смещения максимума, выведенный Вином, указывает длину волны, соответствующую максимальной спектральной плотности энергетической светимости теплового излучателя в зависимости от абсолютной температуры.

$$\lambda_{\max} T = 2,896 \times 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$$

$\lambda_{\max} = 380 \div 780 \text{ нм}$ (для значений температуры излучателя в пределах от $T = 3700 \text{ К}$ до $T = 10000 \text{ К}$)





Применение законов АЧТ к излучению реальных тел

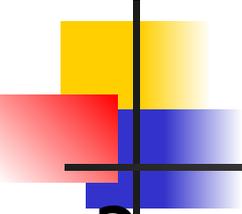
Согласно закону сохранения энергии, чем больше энергии поглощает тело, тем больше оно должно излучать. В противном случае оно нагревалось бы само собой.

Для АЧТ $a=1$ вне зависимости от длины волны. Для реального тела (нечерное тело, селективный излучатель) всегда $a(\lambda) < 1$, а т.к. для каждого тела излучательная способность пропорциональна поглощательной, то:

$$r_{\lambda}^H = \alpha^H(\lambda) r_{\lambda}$$

Для серого излучателя коэффициент поглощения не зависит от длины волны и справедливо соотношение:

$$r_{\lambda}^H = \alpha^H r_{\lambda}$$

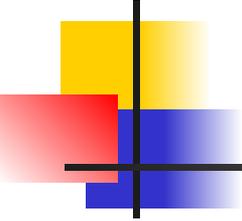


Метод эквивалентных температур

Эквивалентной называется такая температура абсолютно черного тела, при которой его излучение по одной из характеристик равно излучению исследуемого тела.

За характеристики излучения, на основе которых определяются эквивалентные режимы, приняты: *плотность потока излучения* (энергетическая светимость), *яркость излучения* в узкой области спектра и *цветность* излучения.

В зависимости от выбора характеристики, по которой производится сопоставление эквивалентности излучения, различают следующие эквивалентные температуры излучения: *радиационная, яркостная, цветовая.*

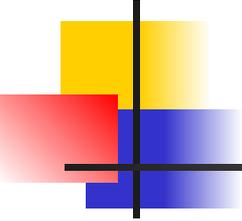


Метод эквивалентных температур (продолжение)

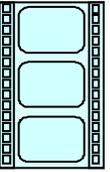
Радиационная (энергетическая) температура

(T_p) – температура черного тела, при которой плотность его излучения равна плотности излучения исследуемого реального тела при заданной (истинной) температуре.

Яркостная температура ($T_я$) – температура черного тела, при которой его яркость в зоне $\lambda=655$ нм равна яркости в той же зоне спектра исследуемого излучателя при заданной (истинной) температуре.

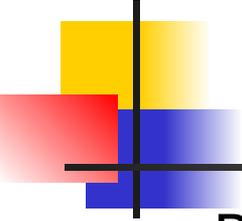


Метод эквивалентных температур (окончание)



Цветовая температура (T_c) – температура черного тела, при которой цветность (спектральный состав) его излучения одинакова с цветностью исследуемого излучения при заданной (истинной) температуре.

Многие излучающие тела имеют цветность, не совпадающую с цветностью черного тела *ни при какой его температуре*. Тогда подыскивают такую цветность черного тела, которая по зрительному восприятию ближе всего к цветности селективного излучателя. Соответствующую температуру T_c черного тела называют *коррелированной цветовой температурой* селективного излучателя.

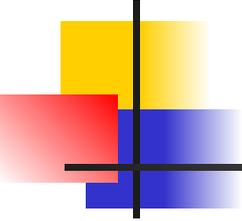


Газоразрядные источники излучения

В газоразрядном источнике света излучение оптического диапазона спектра возникает в результате электрического разряда в атмосфере инертных газов, паров металлов или их смесей.

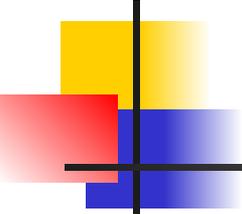
Под термином *газовый разряд* понимают совокупность явлений, возникающих в газе при пропускании через него электрического тока.

В зависимости от используемой части вольт-амперной характеристики различают несколько видов разряда. В источниках света используют в основном тлеющий (малые токи) и дуговой (большие токи) разряды.



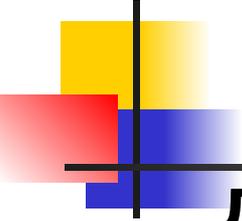
Газоразрядные источники излучения. Преимущества

- более высокая световая отдача и срок службы (до 117 лм/Вт, до 20 000 ч);
- могут иметь линейчатый спектр с расположением линий в любой части оптического диапазона;
- имеют яркость значительно большую, чем яркость лампы накаливания;
- существует возможность создания коротких вспышек большой мощности.



Газоразрядные источники излучения. Недостатки

- линейчатый спектр газоразрядных ламп не позволяет использовать их в качестве источников освещения;
- газоразрядным лампам присуще явление пульсации светового потока и появление связанного с ним стробоскопического эффекта, опасного для людей;
- существует необходимость применения балансного устройства;
- напряжение зажигания газового разряда значительно превышает рабочее напряжение лампы;
- длительный период разгорания ламп (до 15 мин);

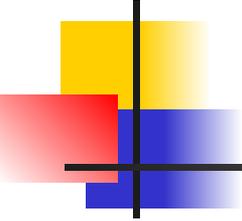


Явление люминесценции.

Люминесцентные источники излучения

Люминесценция – способность некоторых веществ излучать энергию, накопленную в пределах атома, при переходе электронов с более высоких энергетических уровней на более низкие.

Различают возбужденное и невозбужденное состояние атомов. В невозбужденном (устойчивом) состоянии атом может находиться сколь угодно долго. Получая энергию извне, электроны атома переходят на более высокие энергетические уровни, поглощая энергию порциями. В возбужденном состоянии атом находится некоторое конечное время, после чего релаксирует в основное состояние с испусканием фотона определенной длины волны.



Явление люминесценции (продолжение)

Вещество, в состав которого входят возбуждаемые атомы, называется *люминофором*. В зависимости от того, за счет какой энергии происходит возбуждение атома, различают следующие виды люминесценции:

фотолюминесценцию

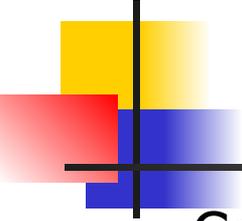
рентгенолюминесценцию

катодолюминесценцию

электролюминесценцию

радиолюминесценцию

хемилюминесценцию и биолюминесценцию



Явление люминесценции (продолжение)

Согласно определению Вавилова, **люминесценцией** называется излучение, избыточное над тепловым, при длительности его равной или большей 10^{-10} с.

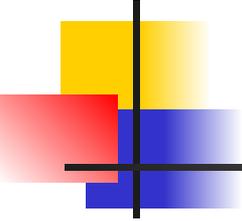
$$r_{\lambda}^{\text{л}}(T) = r_{\lambda}^{\text{п}}(T) - \varepsilon(\lambda, T)r_{\lambda}(T)$$

$r_{\lambda}^{\text{л}}(T)$ – спектральная плотность энергетической светимости люминесценции;

$r_{\lambda}^{\text{п}}(T)$ – полная спектральная плотность энергетической светимости излучения тела (люминофора);

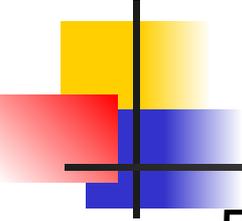
$\varepsilon(\lambda, T)$ – спектральный коэффициент излучения;

$r_{\lambda}(T)$ – спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела.



Явление люминесценции (продолжение)

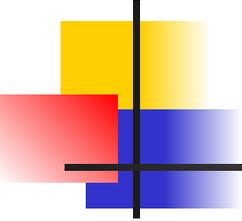
Дополнительными признаками, позволяющими отличить излучение люминесценции от других излучений, являются *селективность*, определяемая свойствами люминофора, и *некогерентность* – существенный разброс фотонов по фазовым состояниям и степени поляризации.



Люминесцентные источники излучения

Люминесцентная лампа выполнена в виде стеклянной трубки, в концы которой впаяны электроды. Разряд происходит в атмосфере аргона с примесью паров ртути. Ртуть излучает несколько спектральных линий в видимой и ближней UV-областях (линейчатый спектр).

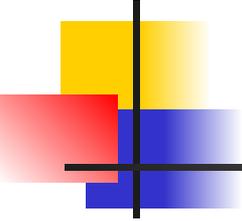
Внутренняя поверхность трубки покрыта тонким слоем люминофора, который, поглощая коротковолновое излучение, излучает сплошной спектр. Часть излучения газового разряда проходит через порошок люминофора непоглощенной, образуя острые максимумы на кривой спектральной плотности мощности. Световая отдача $45 \div 80$ лм/Вт.



Светодиодные источники

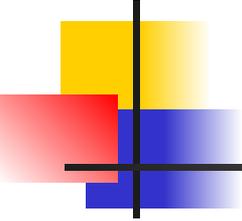
Светодиоды (светоизлучающие диоды, LED – light emitting diodes) – полупроводниковые приборы, работа которых основана на явлении излучательной рекомбинации носителей заряда в полупроводниковом р-п-переходе. Излучательная рекомбинация наблюдается при смещении перехода в прямом направлении и является одним из вариантов электролюминесценции.

- полосатый спектр, ширина полосы 20÷50 нм;
- излучение в диапазоне 360÷950 нм;
- высокая световая отдача до **100** лм/Вт, до **80** лм/Вт;
- возможность получения любого оттенка света.



Лазеры

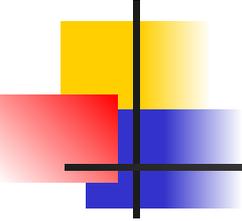
Лазеры, или оптические квантовые генераторы (ОКГ) – это устройства для генерации когерентного оптического излучения, основанные на использовании эффекта вынужденного излучения. Термин «лазер» происходит от английской аббревиатуры Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, что означает усиление света с помощью вынужденного излучения.



Лазеры (продолжение)

Основными свойствами лазерного излучения, отличающими его от других источников света, являются:

- высокая когерентность;
- возможность генерации импульсов предельно малой длительности;
- высокая мощность излучения в импульсном режиме генерации.



Лазеры (продолжение)

Лазеры различаются:

– по типу активной среды

газовые (атомные, ионные, молекулярные);

твердотельные (на примесных кристаллах и стеклах;

полупроводниковые, на центрах окраски),

жидкостные

– по режиму генерации

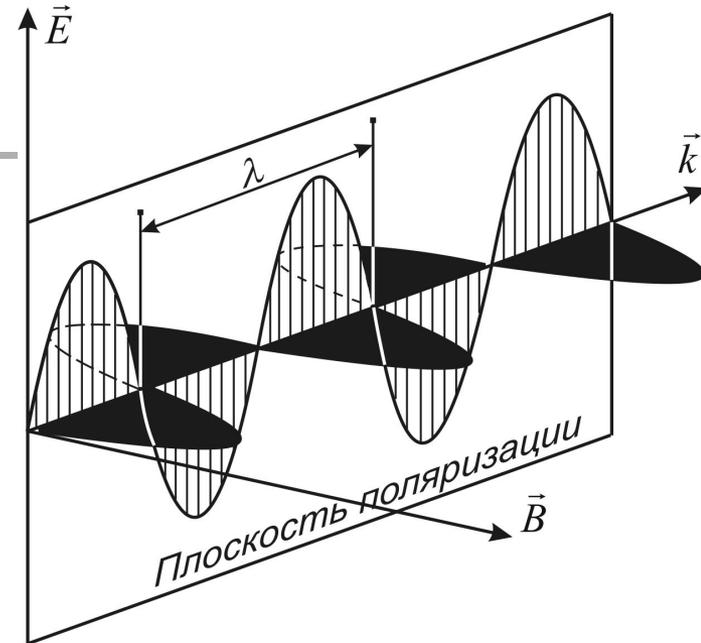
непрерывные,

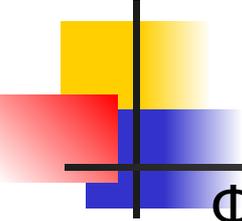
импульсные (в режиме свободной генерации, с модуляцией добротности)

Принцип работы лазера (факультативно)

В бегущей плоской ЭМВ векторы напряженности электрического и магнитного полей в каждой точке и в каждый момент времени образуют с волновым вектором (направлением распространения) *правую тройку векторов*.

В этом заключается свойство *поперечности* световых волн. Электрический и магнитный векторы выступают в электромагнитной волне *равноправно*. Однако, фотохимическое, фотоэлектрическое, физиологическое действия света связаны главным образом с электрическим вектором. Плоскость, в которой происходят колебания вектора, называется *плоскостью поляризации* электромагнитной волны.





Принцип работы лазера (продолжение)

Фотон – материальный носитель света, не имеет массы покоя, электрического заряда, в любой системе отсчета скорость фотона постоянна и равна скорости света в данной среде (изменяются: энергия, длина волны, частота).

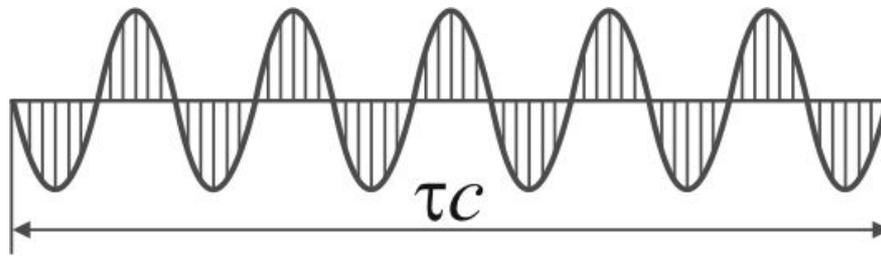
Чтобы описать фотон необходимо задать его импульс и поляризацию.

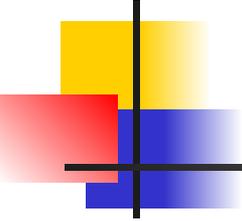
Эти четыре значения определяют *фотонное состояние*. Фотоны, находящиеся в одном фотонном состоянии, **принципиально неразличимы**.

$$\vec{p} = (p_x, p_y, p_z), \quad \gamma = 0 \text{ или } 1, \quad |\vec{p}| = \frac{\varepsilon}{c}$$

Принцип работы лазера (продолжение)

Поток фотонов, отличающихся энергией, направлением импульса, поляризацией является «неупорядоченным», его нельзя представить в виде плоской монохроматической волны. Неупорядоченное излучение моделируют как набор *волновых цугов*. Математически волновой цуг представляют в виде обрезка плоской монохроматической волны, обладающей характеристиками данного фотонного состояния: T – длительность цуга, τc – пространственная длина цуга.





Принцип работы лазера (продолжение)

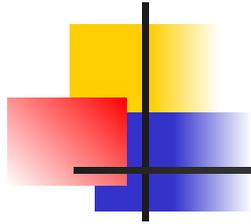
Когерентность световой волны определяется как ее способность к интерференции.

Под *интерференцией* света понимают широкий круг явлений, в которых при наложении пучков света результирующая интенсивность не равна сумме интенсивностей отдельных пучков: в одних местах она больше, в других меньше, т.е. возникают чередующиеся темные и светлые участки – интерференционная картина.

Степень когерентности световых волн определяется характером расселения фотонов по состояниям. При идеальной когерентности, которой соответствует плоская монохроматическая волна, все без исключения фотоны находятся в одном единственном состоянии.

Степень некогерентности

$$\xi = \frac{\Delta\nu}{\nu_0}$$



ν_0 – средняя частота излучения, $\Delta\nu$ – частотный интервал, характеризующий разброс фотонов по состояниям.

Степень расходимости измеряется углом раствора конуса в пределах которого распространяется световая волна; этот угол называется углом расходимости. Чем ближе форма волнового фронта к плоскости, тем меньше угол расходимости.

Степень поляризации на практике измеряется с помощью кристалла-поляризатора, пропускающего волны с колебаниями вектора только в определенной плоскости.

$$\omega = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

Время когерентности определяется степенью некогерентности пучка:

$$\xi \approx \frac{1}{\tau\nu_0}$$

$$\Delta\nu = \frac{1}{\tau}$$

Лазерный усилитель

Переход атома из одного стационарного состояния в другое может происходить скачком. Для такого элементарного процесса выполняется закон сохранения энергии:

$$\varepsilon_n - \varepsilon_m = h\nu$$

$\varepsilon_{n,m}$ – энергии уровней, между которыми осуществляется переход;

h – постоянная Планка; ν – частота испускаемого (поглощаемого) фотона.

При этом, если $\varepsilon_n > \varepsilon_m$, то фотон испускается; в противном случае имеет место акт поглощения фотона.

В течение промежутка времени dt произойдет $dN_{21} = A_{21}N_2 dt$ число спонтанных переходов. A_{21} - вероятность спонтанного перехода атома из возбужденного состояния в основное. Изменение числа N_2 возбужденных атомов за промежуток времени dt составит:

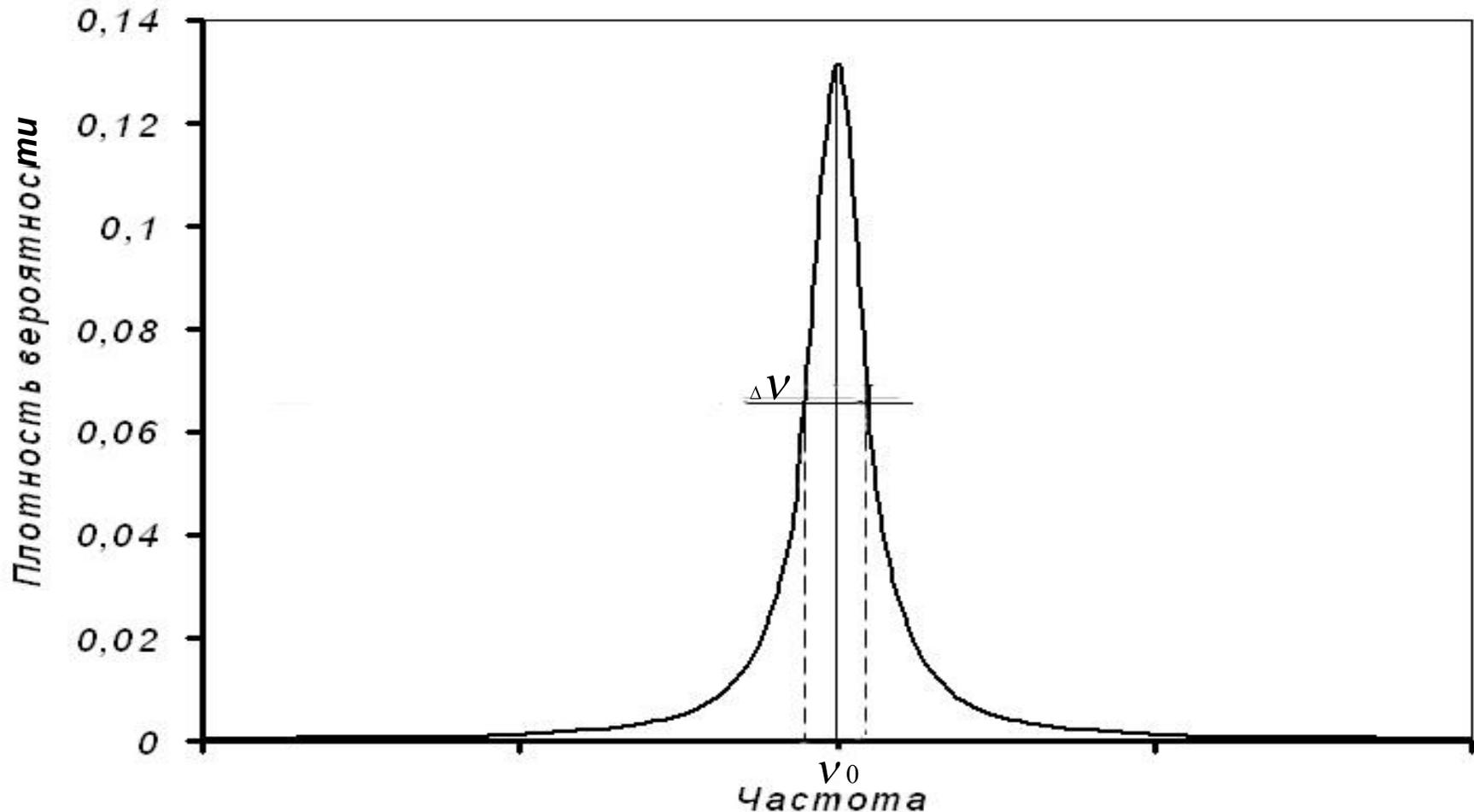
$$dN_2 = -A_{21}N_2 dt$$

$$N_2(t) = N_{20} \exp(-A_{21}t) = N_{20} \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right)$$

N_{20} – число возбужденных атомов в начальный момент времени

Промежуток времени $\tau = 1/A_{21}$, течение которого число возбужденных атомов уменьшается в e раз, называется **средним временем жизни атома** в возбужденном состоянии. Убывает со временем интенсивность свечения газа возбужденных атомов, излучаемый при этом свет характеризуется частотой и узким спектральным распределением, заполняющим интервал частот $\Delta\nu \approx 1/\tau$

Контур такой спектральной линии имеет **лоренцевую форму** :



В электромагнитном поле кроме спонтанного испускания будут происходить и процессы возбуждения атомов, т.е. переходы из основного состояния в возбужденное с поглощением фотонов с энергией:

$$h\nu = \varepsilon_2 - \varepsilon_1$$

Вероятность такого перехода в единицу времени пропорциональна плотности энергии электромагнитного поля U_ν на частоте перехода ν и некоторому коэффициенту B_{12} , характеризующему вероятность возбуждения атома. Среднее число переходов dN_{12} из основного состояния в возбужденное за промежуток времени dt пропорционально также числу атомов N_1 в основном состоянии:

$$dN_{12} = N_1 B_{12} U_\nu dt \quad dN_{21} = N_2 (A_{21} + B_{21} U_\nu) dt$$

Изменение числа dN фотонов в потоке при прохождении слоя толщиной $dx = c dt$ с учетом процессов поглощения и вынужденного испускания равно:

$$dN = (N_2 B_{21} - N_1 B_{12}) U_\nu \frac{dx}{c}$$

Так как рассматривается монохроматичный пучок, то справедлива замена $U_\nu = U \cdot f(\nu)$

$$dN = (N_2 - N_1) B_{12} U f(\nu) \frac{dx}{c} \quad N_2 < N_1$$

Средняя плотность потока энергии S световой волны равна произведению объемной плотности U на скорость света: $S = cU$

$$dS = \frac{h\nu}{c} (N_2 - N_1) B_{12} f(\nu) S dx$$

Закон Бугера:

$$S(x) = S_0 \exp(-\alpha x)$$

$$\frac{dS}{dx} = -\alpha S(x)$$

$$\alpha \equiv -\frac{h\nu}{c} (N_2 - N_1) B_{12} f(\nu)$$

Эта формула выражает коэффициент поглощения α через коэффициент Эйнштейна B_{12} и заселенности уровней N_1 и N_2 .

