

Съдържание

| | |
|--|------------|
| ВЪВЕДЕНИЕ | 7 |
| СЪЩНОСТ НА ЦВЕТОВЕТЕ И НА ТЯХНОТО ВЪЗПРИЕМАНЕ | 9 |
| ЦВЕТОВЕ И СПЕКТРИ | 14 |
| ОСНОВНИ ПОНЯТИЯ И ВЕЛИЧИНИ В КОЛОРИМЕТРИЯТА..... | 26 |
| ПРЕОБРАЗУВАНЕ НА ЦВЕТОВЕТЕ В СИВАТА СКАЛА | 33 |
| СМЕСВАНЕ НА ЦВЕТОВЕТЕ | 34 |
| ИЗТОЧНИЦИ НА СВЕТЛИНА И ЦВЕТОВЪЗПРИЕМАНЕ | 46 |
| ОПТИЧНИ СВОЙСТВА НА МАТЕРИАЛИТЕ, КОИТО ВЛИЯТ НА ВЪЗПРИЕМАНЕТО НА ЦВЕТОВЕТЕ | 56 |
| ЦВЕТОВЕ ПРИ ОТРАЖЕНИЕ НА СВЕТЛИНАТА..... | 56 |
| Влияние на поляризацията на светлината ВЪРХУ ОТРАЖЕНИЕТО И ЦВЕТОВОТО ВЪЗПРИЕМАНЕ..... | 61 |
| ЦВЕТОВЕ ПРИ ПРОПУСКАНЕ И ПОГЛЪЩАНЕ НА СВЕТЛИНАТА | 68 |
| ЦВЕТОВЕ ПРИ ПРЕЧУПВАНЕ НА СВЕТЛИНАТА | 73 |
| ЦВЕТОВЕ ПРИ ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ И ДИФРАКЦИЯ НА СВЕТЛИНАТА..... | 79 |
| Физични фактори, които влияят на цветовете и възприемането им в природата и техниката | 87 |
| ЦВЕТНА ТЕМПЕРАТУРА НА СВЕТЛИННИТЕ ИЗТОЧНИЦИ | 91 |
| ЦВЕТОПРЕДАВАНЕ. ИНДЕКС НА ЦВЕТОПРЕДАВАНЕ..... | 93 |
| Влияние на физичните фактори върху оптичните свойства и цвета на тънки слоеве..... | 99 |
| Кирлианова фотография | 101 |
| ВЪЗПРИЕМАНЕ НА ЦВЕТОВЕТЕ В ЖИВАТА ПРИРОДА..... | 102 |
| ЦВЕТОВЕТЕ В НЕВИДИМИЯ СВЯТ НА УЛТРАВИОЛЕТОВИТЕ ЛЪЧИ | 107 |
| ЦВЕТОВЕТЕ В НЕВИДИМИЯ СВЯТ НА ИНФРАЧЕРВЕНИТЕ ЛЪЧИ..... | 112 |
| ДРУГИЯТ СПЕКТЪР НА СВЕТЛИНАТА..... | 137 |
| ЦВЕТОВЕТЕ И МЕЗОПИЧНОТО ЗРЕНИЕ ПРИ ЧОВЕКА | 148 |
| Природни дадености, оказали влияние върху развитието на цветното зрение при човека..... | 153 |
| Възможности на цветното зрение при човека | 155 |

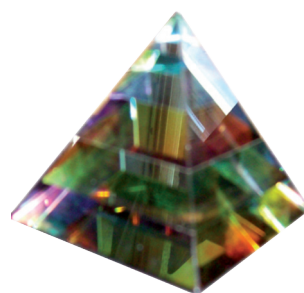
| | |
|---|------------|
| Високоскоростно заснемане на цветни изображения | 169 |
| Възникване на цветните възприятия при живите организми и хората..... | 179 |
| Усещане и възприемане | 188 |
| Спектри на електромагнитните вълни..... | 212 |
| Цветове при релативистични скорости. Релативистичен ефект на Доплер..... | 221 |
| Теория на ахроматичните фотони и спектър на сивата светлина..... | 224 |
| Колориметрични системи..... | 227 |
| Разлики между цветовете | 230 |
| Пространства на комплексните цветове | 237 |
| Геометрии на измерване на цвета..... | 240 |
| Колориметрични уреди за измерване на цветовете | 243 |
| ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА | 251 |

Въведение

Във време на все по-тясна научна специализация, вторачени в отделните детайли, все по-често изпускаме от поглед картината на света около нас. Книгата е опит този недостатък да бъде преодолян по отношение на един удивителен феномен, с който се сблъскваме ежедневно и тъкмо поради това той рядко получава полагащото му се внимание. В ръцете си държите една пълноцветна книга, събрала в себе си изключително изобилие от гледни точки към... цветовете.

Тя въвежда в науката за цветовете, като обхваща голяма част от нейните направления. Някои от тях са разгледани по-задълбочено, а други просто са отбелязани.

Ще намерите информация за физическата същност на цветовете, за видимата и невидимата част на светлинния спектър, за начините за получаване, обработване и възпроизвеждане на цветни изображения, за различни колориметрични системи, както разработени в миналото, така и въведени за пръв път от автора, за възприемането на цветовете при човека и останалите живи същества, за възникването и еволюцията на цветните възприятия, за тяхната физиологична основа и биологично значение, за съвременните технологични подходи за анализ на електромагнитни лъчения. Благодарение на широтата на подхода на автора, книгата ни разкрива много нови или малко познати аспекти на заобикалящия ни свят, позволява ни да надникнем в онези негови скрити кътчета, които все още не можем да проумеем напълно. Наред с много общоизвестни факти, тук са представени и такива, които се представят за първи път. Разгледани са например допълнителният спектър на светлината, както и спектрите на черната, сивата и бялата светлина. Книгата има научно-популярен характер и е предназначена за широка читателска аудитория, включително ученици, студенти, преподаватели и изследователи. Достъпността на изложението е наложила премахването на цитиранията, като в същото време е предоставен богат илюстративен материал, включващ близо 1000 графики, снимки и диаграми: почти всички са дело на автора.