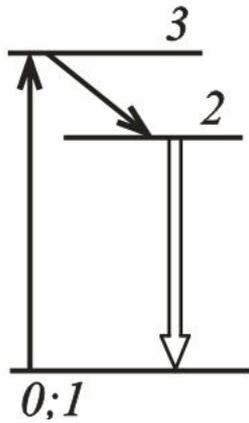
$N_2 > N_1$ - **инверсия заселенностей**. Среда, в которой реализована инверсия заселенностей, называется **активной**. ($\alpha < 0$)

Конструктивный элемент лазера, в котором реализуется инвертированная активная среда, называется **активным элементом**. Активный элемент – среда в любом агрегатном состоянии, содержащая специально подобранные атомы, ионы или молекулы, называемые **активными центрами**, в результате высвечивания которых и возникает лазерное излучение.

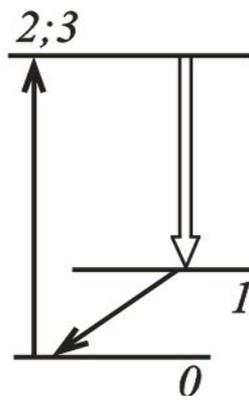
Методы создания инвертированной активной среды – **накачка**.

Типовые схемы энергетических уровней активных центров

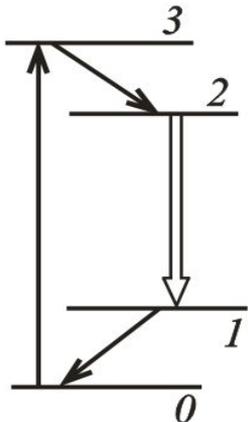
Кроме **верхнего(2)** и **нижнего(1)** рабочих уровней выделяют **основной уровень(0)** и уровень **возбуждения(3)**.



а) В течение малого промежутка времени $10^{-8} - 10^{-9}$ с активные центры переходят на верхний рабочий уровень. Верхний рабочий уровень имеет время жизни $10^{-4} - 10^{-2}$ с, т.е. является **метастабильным**. Недостаток: нижний рабочий уровень должен иметь малую заселенность для соблюдения условия инвертированности среды.



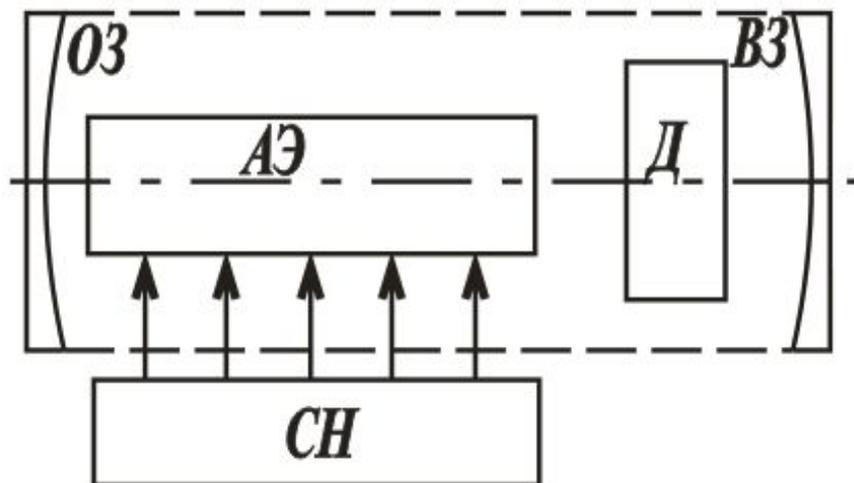
б) Нижний рабочий уровень обладает относительно малым временем жизни. Недостаток: уровень возбуждения должен иметь заметную ширину для максимального использования энергии накачки, верхний рабочий уровень должен быть узким, чтобы иметь большое время жизни для соблюдения условия инвертированности среды.



в) Недостаток: в данной схеме больше вспомогательных переходов, каждый из которых влечет дополнительные потери в энергии.

Принципиально непригодной является двухуровневая схема

Функциональная схема типового лазера:



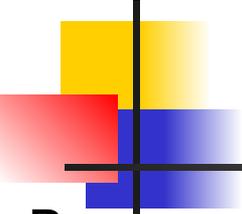
СН - система накачки, состоящая из источника энергии и устройства её передачи активной среде

АЭ – активный элемент: среда в любом агрегатном состоянии с малым количеством введенных активных центров, на которых создается инверсия заселенности и в которой реализуется квантовое усиление света

ОЗ, ВЗ – оптический резонатор, состоящий из двух зеркал (одно полупрозрачное) на одной оптической оси; обеспечивает положительную обратную связь для создания условий генерации лазерного излучения и избирательность фотонных состояний для управления излучением и обеспечения когерентности излучения

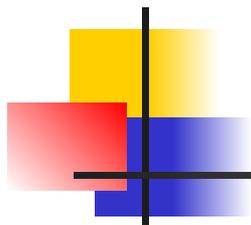
Д – дополнительное устройство





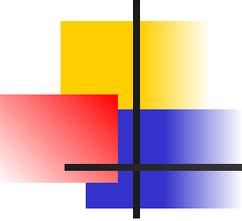
В полиграфии применяются следующие типы лазерных источников света:

- аргон-ионный голубой лазер с длиной волны 488 нм
- гелий-неоновый красный лазер с длиной волны 633 нм
- маломощный красный лазерный диод с длиной волны 670 нм
- мощный инфракрасный лазерный диод с длиной волны 830 нм
- инфракрасный мощный лазер Nd YAG на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом с длиной волны 1064 нм
- зеленый лазер на иттрий-алюминиевом гранате с двойной частотой Nd YAG с длиной волны 670 нм



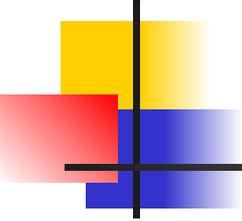
Раздел 3.

Преобразование излучения оптическими средами



Оптические среды и фотоприемники

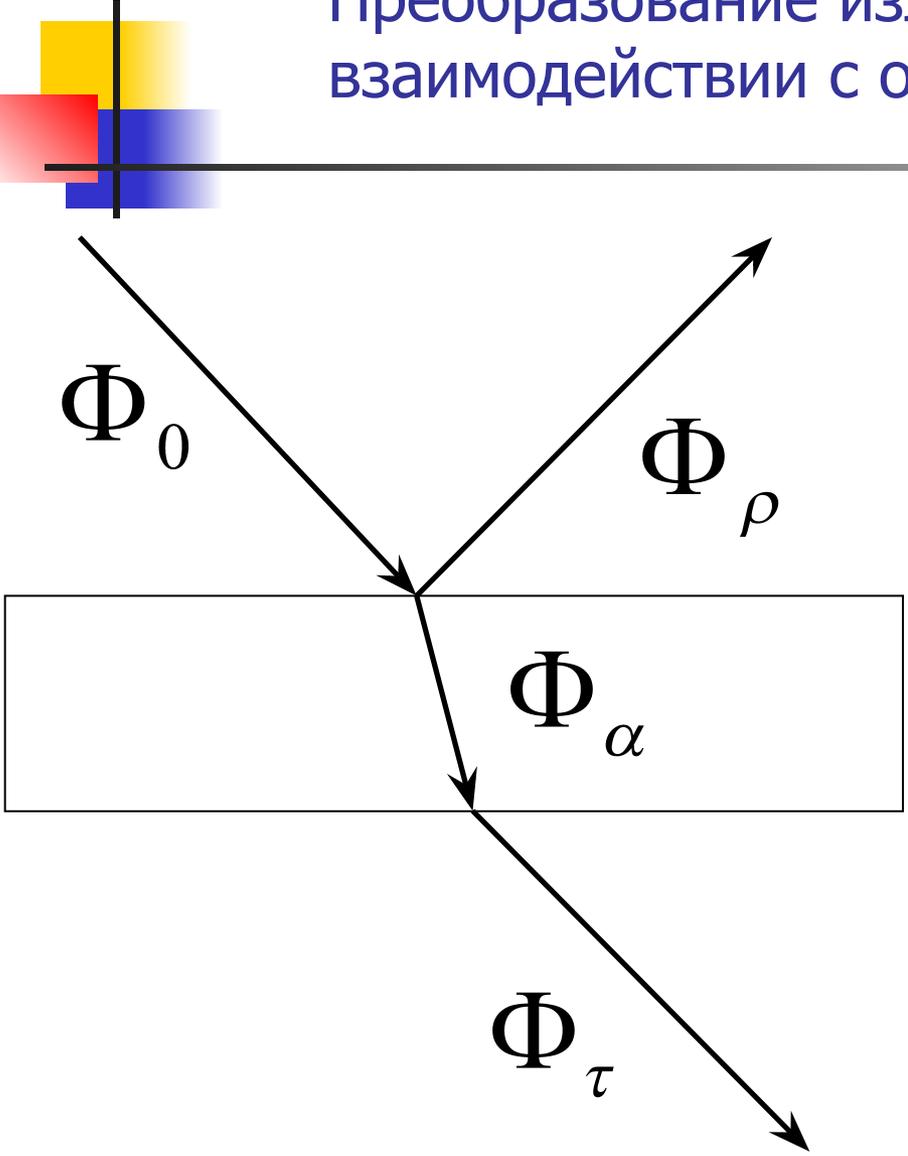
В каждом акте взаимодействия света со средой изменяются как свойства излучения, так и среда. Если тело предназначено для изменения свойств излучения, то такая среда называется **оптической**. Если среда используется для получения полезного фотопревращения, то такая среда называется **фотоприемником**.



Изменение характеристик излучения при взаимодействии с оптической средой

1. Пространственные изменения (отражение, преломление, дифракция)
2. Поглощение (спектрально-избирательное, спектрально-неизбирательное)
3. Структурные изменения излучения (поляризация, интерференция).

Преобразование излучения при взаимодействии с оптической средой



$$\Phi_0 = \Phi_\rho + \Phi_\alpha + \Phi_\tau$$

ρ – reflection (отражение)

α – absorption (поглощение)

T – transmission (пропускание)

Оптические и световые коэффициенты

Способность оптической среды к преобразованию излучения оценивается макрохарактеристиками: коэффициентом отражения ρ , коэффициентом пропускания τ , коэффициентом поглощения α :

$$\rho = \frac{\Phi_{\rho}}{\Phi_0} \quad \alpha = \frac{\Phi_{\alpha}}{\Phi_0} \quad \tau = \frac{\Phi_{\tau}}{\Phi_0}$$

Если коэффициенты рассчитываются по потоку, то они называются *оптическими*, если по световому потоку – *световыми* (фотометрическими):

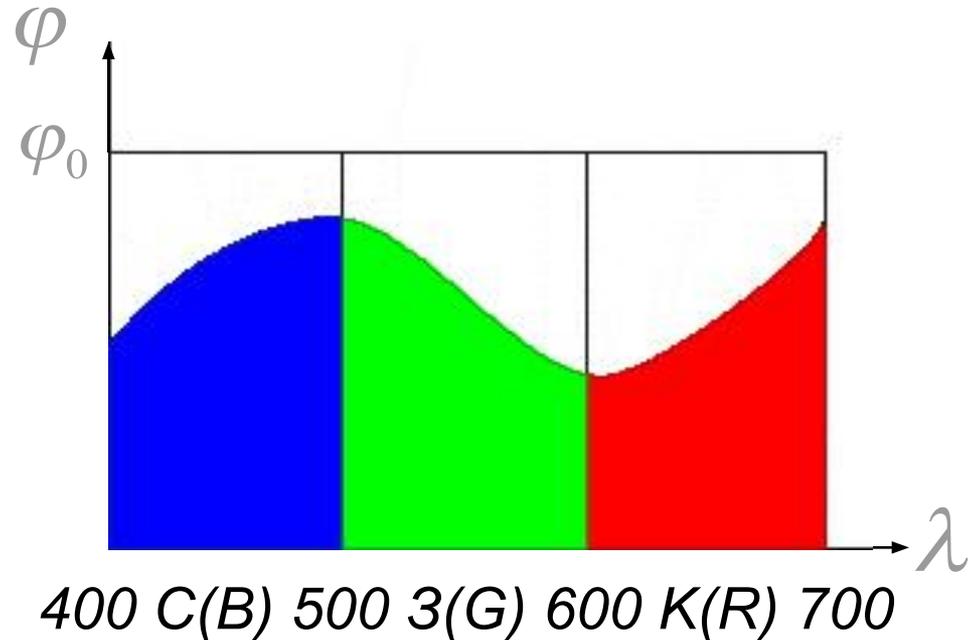
$$\rho_{св} = \frac{F_{\rho}}{F_0} \quad \alpha_{св} = \frac{F_{\alpha}}{F_0} \quad \tau_{св} = \frac{F_{\tau}}{F_0}$$

Оптические и световые коэффициенты (продолжение)

Коэффициенты могут быть интегральными (число), зональными (число) и спектральными (функция). Для любой пассивной среды $\rho + \tau + \alpha = 1$. Например, для коэффициента пропускания:

$$\varphi_{\tau}(\lambda) = \varphi_0(\lambda) \cdot \tau(\lambda)$$

$$\tau = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_0(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_0(\lambda) d\lambda}$$



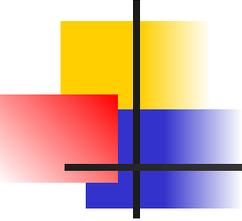
Выбор пределов интегрирования или суммирования определяет, о каком коэффициенте идет речь – зональном или интегральном.

$$\tau = \frac{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_0(\lambda) \cdot \tau(\lambda)}{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_0(\lambda)}$$

$$\tau_{св} = \frac{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_0(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot \nu(\lambda)}{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_0(\lambda) \cdot \nu(\lambda)}$$

$$\tau_{св} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_0(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot \nu(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_0(\lambda) \cdot \nu(\lambda) d\lambda}$$

Операции суммирования применяются при практическом использовании как численное интегрирование. Аналогично для ρ, α

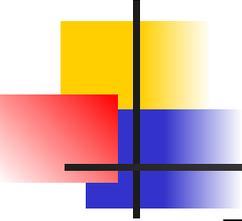


Оптическая плотность

На практике вместо коэффициентов пропускания и отражения используют *оптическую плотность*:

$$D_{\tau} = \lg \frac{1}{\tau} = -\lg \tau, \quad D_{\rho} = \lg \frac{1}{\rho} = -\lg \rho$$

Оптическая плотность удобнее в использовании на практике, т.к. связана с концентрацией светопоглощающего вещества и зрительным восприятием наблюдаемого объекта простыми зависимостями. Единица измерения оптической плотности – Бел [В, Б].

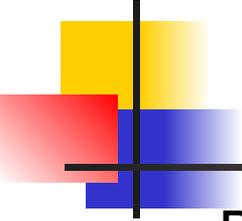


Оптическая плотность (продолжение)

При замене коэффициентов соответствующими потоками получаются выражения, отражающие *физический смысл оптической плотности*:

$$D_{\tau} = \lg \frac{\Phi_0}{\Phi_{\tau}} = \lg \Phi_0 - \lg \Phi_{\tau}, \quad D_{\rho} = \lg \frac{\Phi_0}{\Phi_{\rho}} = \lg \Phi_0 - \lg \Phi_{\rho}$$

Чем больше света поглощается средой, тем она темнее и выше её оптическая плотность как в проходящем, так и в отраженном свете. На практике приборы калибруются таким образом, чтобы $\tau + \alpha = 1$ (в проходящем свете) $\rho + \alpha = 1$ (в отраженном свете)



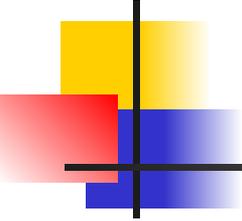
Оптическая плотность (продолжение)

Визуальные плотности определяются по световому потоку:

$$D_{\text{виз } \rho} = \frac{1}{\rho_{\text{св}}} = \lg \frac{F_0}{F_\rho}$$

Для *нейтрально-серых* оптических сред (серых светофильтров, серых шкал, черно-белых изображений) оптические и световые коэффициенты совпадают, следовательно, совпадают и оптические плотности:

$$D = D_{\text{виз}}$$

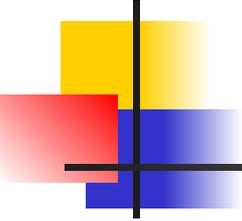


Оптическая плотность (продолжение)

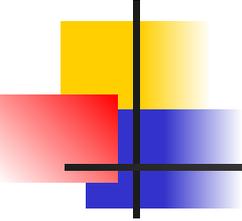
Спектральные (монохроматические) оптические плотности (или оптические плотности, определенные для монохроматических излучений) также совпадают:

$$\begin{aligned} D_{\text{виз } \rho}(\lambda) &= \lg \frac{1}{\rho_{\text{св}}(\lambda)} = \lg \frac{F_0(\lambda)}{F_\rho(\lambda)} = \\ &= \lg \frac{\varphi_0(\lambda) \cdot \nu(\lambda)}{\varphi_\rho(\lambda) \cdot \nu(\lambda)} = \lg \frac{\varphi_0(\lambda)}{\varphi_\rho(\lambda)} = \\ &= \lg \frac{1}{\rho(\lambda)} = D_\rho(\lambda), \quad \text{при } \lambda = \text{const} \end{aligned}$$

Для **ЦВЕТНЫХ** сред визуальная и оптическая плотности не совпадают, т.к. они рассчитываются по разным формулам:


$$D_{\rho} = \lg \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_0(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_0(\lambda) \cdot \rho(\lambda) d\lambda}$$

$$D_{\text{виз } \rho} = \lg \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_0(\lambda) \cdot v(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_0(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot v(\lambda) d\lambda} \quad \text{формула денситометра}$$



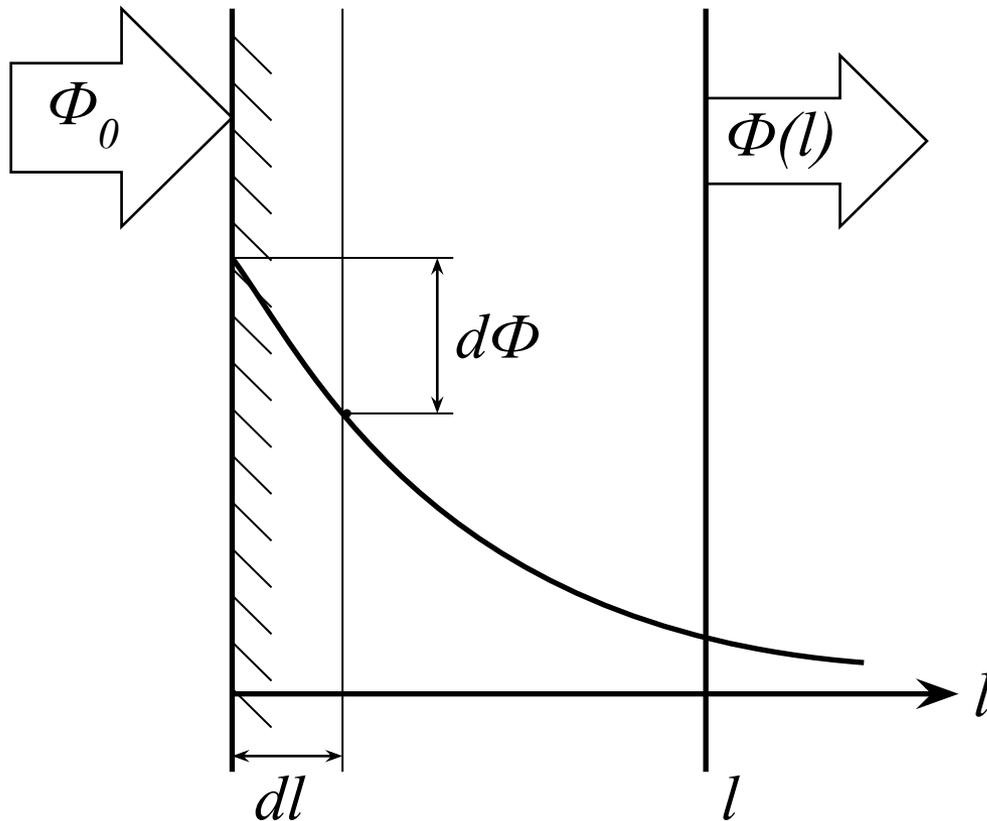
Закон Бугера-Ламберта-Бэра

Закон связывает поглощение монохроматического ($\lambda = \text{const}$) излучения гомогенной (прозрачной, однородной) средой с толщиной слоя этой среды.

Закон выведен для «геометрии узкого пучка» и при условии отсутствия отражения на границе раздела сред, т.е. $\rho = 0$, $\tau + \alpha = 1$.

«Геометрия узкого пучка» – условие, при котором фотон, однажды провзаимодействовавший со средой, исключается из дальнейшего рассмотрения.

Закон Бугера-Ламберта-Бэра

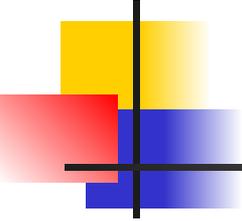


Бугер-Ламберт

$$-\frac{d\Phi}{\Phi} = K_{\lambda} dl$$

$$\Phi_{\lambda}(l) = \Phi_{\lambda}(0) \cdot \exp(-K_{\lambda} l)$$

K_{λ} - коэффициент поглощения, не зависящий от мощности излучения, но зависящий от природы вещества поглотителя


$$K_{\lambda} = \chi'_{\lambda} C$$

Бэр (Бер, Беер) установил связь коэффициента поглощения K_{λ} с концентрацией C светопоглощающей среды.

Объединенный закон Бугера-Ламберта-Бэра:

$$\Phi_{\lambda}(l) = \Phi_{\lambda}(0) \cdot e^{-\chi'_{\lambda} Cl}$$

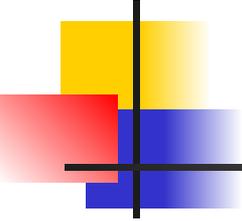
χ_{λ} – удельный показатель поглощения;

C – концентрация растворенного поглощающего вещества.

На практике переходят от основания натуральных логарифмов «e» к основанию «10», что позволяет перейти к логарифмической форме записи закона и связи с оптической плотностью. Индекс λ также опускают, помня о том, что закон выведен для монохроматического излучения:

$$\Phi(l) = \Phi(0) \cdot 10^{-\chi Cl}, \quad D = \chi Cl$$

Для сложного излучения, т.е. для света от реальных источников:



$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = \frac{\int_{\lambda} \varphi_0(\lambda) \cdot 10^{-\chi(\lambda) \cdot C \cdot l} d\lambda}{\int_{\lambda} \varphi_0(\lambda) d\lambda}$$

Для *нейтрально-серых* сред можно считать, что $\chi(\lambda) = \text{const}$. Степень выносится за знак интеграла и интегралы сокращаются, получается снова:

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = 10^{-\chi C l}, \quad D = \chi C l$$

Кроме того, для нейтрально-серых сред можно перейти от потоков излучения к световым потокам – закон выполняется.

Если в среде присутствует несколько веществ с различными удельными показателями поглощения и концентрациями (гетерогенная среда), то используется выражение:

$$\Phi = \Phi_0 \cdot 10^{-(\chi_1 C_1 + \chi_2 C_2 + \dots + \chi_n C_n)l}$$

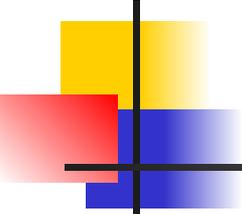
$$D_\Sigma = (\chi_1 C_1 + \chi_2 C_2 + \dots + \chi_n C_n)l$$

Если поглощающий материал слоистый и слои различаются по всем параметрам, то справедливо выражение:

$$D_\Sigma = \chi_1 C_1 l_1 + \chi_2 C_2 l_2 + \dots + \chi_n C_n l_n = D_1 + D_2 + \dots + D_n,$$

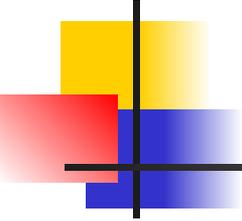
из которого следует правило **аддитивности оптических плотностей**: при сложении сред их оптические плотности складываются, а, учитывая основные свойства показательных функций, оптические показатели перемножаются:

$$\tau_\Sigma = \prod_{i=1}^n \tau_i$$



Условия применения закона Бугера – Ламберта – Бэра

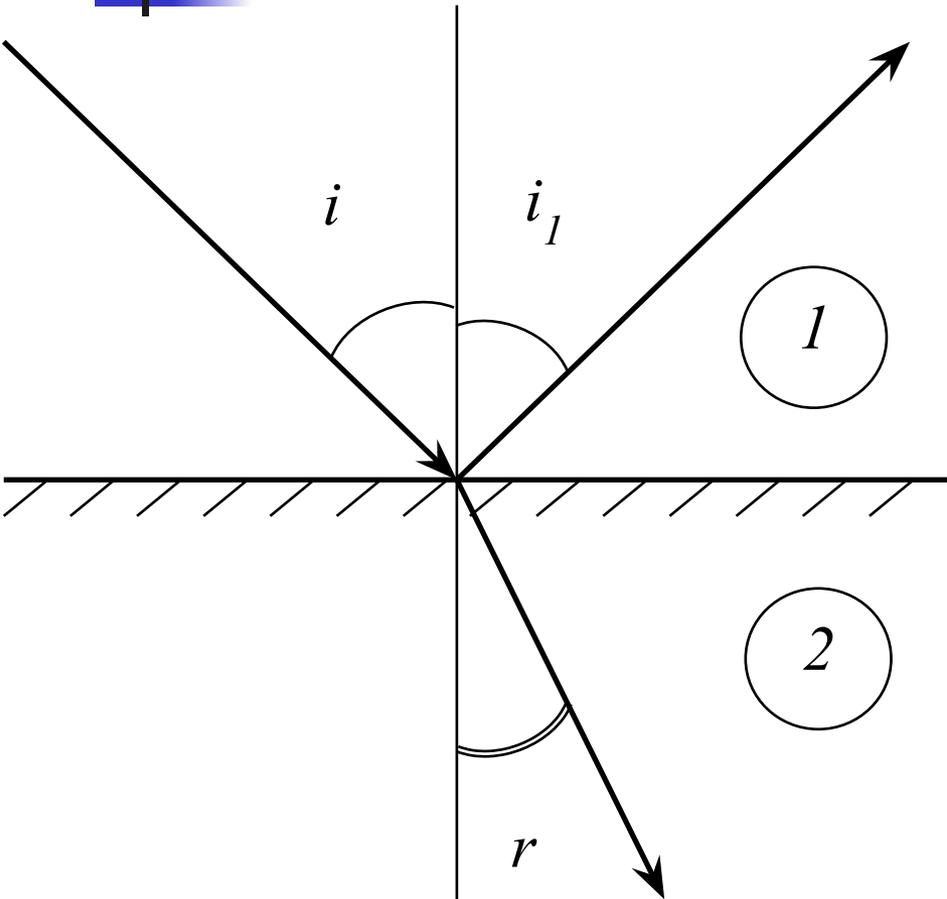
1. монохроматическое излучение в сочетании с любой средой;
2. любое цветное излучение в сочетании с нейтрально-серой средой;
3. любое излучение в сочетании с любой средой, если во время эксперимента и среда и излучение остаются неизменными. В этом случае говорят об эффективном удельном показателе поглощения среды $\chi_{эфф}$, который считается зависимым как от свойств среды, так и от свойств излучения;
4. возможен переход от потоков излучения к световым потокам, если соблюдаются условия пп. 1 или 2;



Условия применения закона Бугера – Ламберта – Бэра (продолжение)

5. закон выведен для геометрии узкого пучка и в условии отсутствия отражения от среды;
6. закон выведен для гомогенных (прозрачных) сред. Для гетерогенных (мутных) сред закон в общем случае не выполняется, но выполняется с оговорками п.3;
7. для высоких концентраций и/или большой толщины среды наблюдается отклонение закона $D = \chi Cl$ от линейной зависимости. ***Оптическая плотность не может возрастать до бесконечности!***

Изменение пространственного распределения излучения при взаимодействии с оптической средой



Закон зеркального отражения

$$i = i_1$$

Абсолютный показатель преломления среды

$$n_1 = \frac{c}{v_1} \quad n_2 = \frac{c}{v_2}$$

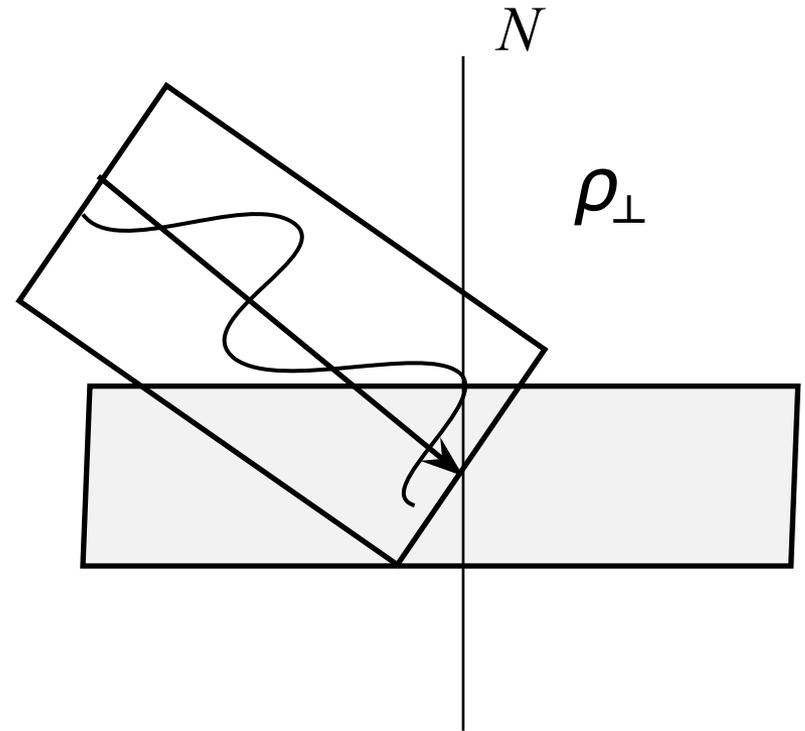
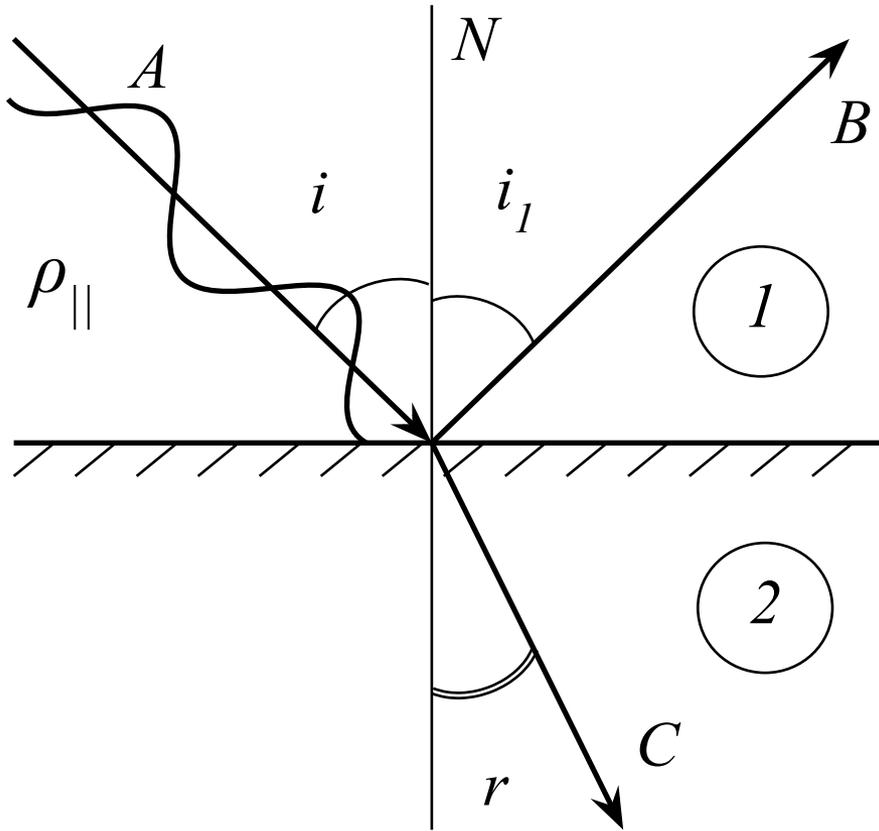
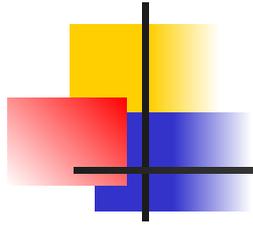
Относительный показатель преломления среды

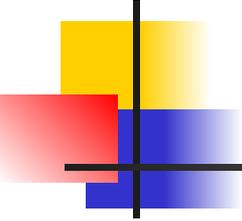
$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} \quad n_{\text{возд}} \cong 1$$

Закон преломления

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r$$

Преломленный свет – свет, прошедший через границу раздела сред. На границе раздела сред поглощение отсутствует, следовательно $a=0$, $\rho+\tau=1$. Чтобы оценить τ , достаточно оценить ρ .





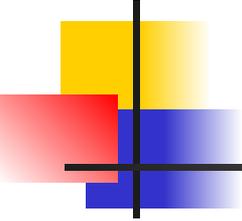
Формулы Френеля для определения доли отраженного света

$$\rho_{\parallel} = \frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)}; \quad \rho_{\perp} = \frac{\operatorname{tg}^2(i-r)}{\operatorname{tg}^2(i+r)};$$

$$\rho = \frac{1}{2}(\rho_{\parallel} + \rho_{\perp}) = \frac{1}{2} \left(\frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)} + \frac{\operatorname{tg}^2(i-r)}{\operatorname{tg}^2(i+r)} \right)$$

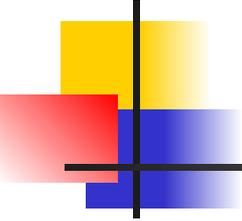
Для нормально падающего пучка

$$\rho = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2; \quad \rho = \left(\frac{n_{21} - 1}{n_{21} + 1} \right)^2; \quad \rho = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2 \text{ — воздух}$$



Способы уменьшения потерь в оптических трактах

1. Контактный клей со средним показателем преломления.
2. «Просветление» оптики.
3. Использование явления полного внутреннего отражения.



Рассеяние света оптическими средами

Когда свет попадает в гетерогенную среду, он рассеивается во всех направлениях. Диффузор – гетерогенная среда. Рассеяние света в диффузоре – диффузное рассеяние.

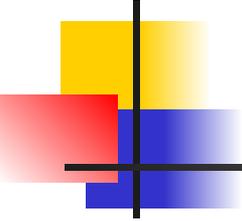
Яркость для идеального диффузора определяется по формуле:

$$B_{\#} = \frac{E}{\pi},$$

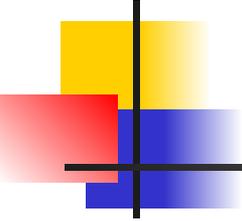
Яркость для идеальной матовой поверхности:

$$B_{\#} = \rho \cdot \frac{E}{\pi}$$

где E – освещенность



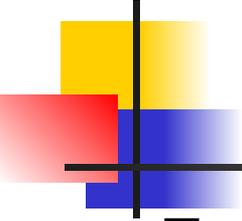
Раздел 4. Приемники излучений. Глаз как приемник излучений



Явления, возникающие при поглощении оптического излучения

Поглощение излучения

Нагрев	Вторичное излучение	Фотохимические явления	Фотоэлектрические явления
– Тепловое излучение		Фотографические процессы	Фотоэффект
	– Люминесценция – Вынужденное излучение	Хемилюминесценция	Изменение проводимости под действием излучения



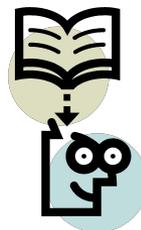
Приемники излучения

Тела, в которых под действием оптического излучения происходят такие преобразования, в светотехнике называют **приемниками излучения**:

- человеческий глаз – естественный приемник излучения;
- светочувствительные материалы – служат для записи оптической информации аналоговым (фото) или цифровым способом (CD+);
- светочувствительные элементы измерительных приборов.

Под действием оптического излучения в фотоприемнике происходят превращения, заданным образом изменяющие свойства приемника. Это изменение называется полезной реакцией приемника.

Эффективный поток (воспоминания)



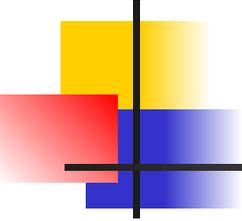
$$S = \frac{1}{k} \cdot \frac{P_{эфф}}{\Phi}$$

Светочувствительность в общем виде выражается формулой, где k – коэффициент пропорциональности, связанный с выбором используемых систем единиц.

$$P_{эфф} = k \cdot S \cdot \Phi$$

Данное выражение можно использовать только для неселективного приемника, т.е. когда нет зависимости его светочувствительности от длины волны падающего излучения.

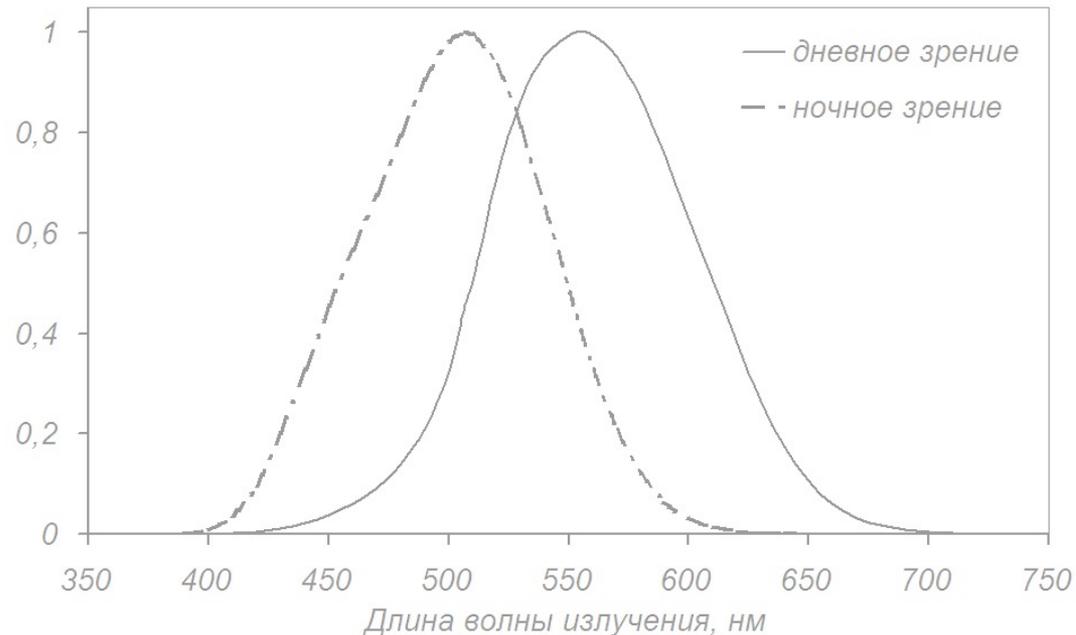
Выражение для эффективного потока в общем виде.


$$P_{эфф} = k \int_{\lambda} \varphi(\lambda) S(\lambda) d\lambda$$

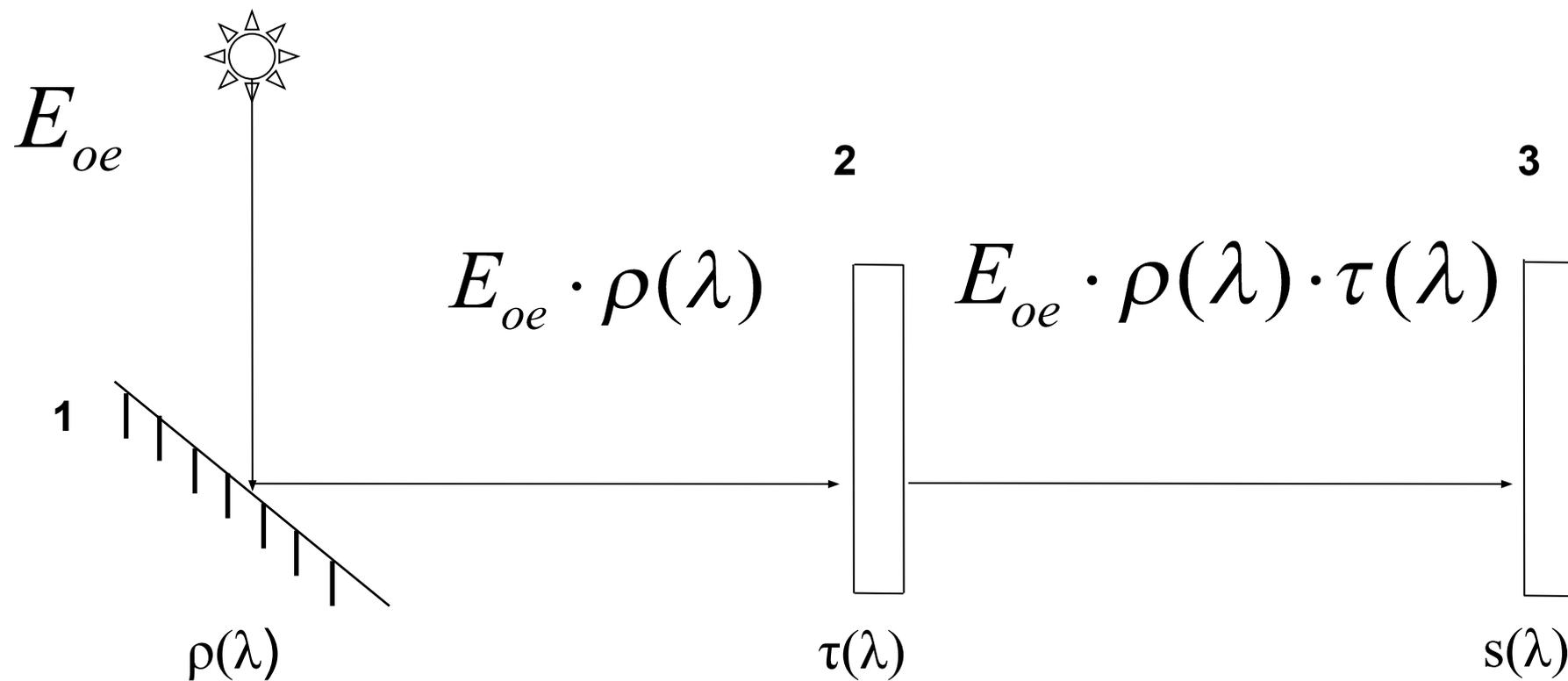
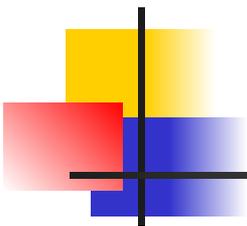
Частный случай, когда приемником является человеческий глаз: светочувствительность – кривая видности, эффективный поток – световой.

$$F = k \int_{380 \text{ нм}}^{780 \text{ нм}} \varphi(\lambda) v(\lambda) d\lambda$$

$$k = 683 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}}$$



Фотоактиничный поток. Активности



Фотоактиничный поток. Актиничность

Если световой поток падает на какую-либо поверхность, его поверхностная плотность называется **освещенностью**. Освещенность – световой поток на единичную поверхность:

$$E = \frac{dF}{dQ}$$

Для светочувствительных материалов и фотоприемников измерительных приборов используют фотоактиничный поток A . **Актиничность** – аналог освещенности, определенный по фотоактиничному потоку:

$$A = \int \varphi(\lambda) \cdot s(\lambda) d\lambda = P_{\text{ýô}}$$

– используется для светочувствительных материалов

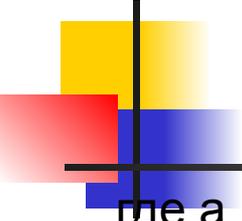
$$a = \frac{dA}{dQ} \quad \text{– актиничность}$$

Реакция приемника определяется: источником излучения, характеристиками среды и фотоприемником.

- 1 – оригинал
- 2 – оптическая среда
- 3 – фотоприемник

Эффективный оптический коэффициент

Эффективный коэффициент пропускания:


$$\tau_{эф} = \frac{a_{\tau}}{a_o} = \frac{\int E_{oe} \tau(\lambda) s(\lambda) d\lambda}{\int E_{oe} s(\lambda) d\lambda},$$

где a_{τ} – прошедшая через среду, a_o – в отсутствии среды.