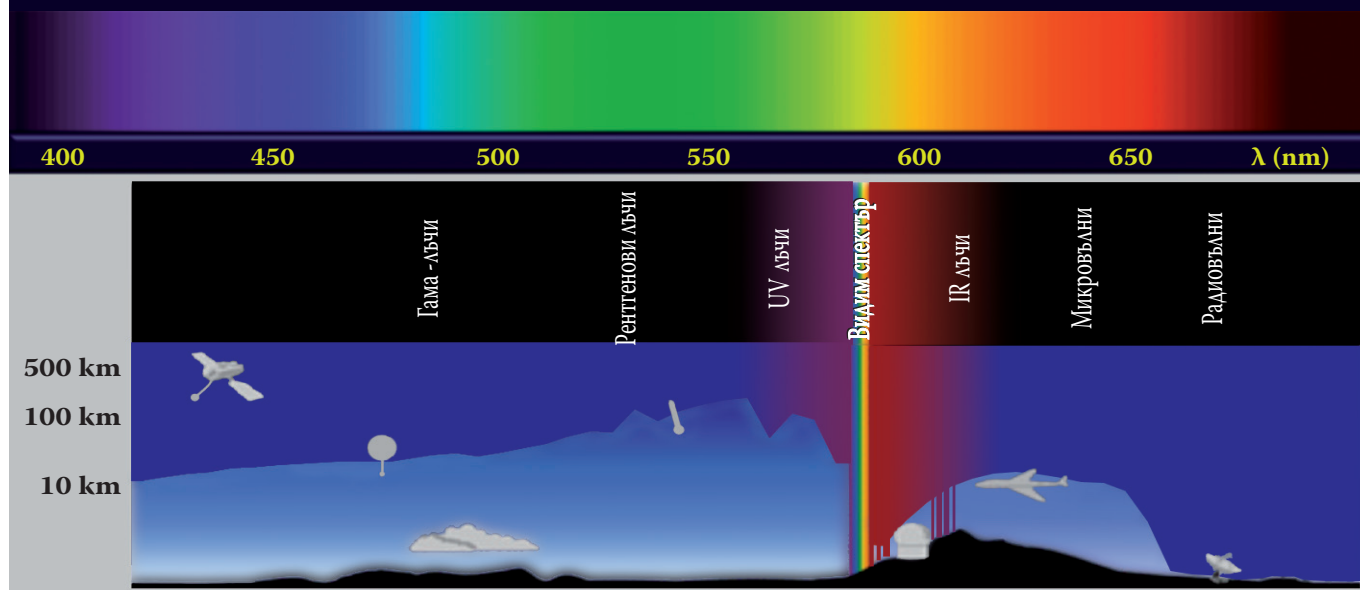
N. Alexandrov

СЪЩНОСТ НА ЦВЕТОВЕТЕ И НА ТЯХНОТО ВЪЗПРИЕМАНЕ

Цветовете са навсякъде около нас. Те придават красота и хармония на света, в който живеем, но... са изцяло продукт на съзнанието. Възприемането на цветовете се основава на зрителните усещания, които предизвиква електромагнитно лъчение с определени дължини на вълните. За човешкото зрение този спектрален диапазон е твърде ограничен – обхваща дължини на вълните от 380 до 780 nm. Той заема по-малко от една трилионна част от диапазона на електромагнитния спектър.

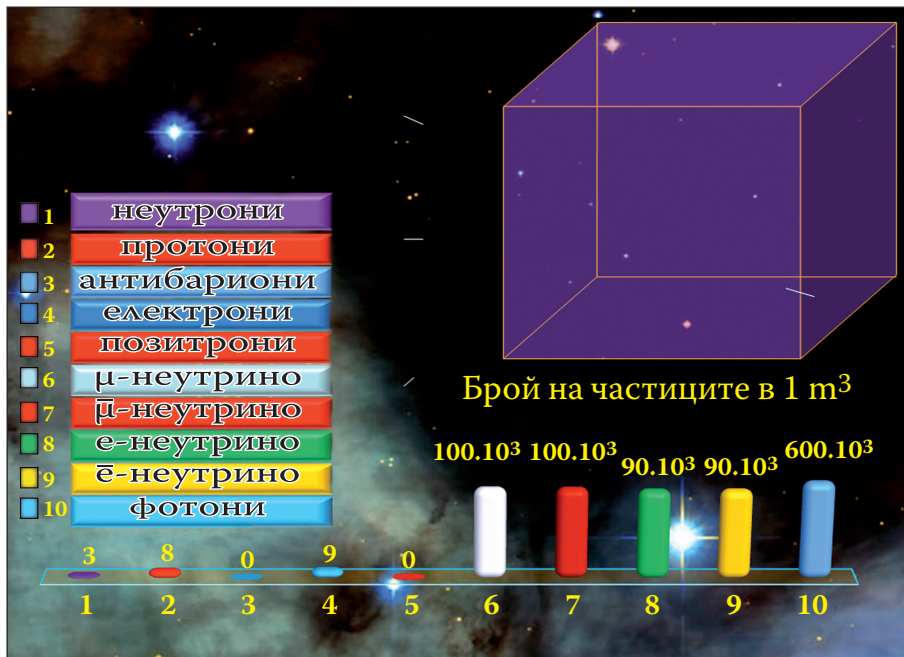
От всички елементарни частици, които се разпространяват в космичното пространство фотоните (квантите на електромагнитните лъчения) са най-много. Средната плътност на разпределение на фотоните в космоса е приблизително 600 000 в m^3 .

Видим спектър на електромагнитните вълни



Земната атмосфера спира изцяло гама и рентгеновите лъчи, а и по-голямата част от ултравиолетовите и инфрачервените лъчи. Лилавият фон показва границите, до които тези лъчи проникват в нея





Средна плътност на разпределение на елементарните частици в космичното пространство

Електромагнитните лъчения идват от Слънцето, Луната и звездите в близкия и далечен космос, излъчват се от всички електроуреди около нас; но в цвят възприемаме само малка част от това лъчение. В този смисъл **цветът е зрително усещане, предизвикано от различния спектрален състав на електромагнитното лъчение, което позволява качествено му разпознаване в определен спектрален диапазон.** Той е различен за различните живи същества, обитаващи планетата ни.