По аналогичной формуле рассчитывается эффективный коэффициент отражения:

$$\rho_{эф} = \frac{a_{\rho}}{a_o},$$

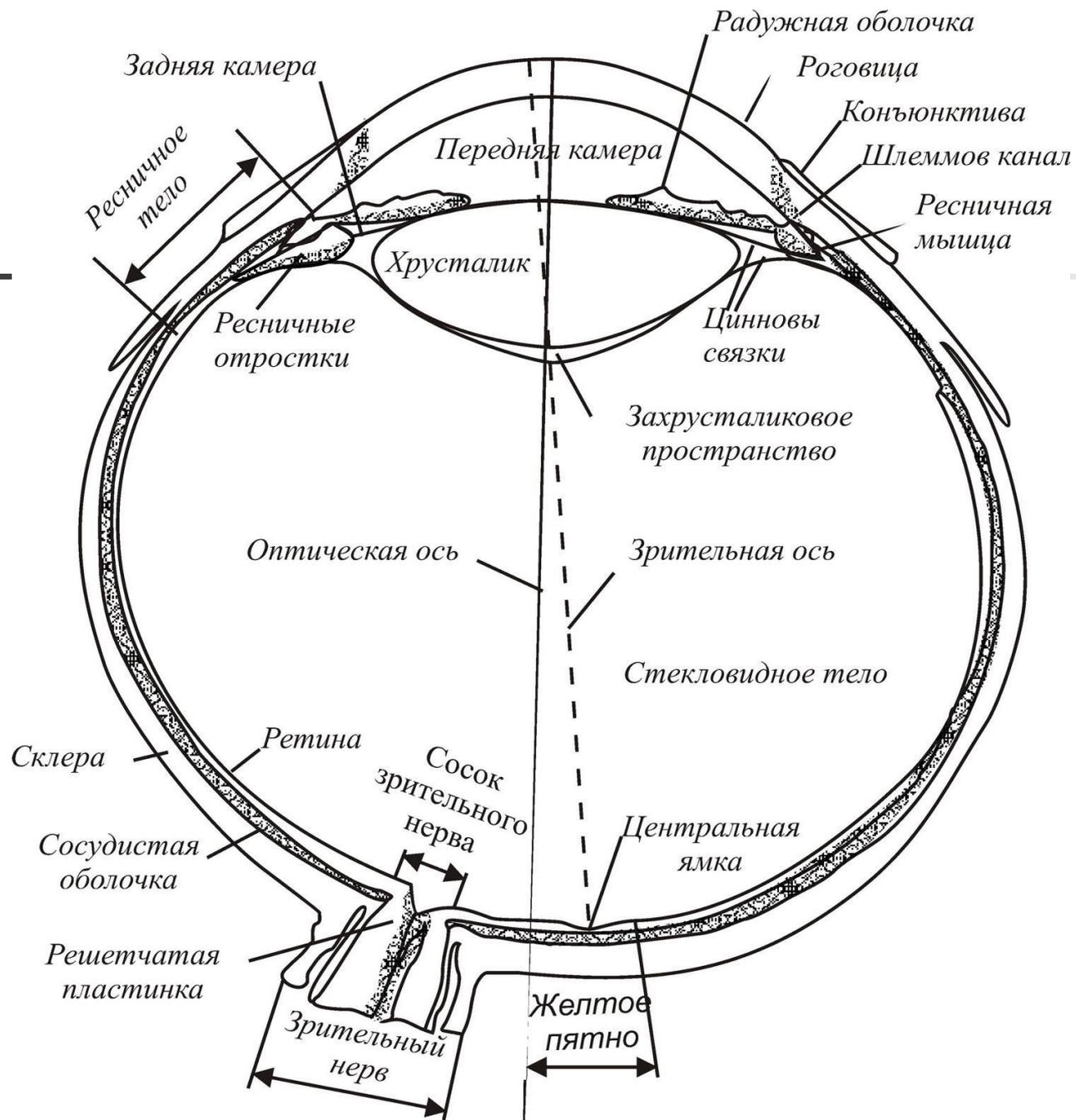
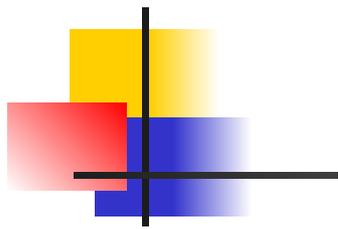
где a_{ρ} – отраженная, a_o – в отсутствии среды.

Кратность светофильтра:

$$f = \frac{a_o}{a_{\tau}}$$

Копировальная плотность среды:

$$D_{\hat{E}\hat{I}} = \lg \frac{1}{\tau_{\hat{y}\hat{o}}} = \lg f = \lg \frac{a_o}{a_{\tau}} = \lg \frac{\sum_{\lambda} E_{oe}(\lambda) \tau(\lambda)}{\sum_{\lambda} E_{oe}(\lambda) \tau(\lambda) s(\lambda)}$$



- фоторецепторы делятся на колбочки и палочки
- палочки отвечают за “сумеречное” зрение и восприятие малых светлот
- кривая спектральной чувствительности палочек имеет max при 507 нм
- колбочки отвечают за “дневное” цветное зрение и восприятие больших светлот
- каждый тип колбочек имеет свою чувствительность, описываемую кривой основного возбуждения колбочки данного типа
- суммарная спектральная чувствительность имеет max при 555 – 556 нм;
- когда колбочки возбуждены одинаково, возникает ощущение светлоты – ахроматические цвета;
- в прочих случаях ощущение светлоты возникает одновременно с ощущением цветности;
- абсолютная чувствительность глаза как фотоприемника определяется как, $S = \frac{1}{P_{\text{эфф}}}$ – эффективно (полезно) поглощенная часть светового потока.

Для того чтобы перейти от кривых основных возбуждений к спектральной чувствительности глаза необходимо сложить их с умножением на соответствующие яркостные коэффициенты, полученные по статистическим данным (Е.Н. Юстова).

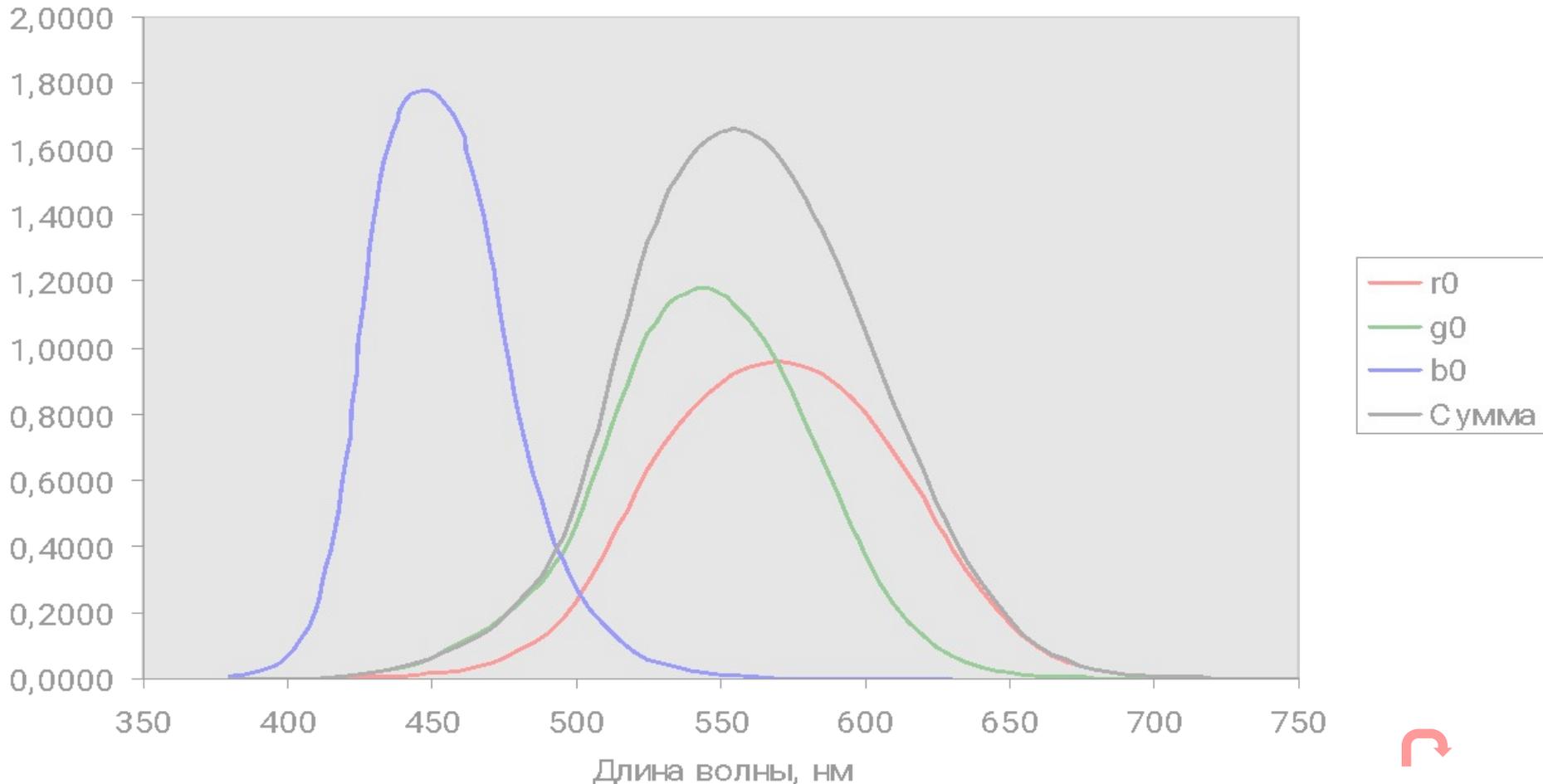
$$LR : LB : LG = 1 : 0,003 : 0,655$$

Это связано с различной абсолютной чувствительностью красных, синих и зеленых фоторецепторов.

Спектральная чувствительность глаза

Эффект Пуркинье: при уменьшении освещенности и цветового объекта красные цвета темнеют быстрее всех, синие – медленнее всех.

Характеристики спектральной чувствительности трех приемников глаза (по Е.Н. Юстовой)



Разрешающая сила глаза

$$V = \frac{1}{\delta}$$

где δ – минимальный угловой размер объекта, который отличается отдельным, V – острота зрения.

Разрешение глаза – 1МПиксел.

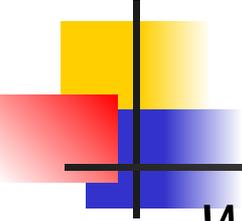
Дифракционная формула для предела разрешения δ имеет вид:

$$\delta = \frac{1,22\lambda}{d_{\zeta}} = \frac{2,33}{d_{\zeta}}$$

$$K = \frac{B - B_{iá}}{B},$$

где K – контраст, B – яркость фона, $B_{об}$ – яркость объекта.

Малую остроту зрения на периферии в значительной степени компенсирует подвижность глаз. Как только в поле зрения попадает объект, достойный внимания, оба глаза согласованно фиксируются на нем и его изображение попадает на фовеальные области сетчаток, где острота зрения максимальна.

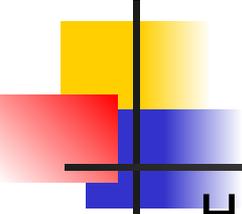


Контрастная чувствительность глаза. Закон Вебера – Фехнера

W – светлота, субъективное ощущение, связанная с объективным фактором – яркостью B и измеряемая числом порогов dW различения светлоты. Любая разность светлот ΔW выражается конечным числом порогов. Чем больше разность светлот между объектом и фоном, тем сильнее они различаются.

$$\Delta W_{\text{число единиц } dW} = W_{\text{объекта}} - W_{\text{фона}}$$

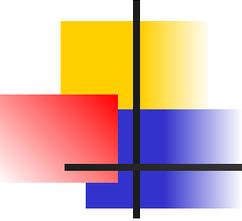
$$K = \frac{|B_{\text{объекта}} - B_{\text{фона}}|}{B_{\text{фона}}} \quad \text{– контраст}$$



Закон Вебера – Фехнера. Метод пороговых приращений

На двух половинках фотометрического поля I и II визуального колориметра устанавливают одинаковую яркость B_0 . Увеличивают яркость поля II до достижения едва заметного порогового различия по светлоте с полем I и т.д.

шаг	Поле I	Поле II
1	B_0	B_0
2	$B_1 = B_0 + n\Delta B$ (один порог светлоты к полю II)	B_0
3	B_1	$B_2 = B_0 + m\Delta B$ (один порог светлоты к полю I)



Закон Вебера – Фехнера. Метод пороговых приращений

$$\psi = \frac{\Delta B}{B}$$

ψ – дифференциальный порог

$$dW = k \cdot \frac{dB}{B}$$

закон Вебера – Фехнера в форме дифференциального уравнения,
 k – коэффициент пропорциональности.

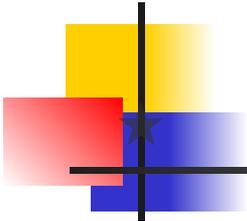
$$\Delta W = k \cdot \Delta \lg B$$

математическое выражение закона Вебера – Фехнера

$$k = \frac{1}{\psi}$$

контрастная чувствительность глаза.

Адаптация глаза при восприятии яркости

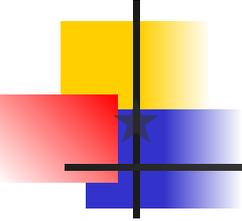


Адаптация возможна благодаря следующим особенностям строения глаза и нервных клеток зрительного аппарата:

1. Диаметр зрачка равен 2-8 мм – зрачковый рефлекс; изменение диаметра зрачка способно компенсировать 16-кратные изменения освещенности окружающих объектов.

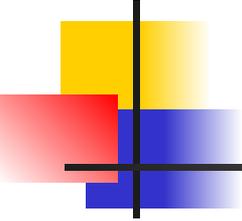
2. Двойственность световоспринимающей системы; наличие колбочкового и палочкового зрения позволяет видеть в большом диапазоне освещенностей (от 0,2 до 120 тыс. лк).

3. Закон Вебера – Фехнера – восприятие не абсолютного, а относительного изменения изображения. Механизм формирования зрительных импульсов нервными клетками сетчатки таков, что в мозг поступают сигналы не об абсолютной яркости деталей объекта, а о соотношении яркостей детали и фона.

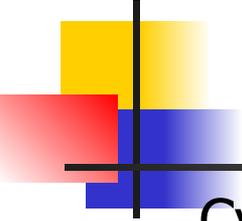


Закономерности зрительного восприятия объекта

1. Зрительный образ практически не зависит от освещенности (пример: стол – и в сумерках стол);
2. Человек не способен оценить средний уровень яркости или освещенности объектов;
3. Человек с высокой точностью определяет тождество или различие светлот близко расположенных предметов или деталей.



Раздел 5. Основы учения о цвете

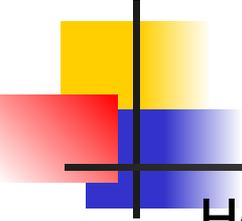


Природа и психология цвета

Субъективные цветовые ощущения делятся на две категории:

- количественные, называемые *светлотой*, которые зависят от мощности излучения;
- качественные, называемые *цветностью*, которые определяются спектральным составом излучения. Цветность определяется двумя параметрами – *цветовым тоном* и *насыщенностью*.

Совокупность светлоты и цветности обозначается термином «цвет». Ощущение цвета можно выразить трехмерной величиной, которое также носит название «цвет».

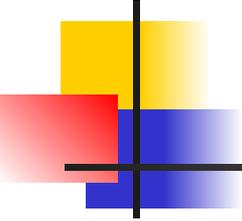


Природа и психология цвета

Необходимо строго различать понятия: *окраска* предмета и *цвет* предмета.

Окраска характеризует спектральную способность поверхности объекта отражать те или иные излучения в направлении глаза (регистрирующего прибора).

Цвет данного объекта – это то, как реализуется данная отражательная способность объекта с учетом его освещения и рассматривания. *Цвет* – сложное психофизическое явление, которое включает в себя физический, физиологический и психологический аспекты.

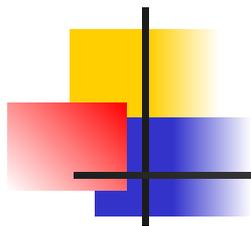


Природа и психология цвета

Физика цвета рассматривает оптические явления, возникающие при рассматривании предметов в отраженном или в проходящем свете, а также аппаратуру, методы получения и измерения спектров.

Физиология цвета изучает действие излучения на глаз, работу зрительного аппарата, причины возникновения ощущений светлоты и цветности.

Психология цвета изучает влияние психологических факторов на ощущения, вызванные излучениями с определенными характеристиками (светофор).



Базой и инструментом при изучении и воспроизведении цвета является *метрология* цвета, которая определяет способы его численного выражения, измерения и классификации, а также величины и методы установления допусков на воспроизведения цвета.

Памятка начинающим дизайнерам
Какие цвета нельзя использовать и почему



цвет крови



цвет психов



цвет мочи



цвет болезни



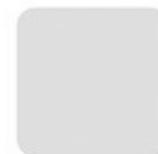
цвет «голубых»



цвет синяков



цвет тоски



«как-то серо»



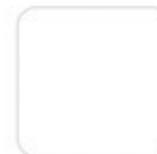
цвет смерти



цвет говна

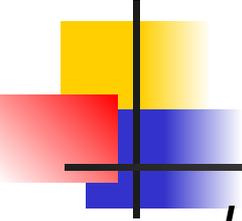


цвет блондинок



цвет пофигизма





Основные понятия и определения

Цвет, или, точнее, ощущение цвета, вызывают световые излучения различного спектрального состава, попавшие в наш глаз при рассматривании светящейся окрашенной или прозрачной поверхности.

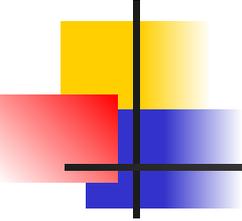
Характер цветовых ощущений связан:

- со спектральным составом и мощностью излучения, действующего на глаз;
- со свойствами зрительного аппарата человека.

Следовательно, цвет можно оценить и измерить!!!

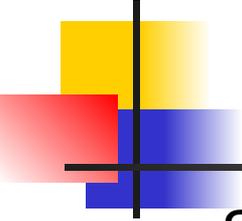
Излучение, попавшее в глаз и вызвавшее определенные ощущения, называется *ЦВЕТОВЫМ СТИМУЛОМ*.

Спектральные цвета



Цвет	Длина волны, нм
Красный	620–700 (780)
Оранжевый	580–620
Желтый	565–580
Зеленый	510–565
Голубой	480–510
Синий	450–480
Фиолетовый	(380) 400–450

Спектр видимого белого цвета не может включать в себя все цвета. Человеческий глаз различает до 150 монохроматических (спектральных) тонов и до 30 бихроматических (пурпурных).



Метамерность (метамеризм)

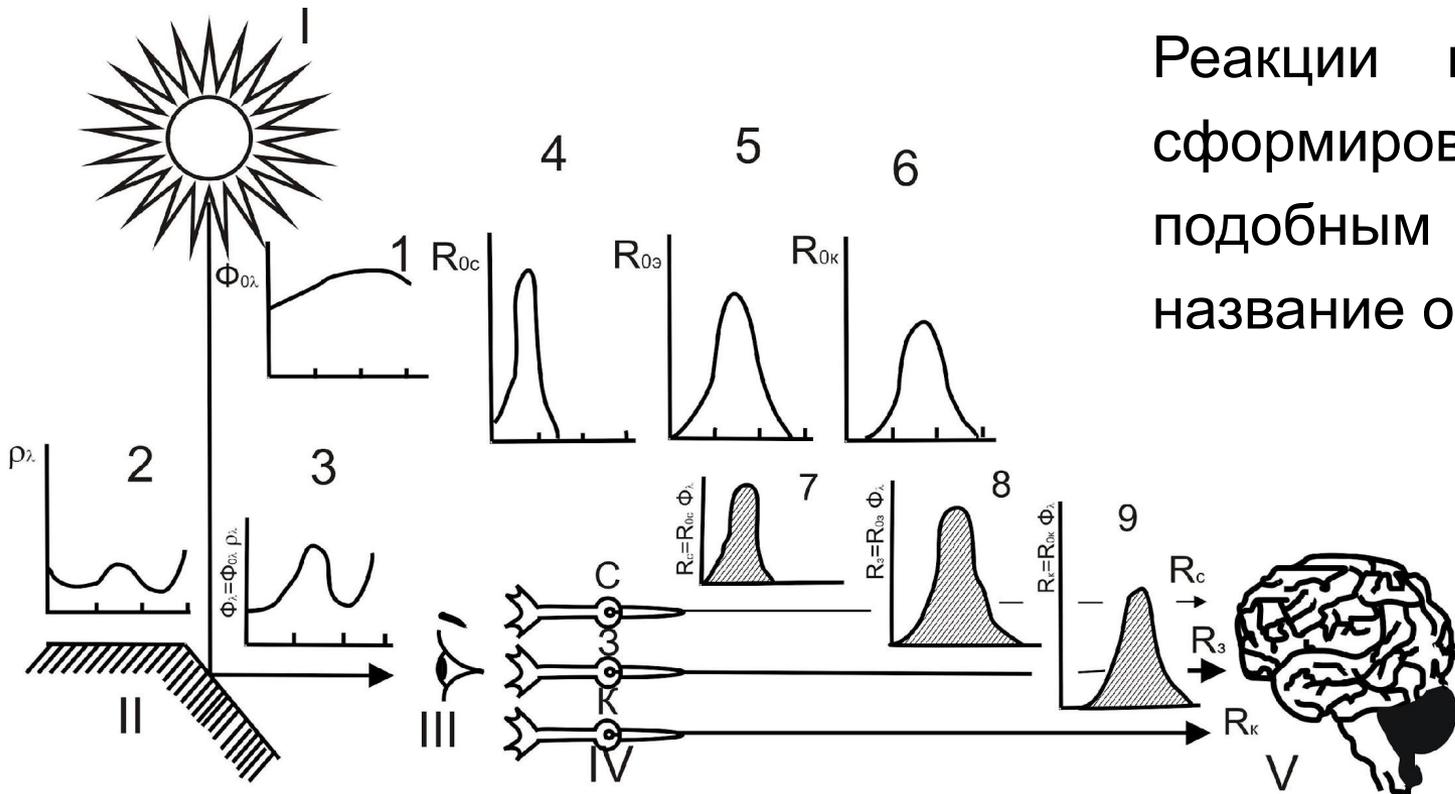
Явление *метамерности* связано с особенностями зрительного восприятия (три типа колбочек). Белый цвет можно получить сложив все цвета спектра, а можно всего двумя, выбранными надлежащим образом. Такие два излучения, взятые в надлежащей пропорции, называются *дополнительными*.

Если сравниваемые пучки излучений одинаковы по цвету (вызывают одинаковое ощущение), но имеют различный спектральный состав, то они называются *метамерными*; если спектральный состав одинаков – *изомерными*.

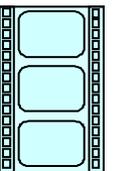
Оригинал и полиграфическая копия должны быть метамерны, копии в пределах одного тиража – изомерными.

Природа цветового ощущения

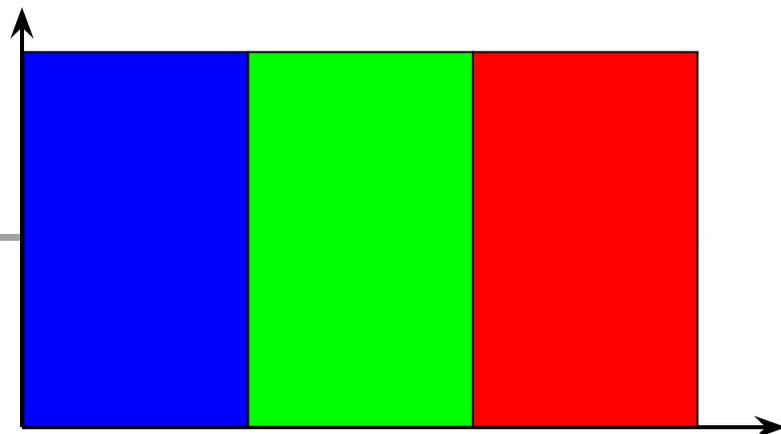
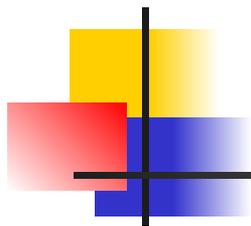
Для объяснения восприятия человеческим глазом не только светлот, но и цветов в диапазоне 380-780, в настоящее время используется трехзональная теория цветового зрения.



Реакции на излучение, сформированные подобным образом, носят название основных.



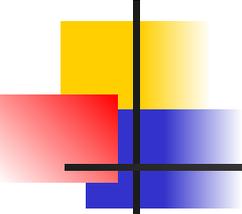
Упрощенный механизм цветовосприятия



400 С(В) 500 З(Г) 600 К(Р) 700

Упрощающие предположения:

1. фоторецепторы глаза имеют одинаковые по уровню чувствительности и только в своих зонах спектра;
2. исходный спектр излучения – равноэнергетический белый, его мощность одинакова для любой длины волны, имеется дополнительная возможность его модуляции по зонам, в пределах зоны мощность излучения постоянна;
3. на глаз действуют основные излучения RGB.



Различные варианты воздействия излучений на фоторецепторы

1. Одновременно подействовали одинаковые по интенсивности основные излучения. Возникает только ощущение светлоты – цветность отсутствует.

2. Подействовало одно основное излучение. Возникает ощущение этого основного цвета максимальной насыщенности.

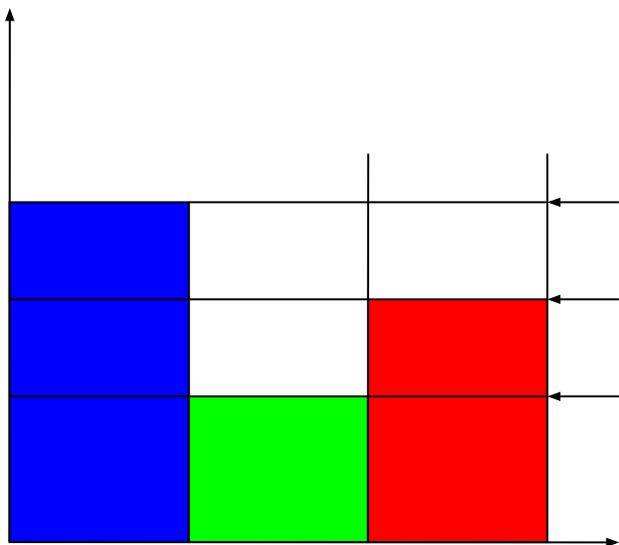
3. Подействовали двумя основными, одинаковыми по интенсивности излучениями. Возникает ощущение максимально насыщенного цвета, дополнительного к неоказавшему действия основному излучению.

R (красный)	C (голубой)
G (зеленый)	M (пурпурный)
B (синий)	Y (желтый)

Различные варианты воздействия излучений на фоторецепторы

4. Ощущение ненасыщенного основного возникает, когда действуют все излучения, причем излучение воспринимаемого цвета имеет большую интенсивность.

5. Различные интенсивности трех основных.

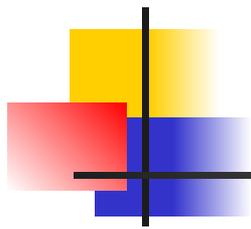


3. смесь пурпурного с синим, цветовой тон смещен в сторону синего

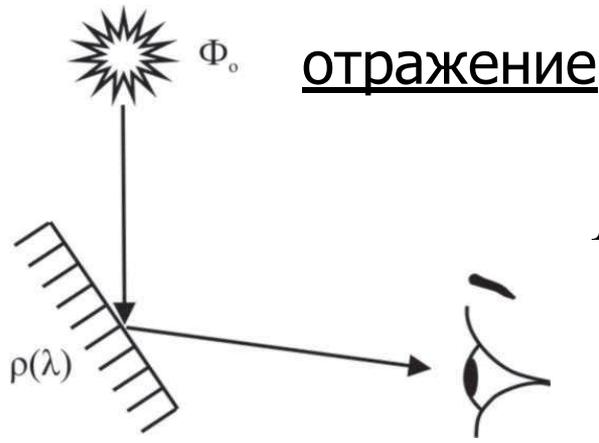
2. дополнительный к зеленому т.е. пурпурный

1. ахроматическая составляющая

субъективные ощущения светлота	объективные факторы яркость
насыщенность цветовой тон	колориметрическая чистота доминирующая длина волны

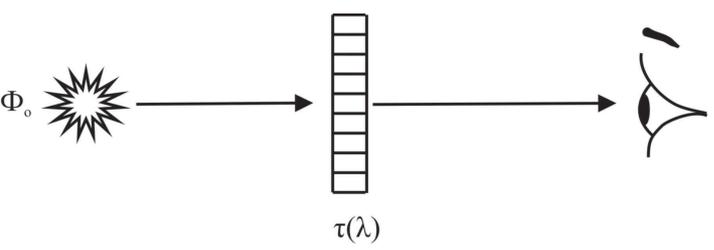


Светлотная реакция отдельных рецепторов

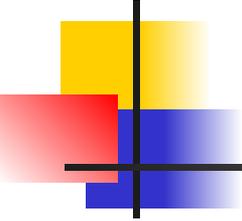


$$R_i = L_i \int_{380}^{780} R_i(\lambda) \Phi_o(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda, \text{ где } i = B, G, R$$

пропускание



$$R_i = L_i \int_{380}^{780} R_i(\lambda) \Phi_o(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda, \text{ где } i = B, G, R$$



Резюме

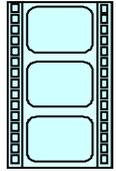
1. Цвет (ощущение цвета) является трехмерным по природе восприятия, т.е. может быть определен тремя значениями определенных величин.

2. Субъективными психологическими характеристиками цвета являются светлота, насыщенность и цветовой тон.

3. Соответствующие им объективные характеристики: яркость, колориметрическая частота цвета и доминирующая длина волны.

4. Это соответствие базируется на трехкомпонентной теории цветового зрения и явлении метамерности цвета.

Синтез цвета



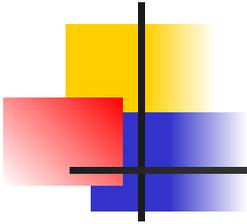
Процесс получения заданного цвета сложением других называется его синтезом. Изучение закономерностей синтеза показало, что в основе смешения сред и смешения излучений лежат разные физические явления:

– смесь голубой и красной красок даст черный цвет, а смесь голубого и красного излучений – белый.

– светлота смеси красок уменьшается, а смеси излучений – увеличивается.

В связи с этим различают два типа сложения (синтеза) – *аддитивный* и *субтрактивный*.

Синтез цвета

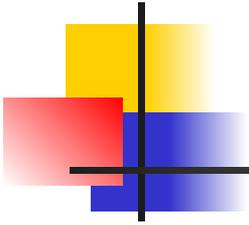


Аддитивный синтез цвета имеет место при сложении окрашенных цветковых пучков. Способы:

- одновременное сложение окрашенных пучков на белом экране (призме, молочном стекле, фотометрическом шаре);
- смешение излучений с использованием зрительной инерции;
- пространственное смешение отраженных пучков от объектов, размеры которых меньше разрешающей способности глаза.

Субтрактивный синтез цвета реализуется при сложении окрашенных сред.

Цветовое уравнение



$C = R \times R + G \times G + B \times B$ – цветовое уравнение в канонической форме,

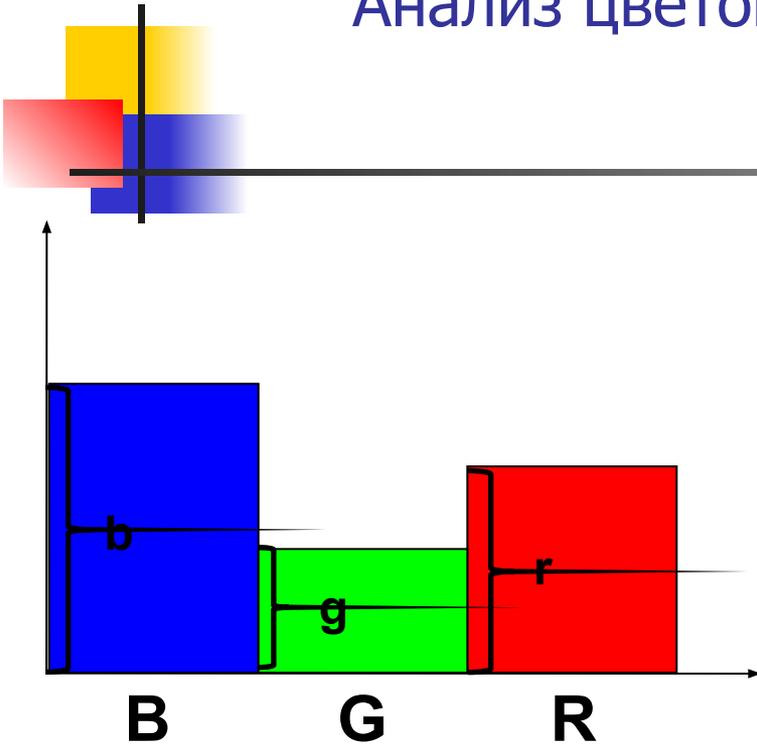
где C – получаемый цвет;

R, G, B – количества излучений, необходимых для получения цвета C (цветовые координаты);

R, G, B - излучения, взятые для синтеза («основные стимулы», «основные»);

$R \times R, G \times G, B \times B$ – цветовые составляющие.

Анализ цветового уравнения



Цветовое уравнение можно представить в виде суммы:

$$Ц(\text{хроматический}) = (r-g) \times R + (b-g) \times B$$

Ц

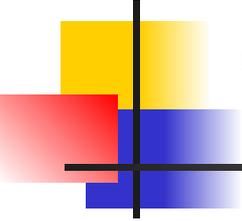
$$(\text{ахроматический}) = g \times R + g \times G + g \times B.$$

Наименьшая координата определяет ахроматическую составляющую, две остальные – цветовой тон.

1. Коэффициент цветового тона

$$K_{\text{ЦТ}} = \frac{b-g}{r-g} \cdot \left| \frac{B}{R} \right|$$

Если коэффициент цветового тона равен 1, то получается дополнительный цвет, если бесконечности – основной (спектральный).


$$K_{\text{насыщ}} = \frac{(r - g) + (b - g)}{r + g + b}$$

$$m = R + G + B$$

4. Координаты цветности

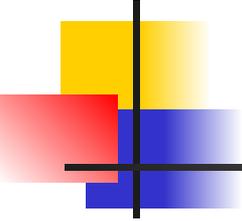
$$r = \frac{R}{m} = \frac{R}{R + G + B}, \quad g = \frac{G}{m} = \frac{G}{R + G + B}, \quad b = \frac{B}{m} = \frac{B}{R + G + B}$$

5. Уравнение цветности

$$Ц = r \times R + g \times G + b \times B$$

2. Коэффициент насыщенности – отражает чистоту света (доля хроматической компоненты в цвете). $K_{\text{насыщ}} = 1$ для спектрально чистого цвета

3. Модуль цвета – сумма ординат



Законы аддитивного синтеза (законы Грассмана)

1. Закон трехмерности.

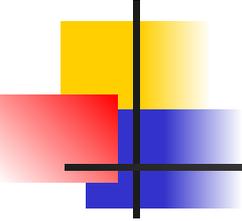
Глаз может регистрировать только три вида различий в цвете, выражаемые, например, в терминах цветового тона, чистоты цвета и яркости. Любой цвет однозначно выражается тремя, если они линейно независимы.

2. Закон непрерывности.

Если в смеси трех цветовых стимулов один меняется непрерывно, в то время как два другие остаются постоянными цвет смеси также меняется непрерывно.

3. Закон аддитивности.

Цвет смеси зависит только от цвета излучений, входящих в смесь, и никак не зависит от спектрального состава каждого из компонентов смеси.



Практические следствия из законов аддитивного синтеза

Пусть имеются цвета ζ_1 , ζ_2 , ζ_3 и ζ_4 .

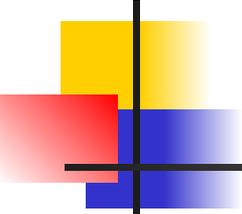
а) Если образовать из них две смеси, то при $\zeta_1 = \zeta_2$, $\zeta_3 = \zeta_4$ следует что $\zeta_1 + \zeta_3 = \zeta_2 + \zeta_4$. Обратное неверно.

б) При $\zeta_1 = \zeta_2$, $\zeta_3 = \zeta_4$ имеет место равенство:

$$\zeta_1 - \zeta_3 = \zeta_2 - \zeta_4$$

$$\zeta + rR = gG + bB$$

– возможно существование отрицательных координат цветности



Практические следствия из законов аддитивного синтеза

в) Если $\zeta_1 = \zeta_2$, то изменение интенсивности обоих цветов в одинаковое число раз не нарушит равенства:

$a\zeta_1 = a\zeta_2$, a – любое положительное число

г) Если цвета нескольких излучений описаны уравнениями:

$$\zeta_1 = r_1 R + g_1 G + b_1 B$$

.....

$$\zeta_n = r_n R + g_n G + b_n B$$

то цвет смеси выражается суммой уравнений:

$$\zeta_{\Sigma} = (r_1 + r_n)R + (g_1 + g_n)G + (b_1 + b_n)B$$



Основы субтрактивного синтеза

Главным инструментом регулирования цвета при субтрактивном синтезе служат краски. Главное требование к краскам – вычитать основные в одной зоне спектра и пропускать в двух других. Пропускание должно быть управляемым. Средством управления является толщина красочного слоя в соответствии с законом БЛБ:

$$D = \chi c l$$

χ – удельный показатель поглощения, зависящий от природы вещества;

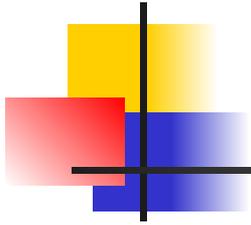
C – концентрация;

l – толщина слоя.

Первый множитель определяет качество поглощающего вещества, два последних служат количественной характеристикой. Поэтому спектральное выражение для оптической плотности как правило имеет вид:

$$D_{\lambda} = \chi_{\lambda} C_{\Pi}$$

Представление цвета

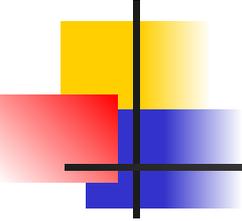


Существуют две принципиально различные системы оценки и представления цвета:

1. Построение колориметрической системы, в которой любой цвет задается линейной комбинацией выбранных определенным образом основных.

2. Системы спецификации цветов, где каждый цвет имеет материальный носитель в виде окрашенных образцов.

В основе обеих систем лежит фундаментальное понятие *цветового пространства*.

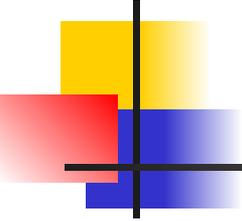


Законы цветового пространства

1. Признается трехмерность цвета, как лежащая в основе его восприятия. Размерность пространства равна трем. Цвет задается тремя независимыми переменными – векторами основных излучений или цветовыми стимулами.

2. Цветовое тело всех реальных цветов – это часть цветового пространства. Цветовое тело строится вокруг ахроматической оси, черный внизу белый вверху.

3. Последовательность цветов определяется спектром. Интервал между красным и фиолетовым замыкают пурпурными цветами. Последовательность цветов – замкнутая геометрическая фигура.



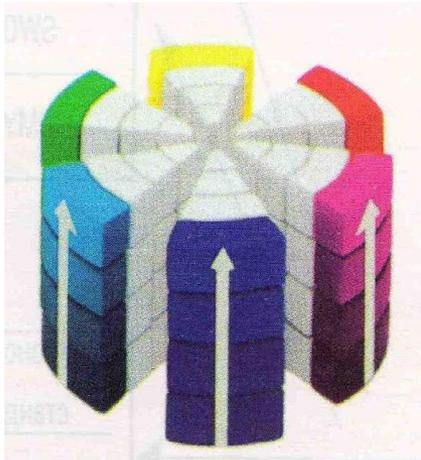
Законы цветового пространства (продолжение)

4. Чем дальше цвет находится от ахроматической оси, тем он более насыщен. Ахроматические цвета имеют только одну характеристику – светлоту.

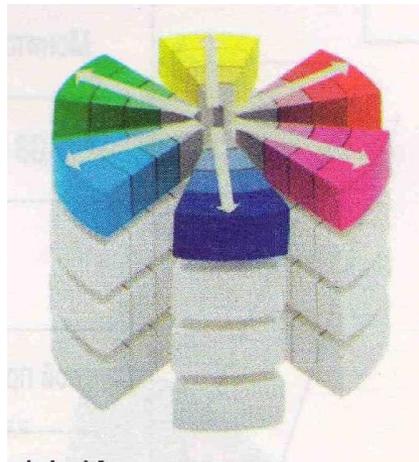
5. Цвета одного цветового тона находятся на полуплоскостях, проходящих через ахроматическую ось, называются вертикальными сечениями цветового тела.

6. Цветовой тон в вертикальном сечении не изменяется.

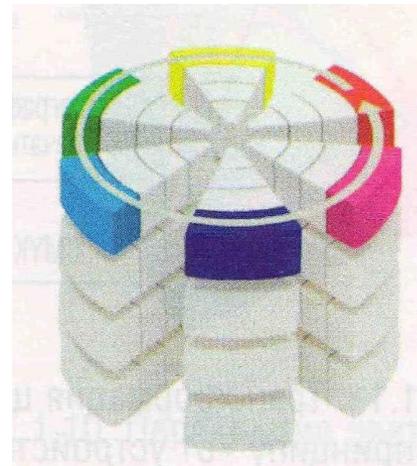
Изменение характеристик цвета в цветовом пространстве



Возрастание яркости

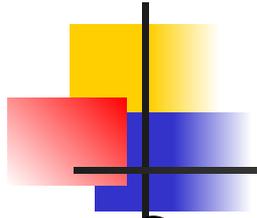


Возрастание насыщенности



Изменение цветового тона

Цветовое тело



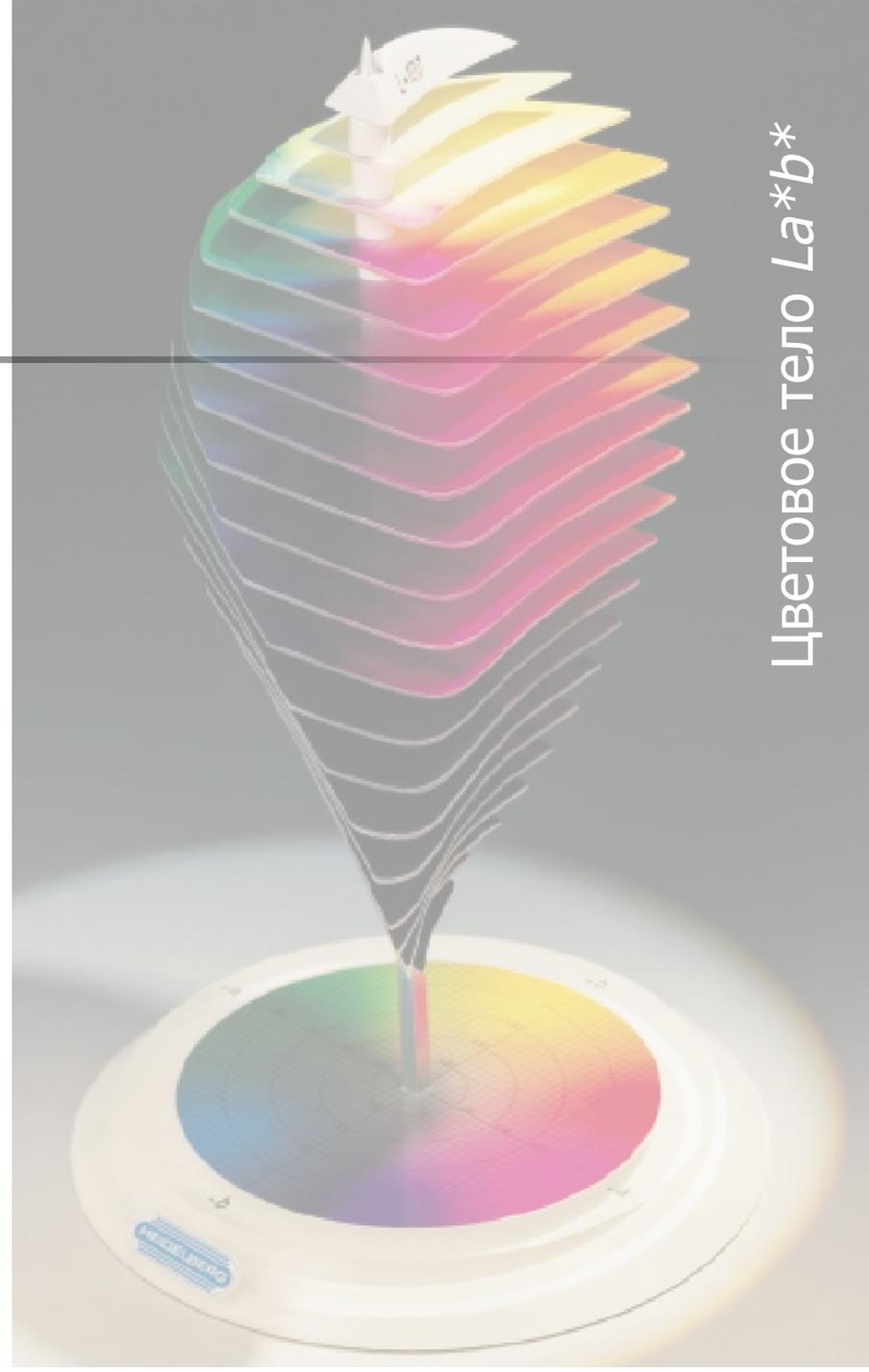
Согласно

цветовому

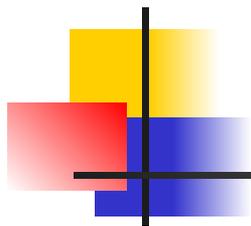
уравнению

$$C = R \times R + G \times G + B \times B,$$

с помощью триады основных цветов или излучений можно воспроизвести некоторую непрерывную совокупность цветов. В цветовом пространстве это будет замкнутое геометрическое тело, которое называется **цветовое тело**.