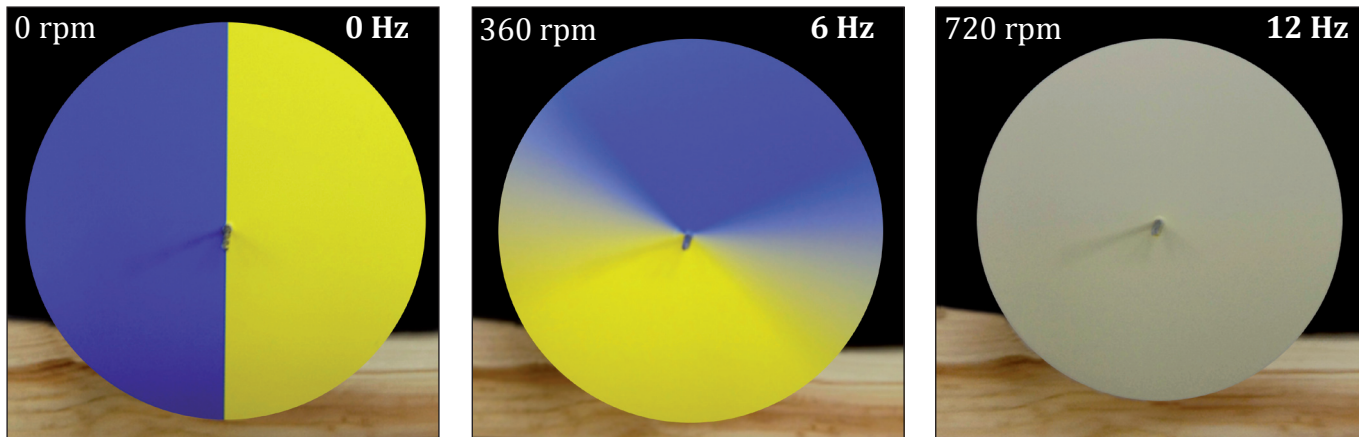
Електромагнитното лъчение няма цвят. При възприемане от зрителните рецептори то се обработва и сортира според енергията и броя на квантите (фотоните), приети за определено време, и в зависимост от тази енергия и нейното разпределение се възприема от съзнанието в цвят. Светът около нас може да бъде оприличен на черно-бял филм, който съзнанието ни възприема като цветен. Осъзнаването на наблюдаваната картина от заобикалящия ни свят се извършва след синтез на възприетото от очите ни в кортекса на главния мозък. Там подадените биоелектрични сигнали от очните нерви отключват определени цветови усещания и наблюдаваната картина се оцветява. Човек възприема образите посредством очите, но ги осъзнава и оцветява едва в главния си мозък.



Трансформация на черно-бяло изображение в цветно

Доказателство в полза на това твърдение дава следният опит за възприемане на цветовете от човешкия мозък. Нека разделим един диск на две равни части и след това оцветим двете половини в жълт и в син цвят. Да закрепим диска към оста на електромотор и да го включим. При достигането на определена скорост на въртене ще видим, че двата първоначални цвята са изчезнали и на тяхно място се е появил светлосив цвят.

При завъртането си дискът продължава да отразява електромагнитно лъчение, което активира рецепторите ни за получаване на усещане за жълт и син цвят, но в резултат на смесването при достигането на определена честота на въртене съзнанието ни възприема диска като светлосив. При тези нови условия зрителните ни рецептори са генерирали сигнал, който е отключил от матрицата на усещанията светлосивия цвят и е



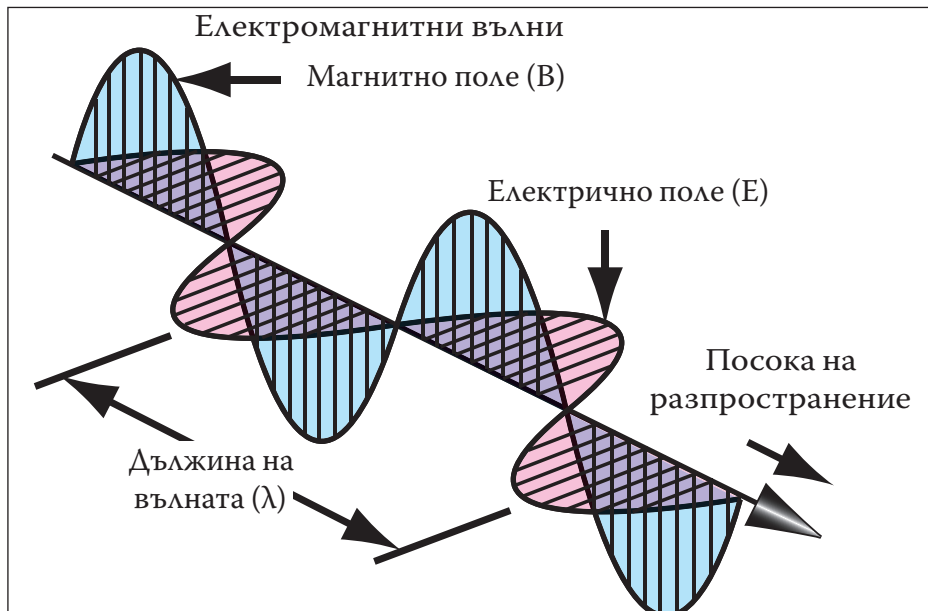
Промяна и смесване на цветовете при въртене

потиснал усещането за жълт и син цвят в съзнанието ни. Така ние възприемаме, че дискът е светлосив, въпреки че отразеното електромагнитно лъчение от повърхността не се е променило количествено и включва същите дължини на вълните. Изменено е само неговото разпределение в пространството и във времето.