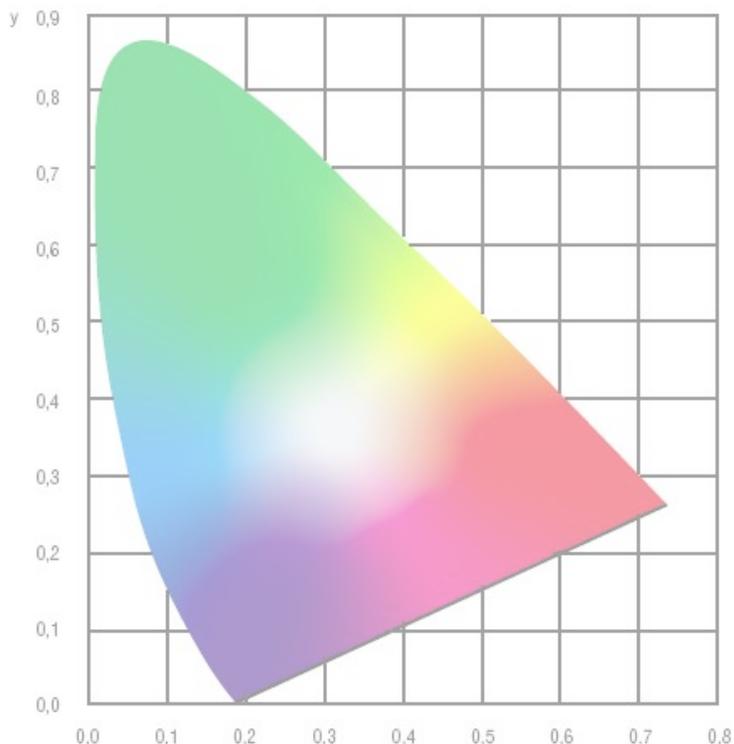
Цветовой охват



Замкнутая плоская фигура, которая

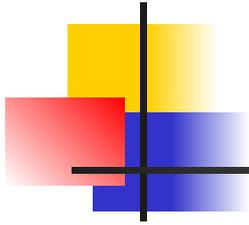
получается в сечении цветового тела произвольной плоскостью, называется **цветовым охватом**. Хотя плоскость сечения может быть произвольной, обычно понятие цветового охвата применяют к плоскости единичных цветов (модуль цвета равен 1).

Цветовой охват показывает все многообразие цветов, принадлежащих данной плоскости, которое может быть воспроизведено данной триадой основных.



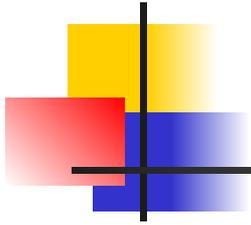
*Локус – цветовой охват
в пространстве XYZ*

Цвет как векторная величина



1. Любой цвет можно представить точкой в цветовом пространстве: каждому цвету соответствует только одна точка, каждой точке – определенный цвет;
2. Для упорядочения цветов и выполнения над ними математических действий в цветовом пространстве вводят систему цветовых координат;
3. Таких систем может быть выбрано бесконечное множество;
4. За начало координат, как правило, принимается точка, соответствующая черному цвету;

Цвет как векторная величина

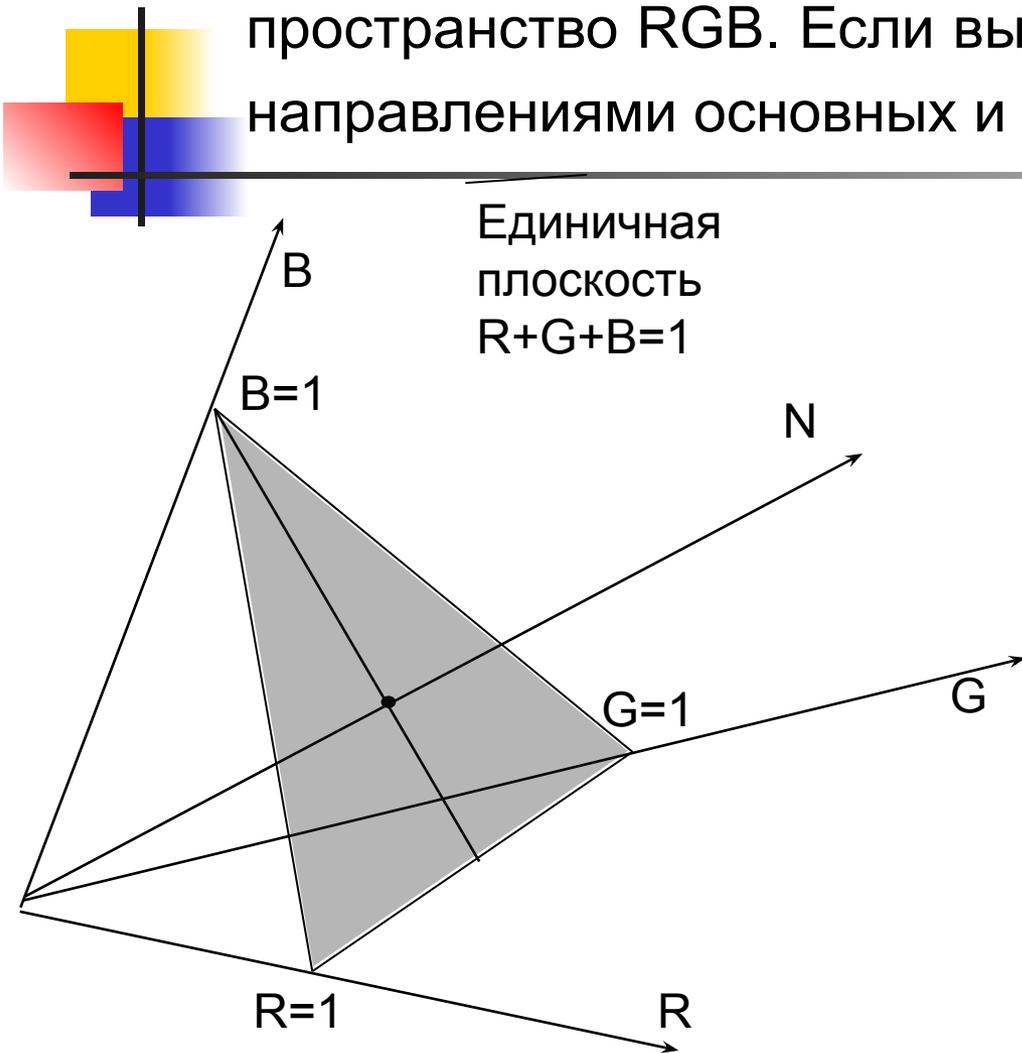


5. В любой выбранной системе координат каждый цвет выражается через основные цвета этой системы согласно уравнению цвета;

6. Главное ограничение в выборе основных – их линейная независимость;

7. Если соединить вектором начало координат с точкой, соответствующей данному цвету, то вектор будет являться вектором цвета, а координаты точки – координатами этого вектора.

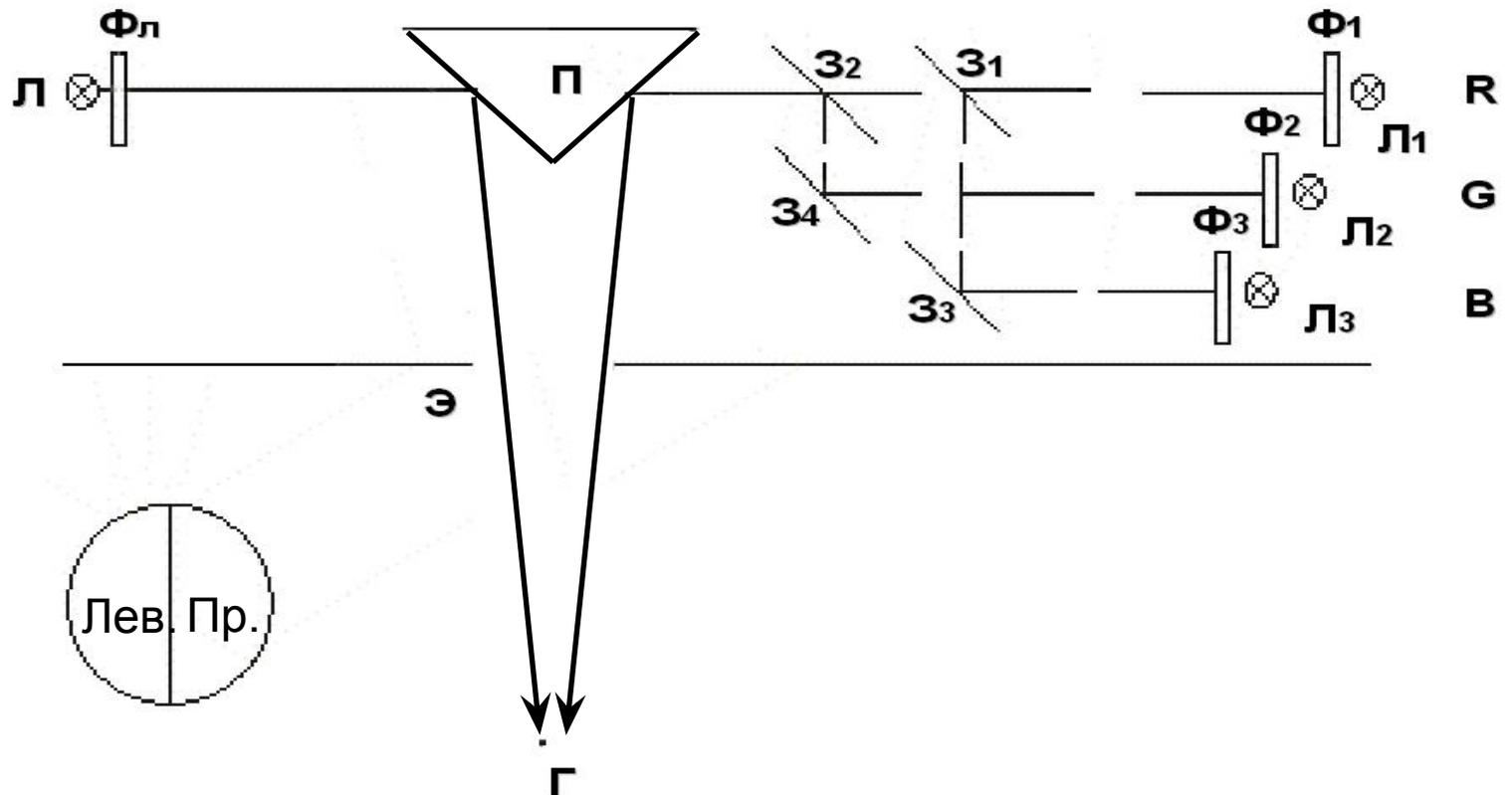
Рассмотрим например абстрактное цветовое пространство RGB. Если выбрать одинаковые углы между направлениями основных и одинаковый масштаб по осям,

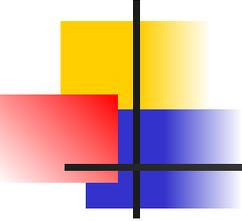


Единичная
плоскость
 $R+G+B=1$

то единичная плоскость, проведенная через точки с координатами $(R;G;B)=(1;1;1)$ образует равносторонний треугольник. Через центр этого треугольника проходит вектор ахроматических цветов N .

Вектор N носит название **базисный стимул** – некоторый цвет, обычно, но не обязательно, ахроматический, который должен получиться в результате сложения основных стимулов, взятых в равных количествах. Основные для воспроизведения белого цвета практически выбираются на визуальном калориметре.

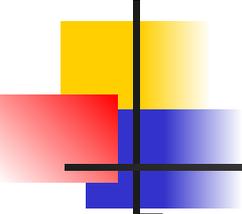




Особые линии и плоскости цветовых пространств

Равные количества основных вовсе не означают, что их яркость будет одинакова. Если единичные цвета (цвета, взятые для синтеза базисного стимула) спроецировать на белый экран для сравнения рядом, то окажется, что они существенно различаются по яркости. Далее следует уравнивать яркости основных и полученные количества нанести в соответствующем масштабе на орты основных. По аналогии с единичной плоскостью получается **плоскость равных яркостей**.

Плоскость равных яркостей пересекается с единичной плоскостью по **линии равных яркостей**.



Особые линии и плоскости цветовых пространств

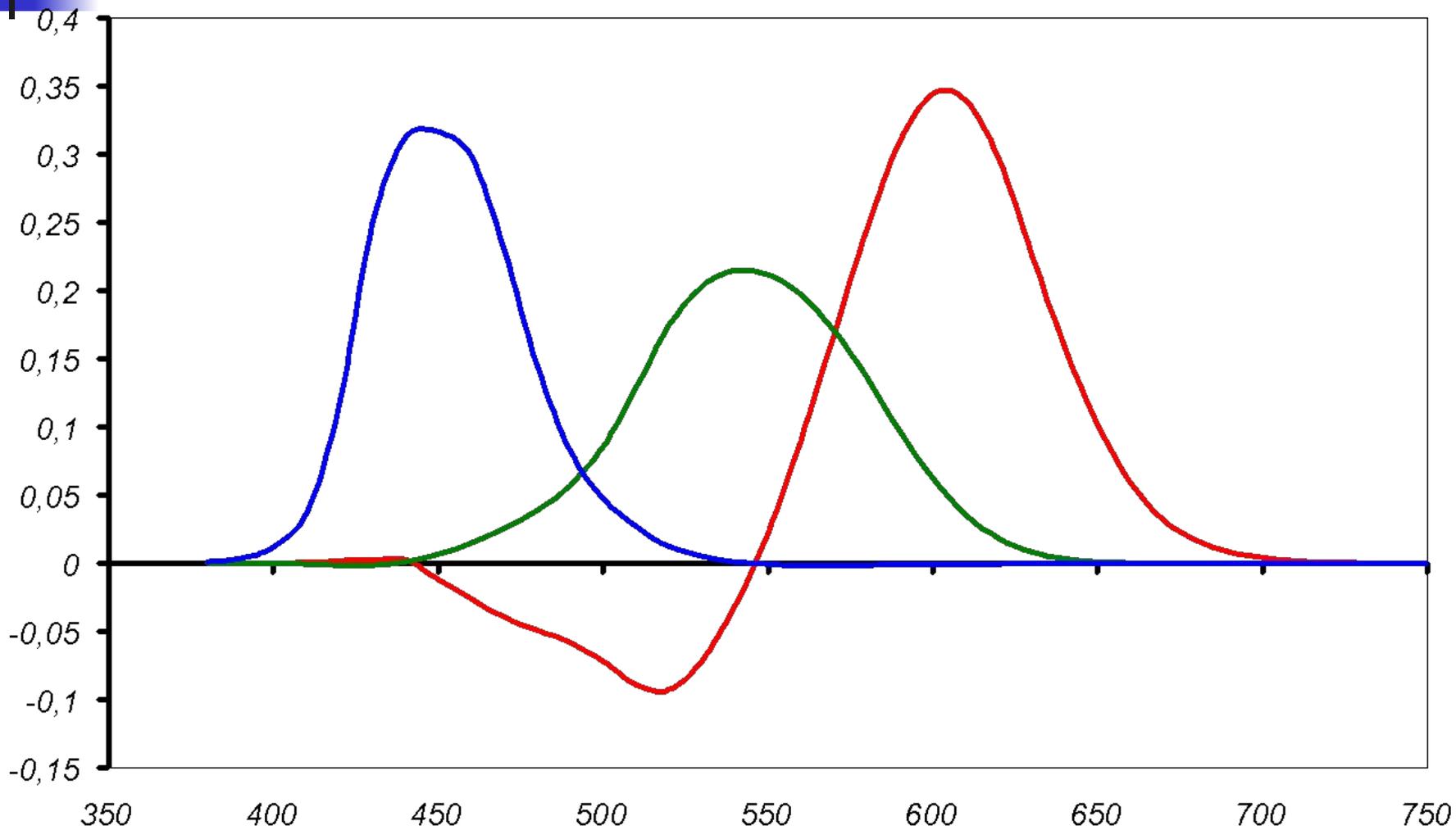
Для различных яркостей получаются различные плоскости равных яркостей, которые образуют семейство параллельных плоскостей. В колориметрии используется также понятие **плоскости нулевых яркостей**.

Алихна – прямая, которая получается при пересечении единичной плоскости и плоскости нулевых яркостей.

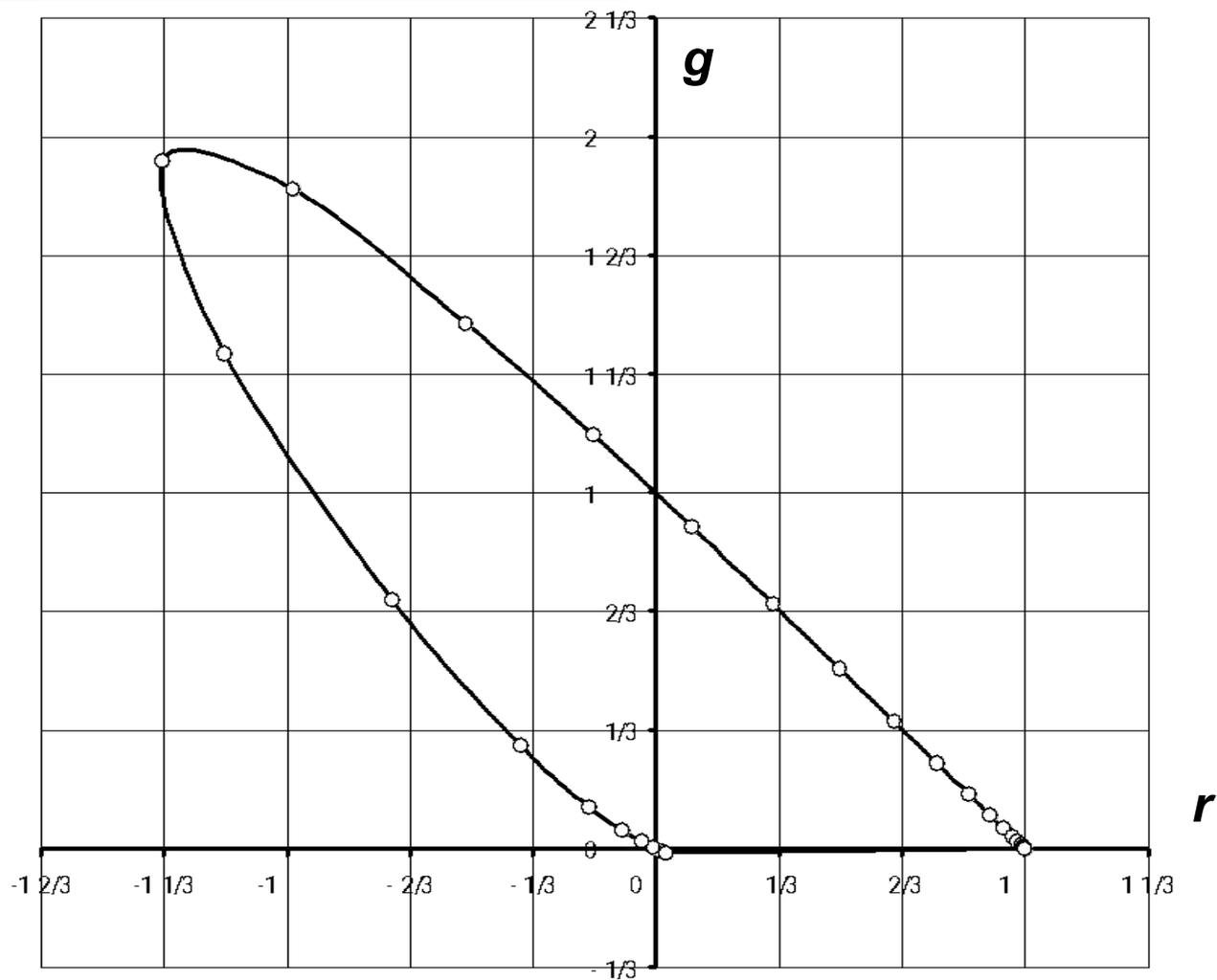
Координаты цвета монохроматических излучений, имеющих мощность 1 Вт, носят название **кривых сложения**.

При нанесении координат спектрально чистых цветов на единичную плоскость получают фигуру, которая называется **локусом**.

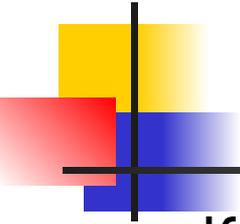
Кривые сложения в системе RGB



Локус в системе RGB



Определение яркости в системе RGB

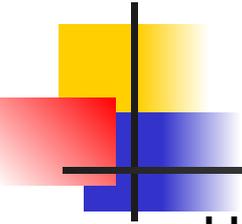


Каждой единице цвета соответствует своя яркость, определяемая ее яркостным коэффициентом. Поэтому для получения полной яркости цвета **Ц**, нужно сложить яркости составляющих цвета:

$$L_{\text{Ц}} = L_{\text{R}}R + L_{\text{G}}G + L_{\text{B}}B.$$

Однако здесь яркость $L_{\text{Ц}}$ мы получаем в относительных единицах, т.е. находим величину, которой пропорциональна яркость цвета. Как явствует из анализа формул, яркостные коэффициенты – величины безразмерные; отсюда и $L_{\text{Ц}}$ безразмерна.