За да изясним процеса на цветното възприемане на електромагнитните вълни във видимия обхват, нека разгледаме първо основните им елементи и параметри, които влияят на този процес.

Електромагнитните вълни са напречни. В тях електричното и магнитното поле трептят във взаимно перпендикулярни направления, които на свой ред са перпендикулярни на посоката на разпространение на вълните.

Дължината на вълната се определя като разстоянието между два съседни максимума на амплитудата на електричното поле. Големината на трептенето се определя от амплитудите на двете вълни. С увеличаването на честотата и намаляването на дължината на вълната амплитудата на електричното поле нараства, докато амплитудата на магнитното намалява. Интензитетът на вълната е пропорционален на квадрата на амплитудата.



В различни среди скоростта на електромагнитните вълни се мени; във вакуум е $c_0 = 299\,792\,458$ m/s. Енергията на електромагнитната вълна (E) е пропорционална на нейната честота (ν): $E = h\nu$, където h е константата на Планк. Връзката между дължината на вълната (λ) и нейната честота (ν) се дава от уравнението: $\nu = c / \lambda$, където c е скоростта на електромагнитната вълна в съответната среда на разпространение.

Електромагнитните вълни се разпространяват под формата на вълнови пакети, наречени фотони. Те имат свойствата и на частици, и на вълни – т.нар. корпускулярно-вълнов дуализъм. Фотоните се наричат още кванти електромагнитна енергия, защото последната е пропорционална на константата на Планк и на честотата на вълновите пакети. Така например фотони с равни дължини на вълните имат еднаква енергия и предизвикват усещане за един и същи цвят.

Предизвикването на усещане за даден цвят зависи на първо място от дължината на вълната на приетото електромагнитно лъчение. Зрителни усещания за цвят се предизвикват само при приемането на електромагнитно лъчение в обхвата между 380 до 780 nm. За всяка дължина на вълната от видимия спектър има определено усещане за цвят, не на всяко усещане за цвят съответства

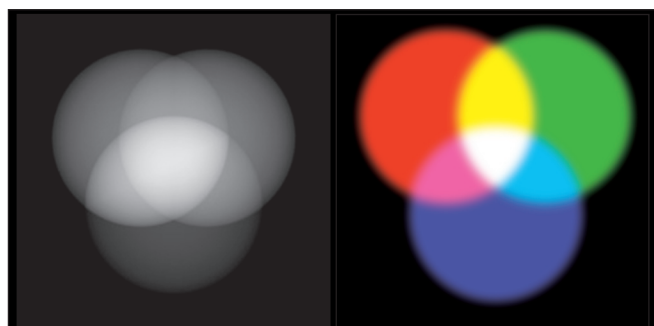
точно определена дължина на вълната от електромагнитния спектър. На усещането за бял цвят не съответства определена дължина на вълната или честота, а цял набор от дължини на вълните, респективно честоти (дори целия видим спектър). За да имаме усещане за бял цвят, трябва да възприемем лъчение, включващо най-малко две определени дължини на вълните. Усещането за бял цвят се предизвиква най-вече от лъчение със сравнително равномерно разпределен във видимия обхват спектър с висока интензивност. То зависи от броя на квантите (фотоните) с определени дължини на вълните, които се приемат от зрителните рецептори за единица време.



тър с висока интензивност. То зависи от броя на квантите (фотоните) с определени дължини на вълните, които се приемат от зрителните рецептори за единица време.

Усещането за черен цвят се предизвиква при липса на приети от зрителните рецептори електромагнитни вълни от видимата част от спектъра. Белият и черният цвят са двата **основни неутрални цвята**. При смесване с други цветове те губят качествата си на основни цветове.

Сивият цвят е **единственият неутрален вторичен цвят**, получен от смесване на другите два основни неутрални цвята – бял и черен. При смесване с други цветове, които не са неутрални, сивият цвят престава да се възприема като такъв. Белият цвят най-лесно губи качеството си на основен неутрален цвят при най-малкото смесване с хроматичен, сив или черен цвят.



Идеално бяла повърхност е тази, която дифузно отразява и разсейва напълно лъченията с различни дължини на вълните от видимия спектър равномерно по всички направления и без поглъщане.

Получаването на такава повърхност е невъзможна за момента задача. Максималният коефициент на дифузно отражение за електромагнитните вълни от видимия спектър достига до 99,5 %. Обикновено като разсейващи вещества в еталоните за дифузно отражение се използват бариевият сулфат $BaSO_4$ или „Спектралон“.

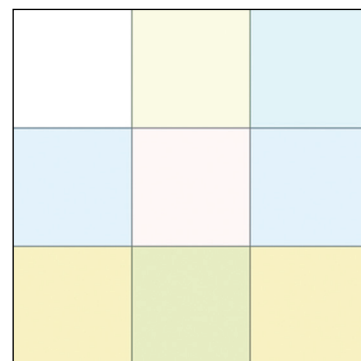
Идеално черна повърхност е тази, която поглъща изцяло лъчение, включващо всички дължини на вълните от видимия спектър. На практика е невъзможно да бъдат получени идеално бяла и идеално черна повърхност.

В последно време е получена почти идеална черна повърхност, която отразява само 0,075 % от падналата светлина. Тя е направена от специален порьозен материал, който поглъща и трансформира почти изцяло падналата светлина в топлинно лъчение и може да намери голямо приложение в енергетиката.

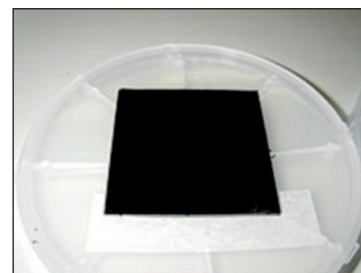
Поради специфичната прагова чувствителност на зрителните си рецептори хората възприемат като черни, тези повърхности, които поглъщат над 95 % от светлината при всички дължини на вълните от видимия диапазон. Сив наситен цвят може да се получи както при смесване на двата основни неутрални цвята – черен и бял, така и при смесване на различни хроматични цветове, като например червен и циан, зелен и магента, жълт и син. Това са т.нар. **комплементарни** (англ. complementary – допълващи се) **цветове**.

В теорията на цветовете два цвята се наричат **комплементарни**, ако при смесването им в определени пропорции се получава неутрален цвят (черен, сив или бял). В този процес яркостта и наситеността играят важна роля. Така например, ако смесим жълт и светлосин цвят, ще получим зелен цвят, но ако смесим жълт с тъмноносин цвят в подходящо съотношение, ще получим наситено сив цвят. Комплементарността на два цвята се определя изцяло от начина на смесване. Ако при адитивно смесване два цвята са комплементарни, това не означава, че те ще са такива при субтрактивно смесване. Двата начина на смесване ще бъдат разгледани подробно в теорията на смесването на цветовете (вж. с. 28 и 34). Комплементарността на цветовете зависи в голяма степен от спектралното разпределение на светлинния поток при отражение и пропускане.

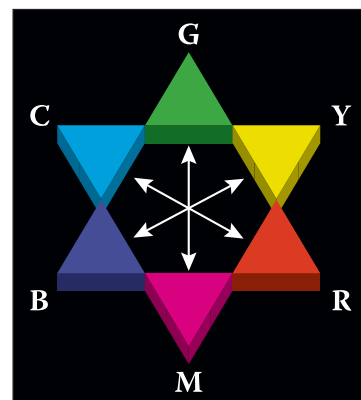
Комплементарните цветове заемат противоположни места в цветната графика. Обикновено най-голям цветен контраст се получава при съпоставяне на комплементарни цветове



Еталонни бели сравнителни материали за спектрален коефициент на дифузно отражение във видимия обхват на спектъра



Снимка на най-черната получена до момента повърхност



Цветове и спектри

Освен комплементарни цветове съществуват и **комплементарни спектри**. При смесването им при еднаква размерност и зададена предварителна подредба те дават неутрален цвят или неутрален спектър. Последният е комбинация от наситени и ненаситени неутрални цветове.