Определение яркости в системе RGB



Цвет можно не только непосредственно измерить, но и вычислить, если известна спектральная плотность мощности излучения в видимой области спектра. Вычисление производится с помощью формул:

$$r' = \int \varphi_{\lambda} \bar{r}(\lambda) d\lambda; \quad g' = \int \varphi_{\lambda} \bar{g}(\lambda) d\lambda; \quad b' = \int \varphi_{\lambda} \bar{b}(\lambda) d\lambda$$



Чем отличаются два предмета, одинаковых по цветности, но разных по цвету? Один из них будет темнее другого. Единичному вектору соответствует единичный цвет, т. е. цвет, сумма координат которого равна единице. Любой цвет \mathbf{C} может быть получен умножением единичного вектора на сумму координат цвета \mathbf{C} , т. е. на его модуль. Если r , g и b – координаты цветности цвета \mathbf{C}_1 то яркость $L(\mathbf{C}_1)$ его единичного вектора \mathbf{C}_1 выражается:

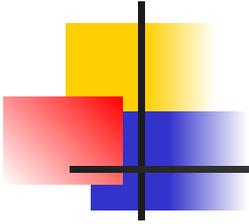
$$L(\mathbf{C}_1) = K(r + 4,5907g + 0,0601b).$$

Как уже говорилось, цвет полностью определяется тремя координатами. Но ведь и для цветности даются три координаты r , g , b . Однако эти координаты не независимы. На них налагает связь формула модуля цвета:

$$\begin{aligned} r' + g' + b' &= m \\ r' + g' + b' &= 1 \end{aligned} \quad r = \frac{r'}{r'+g'+b'}; \quad g = \frac{g'}{r'+g'+b'}; \quad b = \frac{b'}{r'+g'+b'};$$

Две координаты уже однозначно определяют третью, которая не дает никакой новой информации. Именно поэтому цветность не дает полной информации о цвете. Обычно, характеризуя цветность, приводят только две ее координаты: r , g .

Доминирующая длина волны λ



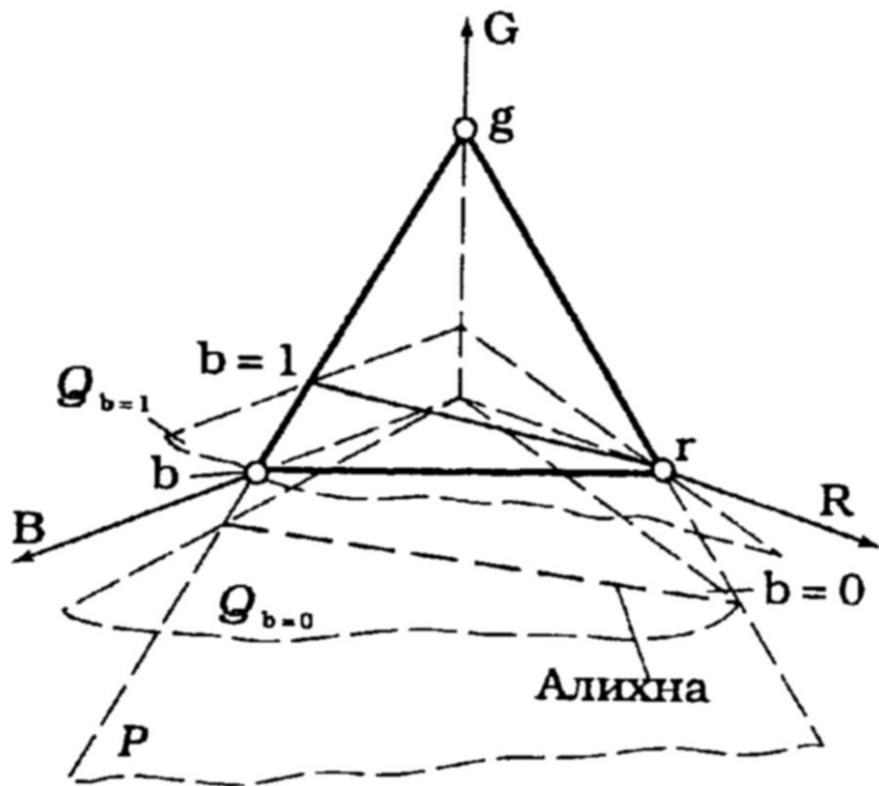
1. Определить координаты цвета
2. Определить модуль цвета
3. Определить координаты цветности
4. Нанести точку с координатами (r, g) на локус в плоскости единичных цветов
5. Соединить точку равноэнергетического белого с найденной точкой и продлить данный отрезок до границы локуса.

Доминирующая длина волны найденная таким образом определяется с точностью до 5 или 2,5 нм.

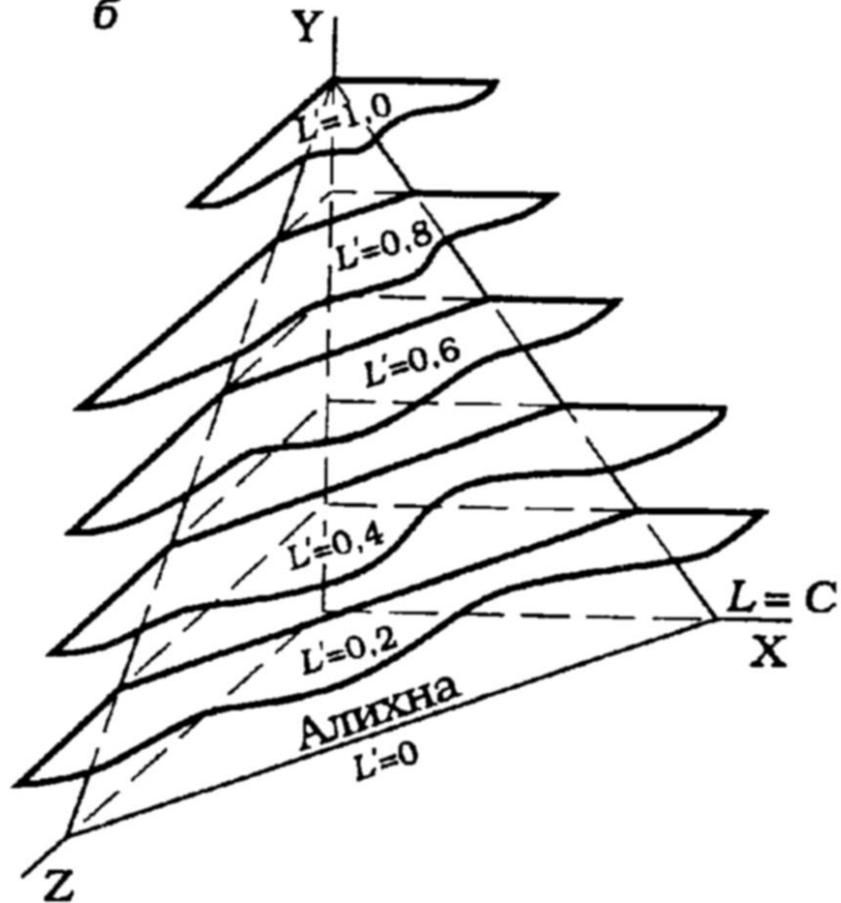
Алихна в системах RGB и XYZ



а



б



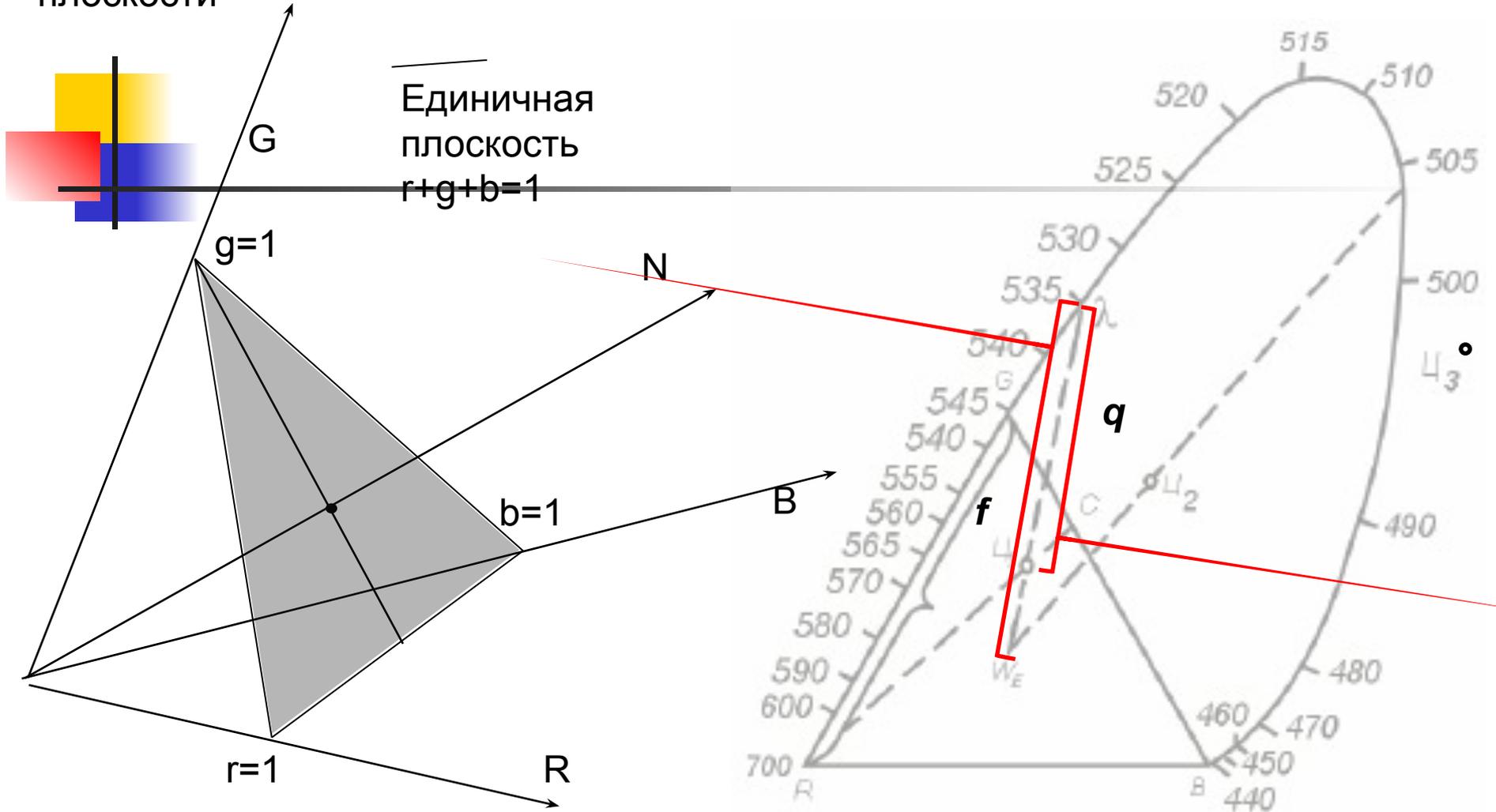
Чистота цвета

1. Плоскость цветности отличается от плоскости равных яркостей в системе RGB. Однако, цвет тем чище (менее разбелен), чем он ближе к контуру локуса.
2. Из-за явления метамерности любой цвет можно представить смесью спектрально-чистого с доминирующей длиной волны (хроматическая составляющая) и равноэнергетического белого (ахроматическая составляющая).
3. Будем характеризовать яркость единицы спектрально-чистого цвета с длиной волны λ величиной L_λ , а яркость единицы белого – величиной L_W . Абсолютные значения яркостей L_λ и L_W роли не играют, в формулу войдет только их отношение.
4. Цвет C можно считать смесью m единиц белого и n единиц спектрально-чистого цвета с длиной волны λ . Чистота цвета p равна отношению яркости спектрально-чистого цвета в нем ко всей его яркости:

$$p = \frac{nL_\lambda}{nL_\lambda + mL_W}; \quad L_\lambda = rL_R + gL_G + bL_B; \quad L_W = \frac{1}{3}(L_R + L_G + L_B)$$

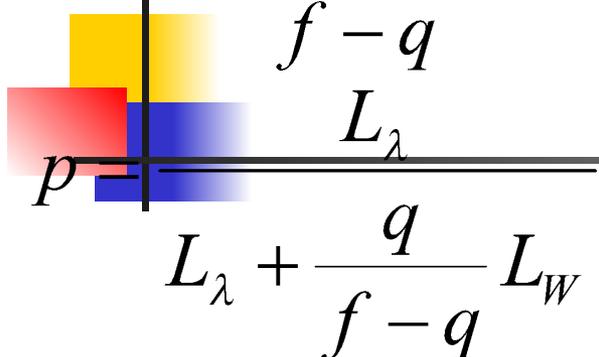
где L_R , L_G и L_B – числа, пропорциональные яркостным коэффициентам.

5. Рассмотрим плоскость единичных цветов и locus, образованный в этой плоскости



Соотношение между n и m найдем по правилу центра тяжести, считая, что груз n помещен в точку λ , а груз m – в точку W_e . Измерим расстояние q (от точки λ до U) и f (от точки λ , до W_e). Условие равновесия $m(f - q) = nq$: «сила×плечо».

Из условия равновесия. Значения p и q берутся в произвольных единицах, **НО!** в равном масштабе.



По введенному определению

$$L_{\lambda} + \frac{q}{f - q} L_W$$

$$L_{\lambda} = rL_R + gL_G + bL_B; \quad L_W = \frac{1}{3}(L_R + L_G + L_B)$$

$L_R = K$; $L_G = 4,5907K$; $L_B = 0,0601K$ – яркость в системе RGB определяется с точностью до единиц K .

Координаты r , g и b берутся из таблицы координат цветности для найденной доминирующей длины волны с точностью до примененного дискрета длины волны.

Нереальный цвет (C_3 на рисунке) лежит за границей локуса, для него значение q будет считаться отрицательным. Это будет означать, что он более насыщен, чем спектрально-чистый цвет. Для него значение чистоты цвета p будет больше единицы.



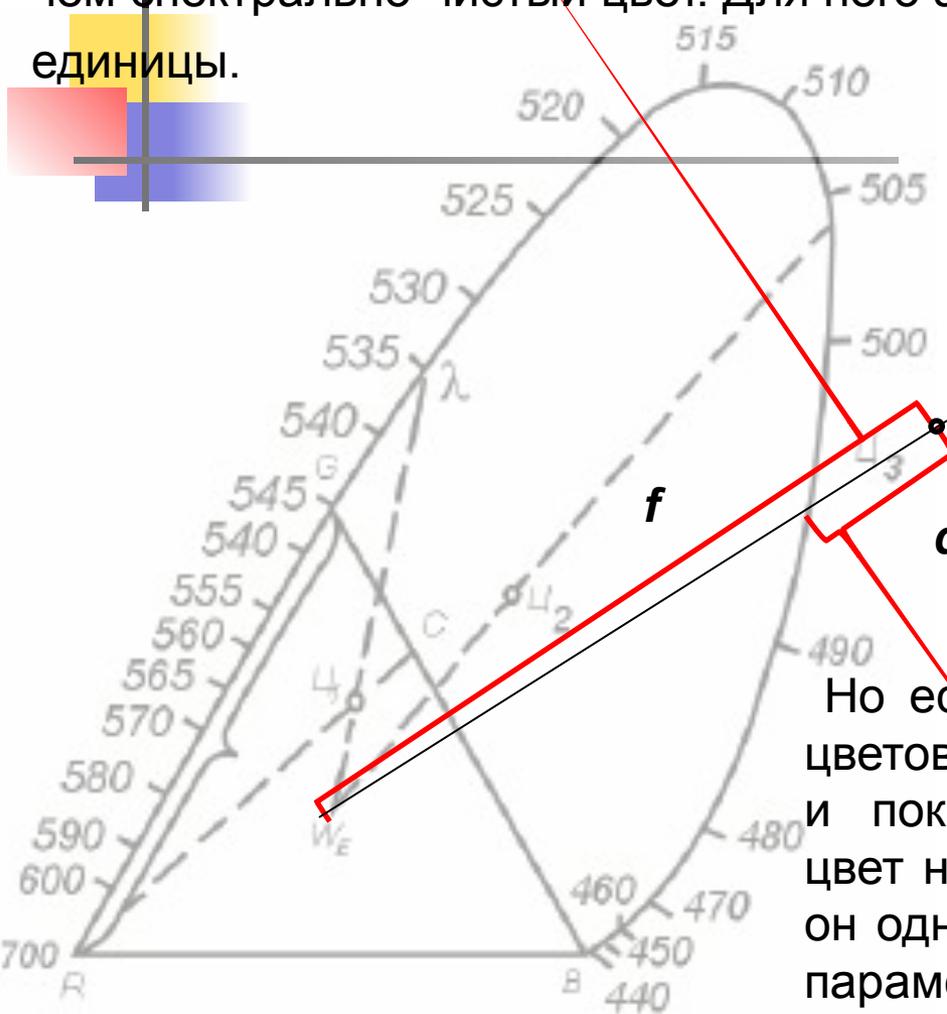
$$p = \frac{L_\lambda}{L_\lambda + \frac{q}{f - q} L_w}$$

Второй член в знаменателе имеет отрицательное значение.

Поставив на плоскости цветности любую точку, мы можем найти ее координаты, доминирующую длину волны λ и чистоту цвета p .

Но если точка лежит вне площади реальных цветов, для соответствующего ей цвета $p > 1$, что и показывает его неосуществимость. Такой цвет не существует как физический стимул, но он однозначно определяется математическими параметрами: координатами, доминирующей длиной волны, чистотой.

Можно производить сложение или вычитание нереальных цветов, вычислять их яркость.

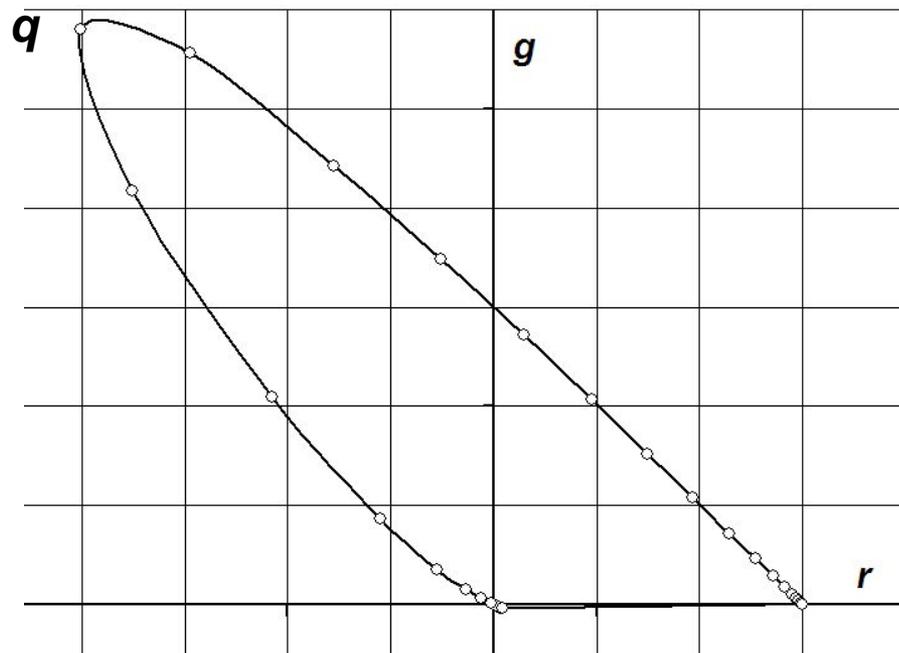
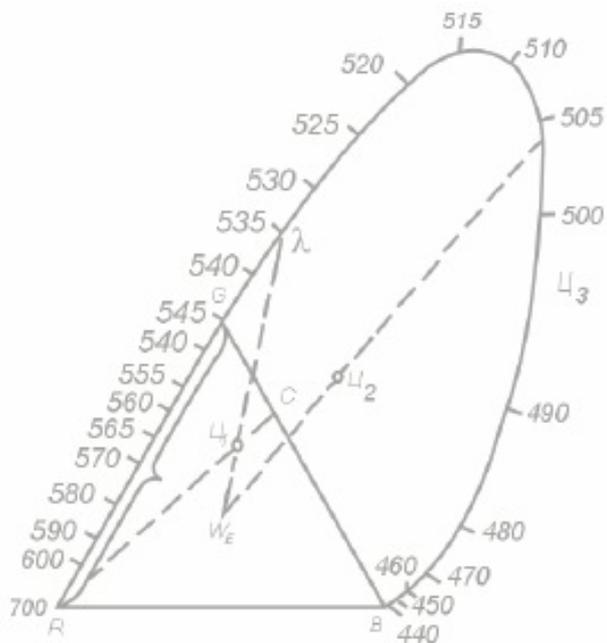


Система XYZ

Невозможно выбрать такие три основных стимула, чтобы, смешивая их, получить любой из существующих цветов.

Смещение, как правило, уменьшает чистоту цвета. Этот эффект слабо выражен в диапазоне от 540 до 760 нм. Смешивая излучения 760 и 540 нм, можно получить все цвета, почти не отличимые от спектрально-чистых.

На локусе в системе **RGB** видно, что почти 70% площади цветности лежит в области отрицательных значений координаты r . Это и есть существенный и главный **недостаток** системы **RGB**. Он сильно усложняет различные колориметрические расчеты.



Выбор трех спектрально-чистых стимулов не обеспечивает охвата (большинства) цветов.

Выход: избрать в качестве основных стимулов цвета более чистые, чем спектральные, т. е. нереальные цвета.

ПЛЮС – возможность охвата всей области реальных цветов, выражение любого существующего цвета или цветности только положительными значениями координат.

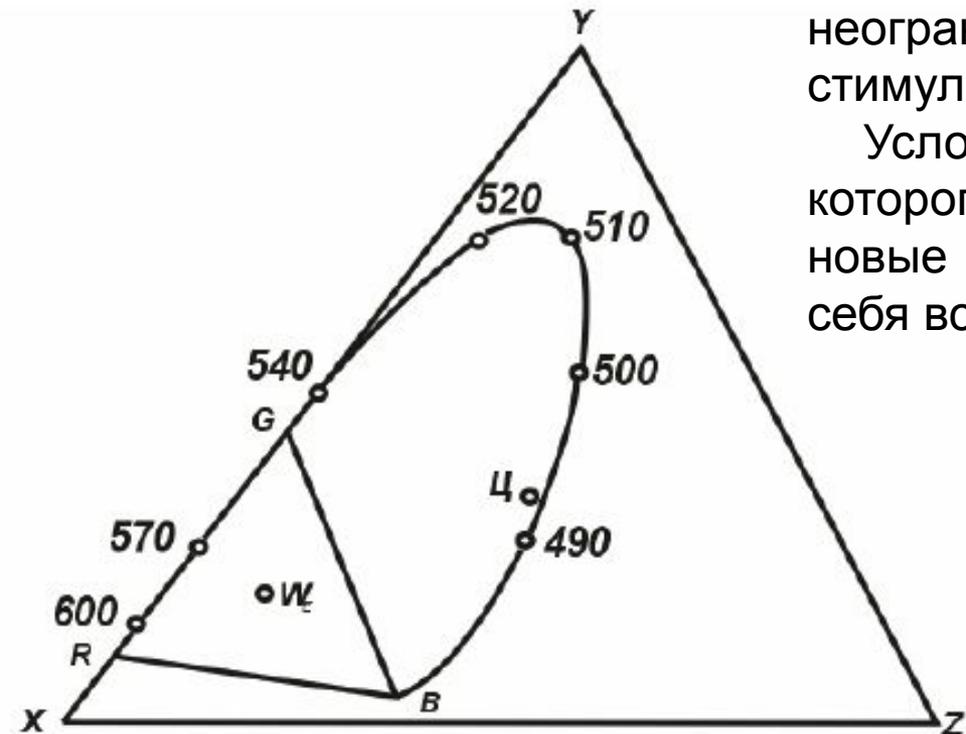
МИНУС – невозможность реального воспроизведения основных стимулов, создания визуального колориметра на их основе.

Переходя к нереальным цветам, мы получаем неограниченные возможности выбора основных стимулов.

Условие первое: треугольник, стороны которого соединяют точки, изображающие новые основные стимулы, должен включать в себя все существующие цветности.

Условие второе: преемственность.

Следует оставить прежним базисный стимул: ахроматический стимул в виде равноэнергетического белого W_E . Этот стимул должен осуществляться при сложении трех новых основных стимулов и в равных количествах.



Большое неудобство системы **RGB** – существенное различие в яркостных коэффициентах ее основных стимулов.

В новой системе можно было бы потребовать равенства яркостных коэффициентов. Однако создатели системы пошли по другому пути.

— Решено, чтобы вся яркость цвета определялась одним стимулом, а яркость двух других была равна нулю.

Основные стимулы новой системы были названы **X**, **Y** и **Z**. В основу системы **XYZ** было положено такое соотношение яркостных коэффициентов;

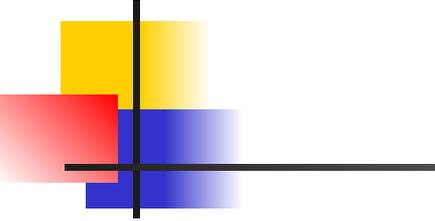
$$L_X : L_Y : L_Z = 0 : 1 : 0$$

Яркость цвета в новой системе целиком определяется координатой y' .

Единичные цвета **X**, **Y** и **Z** следует выбрать так, чтобы сумма их была равна сумме единичных цветов **R**, **G** и **B**, т. е. чтоб выполнялось условие

$$X + Y + Z = R + G + B$$

Если известны координаты цвета Ц в системе RGB r' , g' , b' , его координаты в системе XYZ можно получить с помощью матрицы перехода:



R	G	B
2,76890	1,75170	1,13020
1,00000	4,59076	0,06010
0,00000	0,05650	5,59430

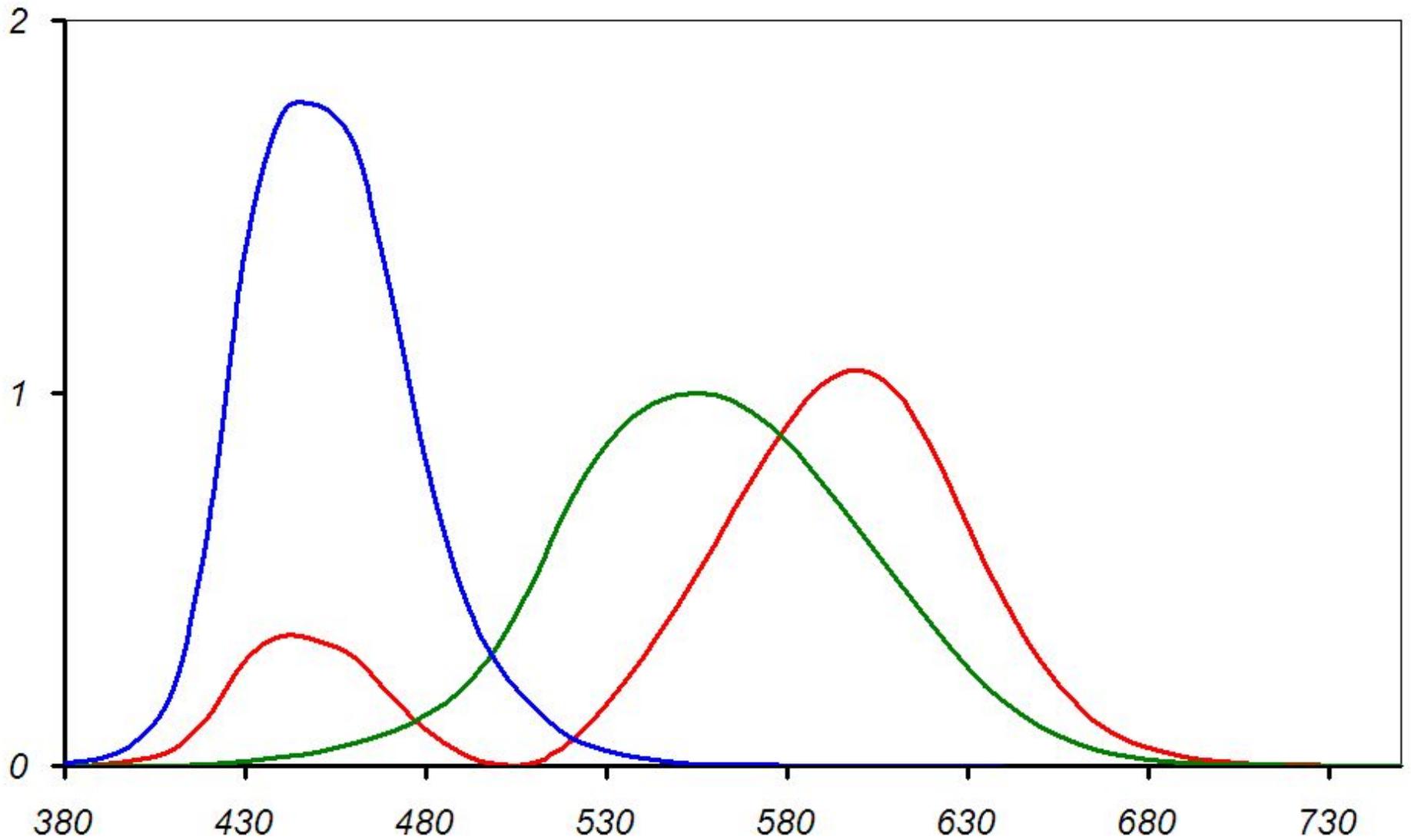
которая соответствует системе линейных уравнений:

$$x' = 2,7689r' + 1,7517g' + 1,13020b'$$

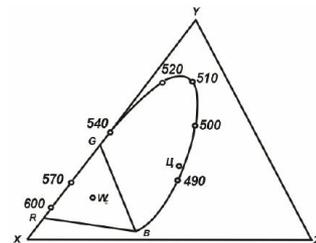
$$y' = 1,0000r' + 4,59076g' + 0,0601b'$$

$$z' = 0,0000r' + 0,0565g' + 5,59436b'$$

Если в качестве координат цвета использовать координаты цвета спектрально-чистых цветов, то получим ординаты кривых сложения в системе XYZ.

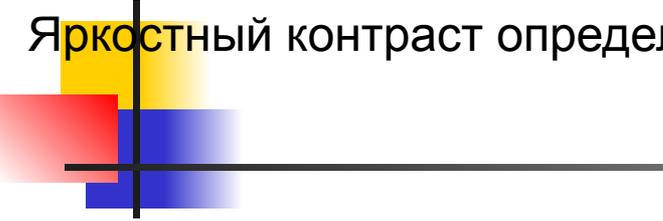


Порядок следования: синий – Z, зеленый – Y, красный – X. Это видно из рисунка.



Понятие цветового контраста

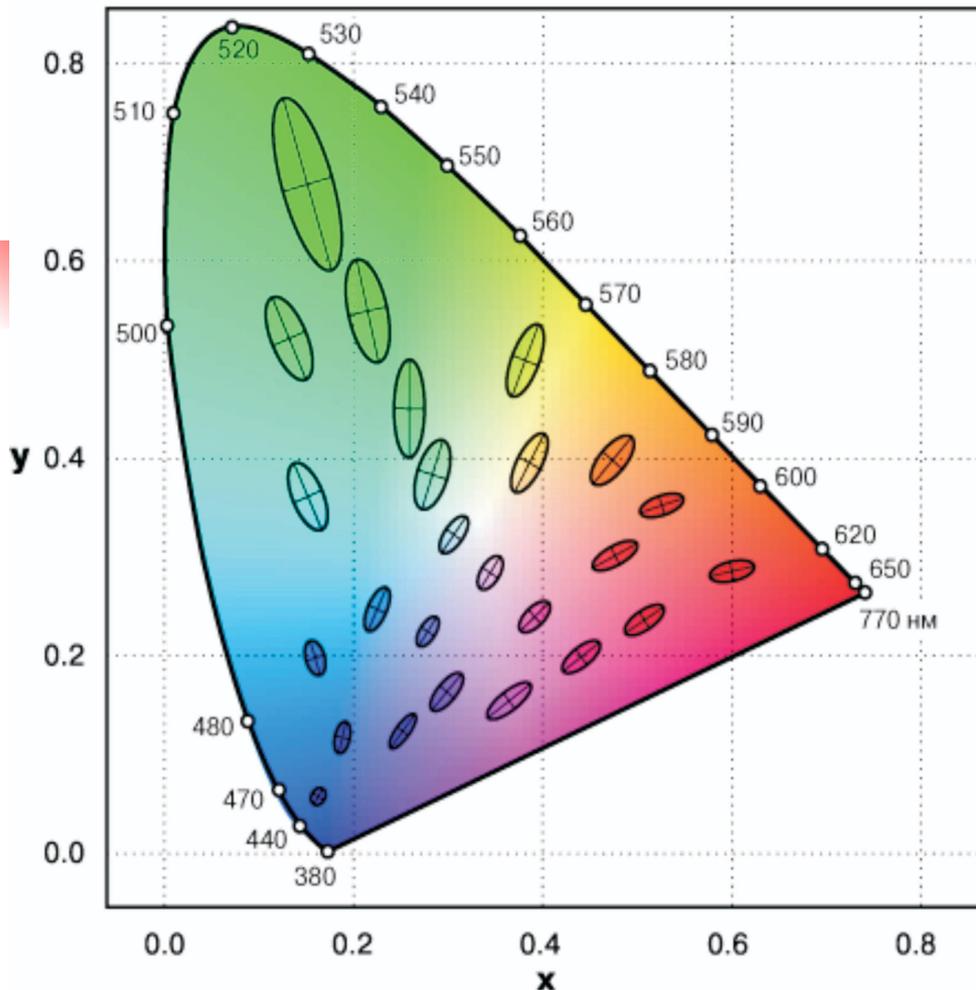
Яркостный контраст определяется как:


$$K = \frac{\Delta L}{L}$$

где L – яркость фона, ΔL – разность яркостей фона и объекта наблюдения.

Минимальный визуально различимый контраст определяется как величиной L (что отражает закон Вебера-Фехнера), так и величиной ΔL , которая при стремлении к своему минимальному значению носит название **порог**.

По аналогии с яркостным контрастом можно ввести понятие цветового контраста. Основное отличие будет состоять в том, что яркость – скаляр, т.е. определяется одной числовой характеристикой, а цвет – вектор и определяется тремя характеристиками, не всегда имеющими одну размерность, которые зависят от выбранной системы измерения цвета.



Если порог различия яркости будет обозначаться отрезком на оси яркостей, то пороги различия цвета будут представлять из себя эллипсоиды в абстрактном цветовом пространстве.

Эти эллипсоиды, спроецированные на плоскость единичных цветов (локус – фигура на плоскости цветности), будут представлять из себя эллипсы.

При этом пороговый цветовой контраст будет определяться формулой:

$$\Delta l = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$$

Величина Δl зависит от направления в абстрактном цветовом пространстве. Изображенные на рисунке эллипсы получили название **эллипсов МакАдама** (MacAdam). Для наглядности эллипсы увеличены в 10 раз.

Очевидно, что система XYZ не является равноконтрастной. В идеальной равноконтрастной системе пороговые эллипсы должны представлять одинаковые по всей площади локуса окружности.



Равноконтрастная система – такая колориметрическая система, в которой разница в цветовом контрасте между двумя любыми цветами изображается одинаковым (по возможности) отрезком в любом из направлений в любой точке цветового пространства. При этом эллипсоиды должны обращаться в сферы, а их проекции на любое из сечений (в т.ч. и на локус) – в окружности.

Требование равноконтрастности приобретает особое значение при цифровой обработке изобразительной информации и сопряжении различных цветовоспринимающих и цветовоспроизводящих устройств.

Ни одна из существующих равноконтрастных систем не удовлетворяет этому определению в полной мере.

Высшая метрика цвета – раздел колориметрии (науки об измерении цвета), занимающийся изучением минимальных (пороговых) цветовых различий.

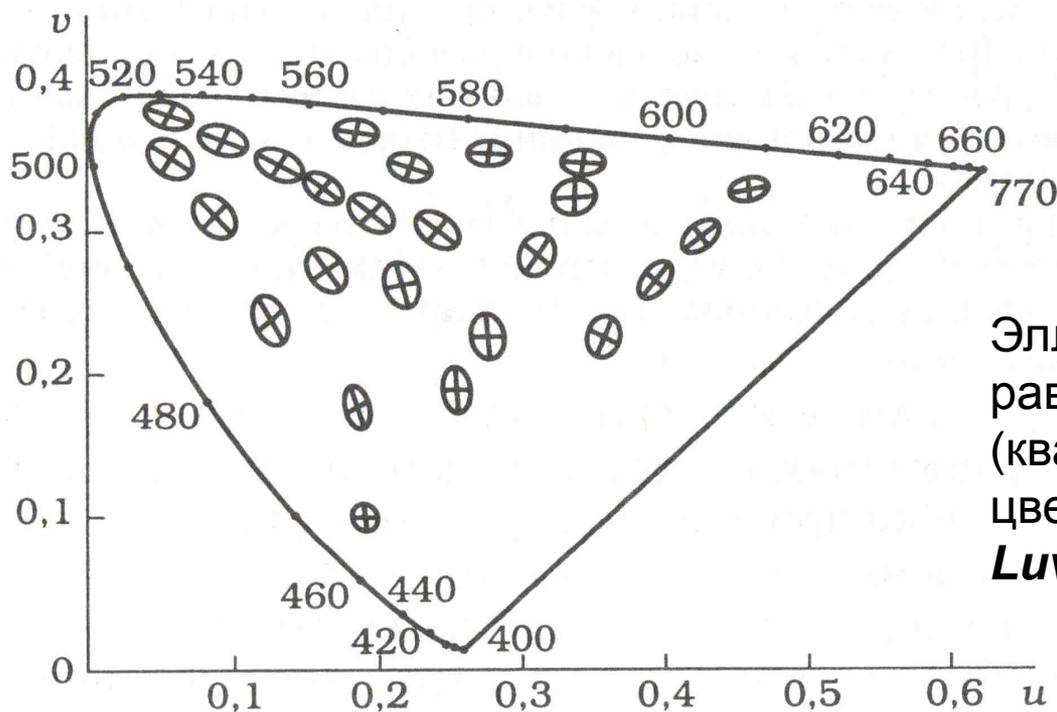
В настоящее время существуют две равноконтрастные системы CIE-76: Lab и Luv. Первая преимущественно ориентирована на несамосветящиеся объекты, вторая – на самосветящиеся.

В настоящее время на базе системы Lab основано универсальное цветовое пространство, через которое осуществляется сопряжение систем восприятия и воспроизведения цвета.

Все остальные колориметрические системы **не являются** равноконтрастными.

Однако, с введением равноконтрастных систем никто не отменяет основную практическую систему CIEXYZ, т.к. на ней базируется вся практическая колориметрия, в ней проводятся все практические измерения. Только в системах CIEXYZ и CIERGB действуют законы Грассмана (законы аддитивного синтеза цвета), позволяющие рассчитывать координаты и физические характеристики цвета.

При этом система CIERGB выполняет функцию контрольной, напрямую связанной с человеческим зрением.



Эллипсы МакАдама на равноконтрастном (квазиравноконтрастном) цветовом графике в системе **Luv**.

Формулы пересчета для системы **LUV**:

$$L^* = 116(y'/y_0)^{1/3} - 16;$$

$$U^* = 13L^*(u - u_0);$$

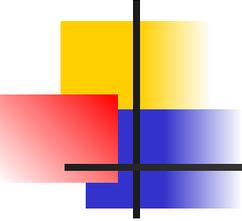
$$V^* = 13L^*(v - v_0);$$

$$u = \frac{4x'}{x'+15y'+3z'}; \quad v = \frac{9x'}{x'+15y'+3z'}$$

Большими буквами и штрихами обозначены координаты цвета в соответствующих системах, малыми – координаты цветности. Нулевыми индексами обозначены координаты точки белого, т.е. один из **стандартных источников**. Координата яркости белого y_0 принимается равной 100.

Величина цветового различия ΔE (нормируемый в полиграфии показатель):

$$\Delta E(L^*U^*V^*) = ((L^*_1 - L^*_2)^2 + (U^*_1 - U^*_2)^2 + (V^*_1 - V^*_2)^2)^{1/2}$$



Система **Lab**:

$$L^* = 116(y'/y_0)^{1/3} - 16;$$

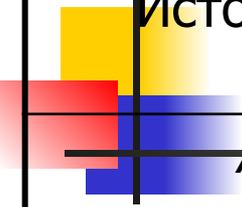
$$a^* = 500((x'/x_0)^{1/3} - (y'/y_0)^{1/3});$$

$$b^* = 200((y'/y_0)^{1/3} - (z'/z_0)^{1/3}).$$

Цветовое различие $\Delta E(L^*a^*b^*)$ между цветами Ц1 и Ц2:

$$\Delta E(L^*a^*b^*) = ((L^*_1 - L^*_2)^2 + (a^*_1 - a^*_2)^2 + (b^*_1 - b^*_2)^2)^{1/2}$$

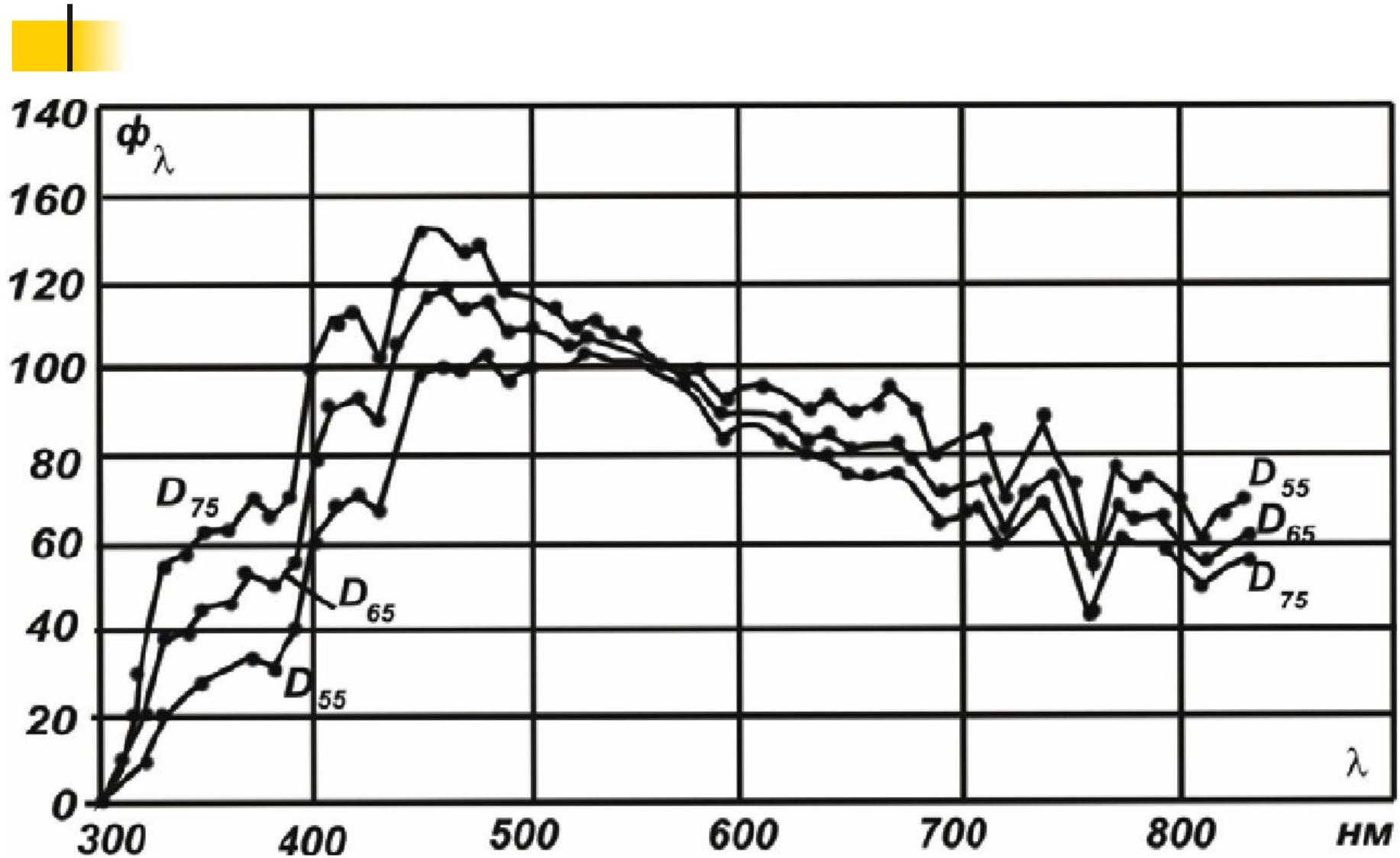
Стандартные фотометрические источники МКО (CIE)



Источник	Координата цветности x	Координата цветности y	Цветовая температура, K
<i>A</i>	<i>0,4476</i>	<i>0,4074</i>	<i>2856</i>
<i>B</i>	<i>0,3484</i>	<i>0,3516</i>	<i>4874</i>
<i>C</i>	<i>0,3101</i>	<i>0,3162</i>	<i>6774</i>
<i>D55</i>	<i>0,3324</i>	<i>0,3475</i>	<i>5503</i>
<i>D65</i>	<i>0,3127</i>	<i>0,3290</i>	<i>6504</i>
<i>D75</i>	<i>0,2990</i>	<i>0,3150</i>	<i>7504</i>

Равноэнергетический белый имеет координаты (0,33; 0,33) и обозначается *E*. Источники типа *F* моделируют различные типы флуоресцентных ламп.

Распределение спектральной плотности мощности источников типа D.



Запас картинок