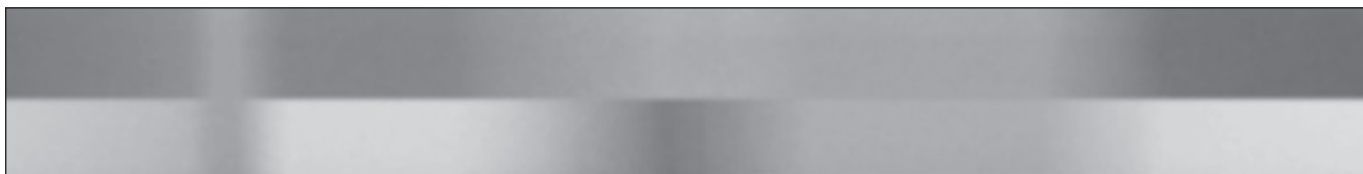
Във физиката под понятието **спектър** се разбира набор от стойности на физични величини или цветове, подредени в определена последователност. В зависимост от начина на подреждането им в пространството съществуват линейни, двумерни (2D) или тримерни (3D) спектри. Първоначално понятието спектър е произлязло от разлагането на бялата светлина в линеен набор от цветове, отговарящи на електромагнитни вълни с определени дължини. Постепенно с развитието на науката понятието спектър разширява приложението си. Така се появяват емисионните спектри при излъчване на телата и абсорбционните спектри на поглъщане на електромагнитните вълни с определени дължини. От своя страна, емисионните спектри се разделят на прекъснати и непрекъснати.

Единствено спектърът на електромагнитните вълни от видимия обхват е свързан еднозначно с възприеманите от човека цветове. Неутралните ахроматични цветове, като бял, сив или черен, могат да се получат при комбинация от определени набори от цветове. От тази гледна точка те също са свързани с електромагнитния спектър на светлината.

Ахроматичният спектър съдържа всички нюанси между черния и белия цвят. В средата му е разположен наситеният сив цвят. Този спектър е изцяло **ахроматичен**, тъй като е съставен единствено от неутрални цветове като черен, бял и сив с различна наситеност.



Наситен сив цвят може да се получи при адитивното смесване на два ахроматични спектъра (като показаните).



Наситен сив цвят може да се получи и при адитивното смесване на два хроматични спектъра като показаните. **Хроматичните спектри** са съставени само от подредени хроматични цветове.



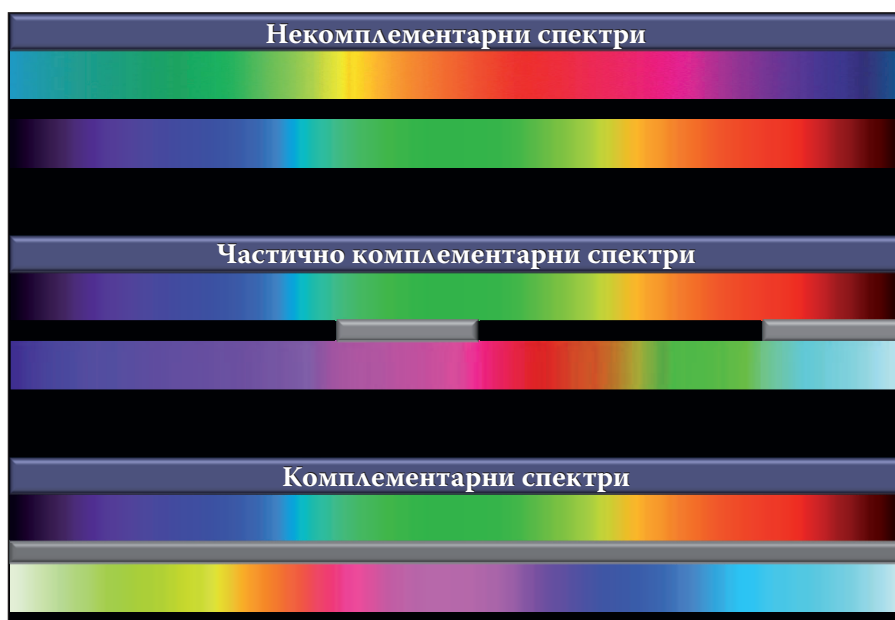
При смесването на два хроматични спектъра може да се получи нов изцяло хроматичен спектър, но може да се получи и неутрален ахроматичен спектър, както и смесен спектър. Последният съдържа както хроматични, така и неутрални цветове.

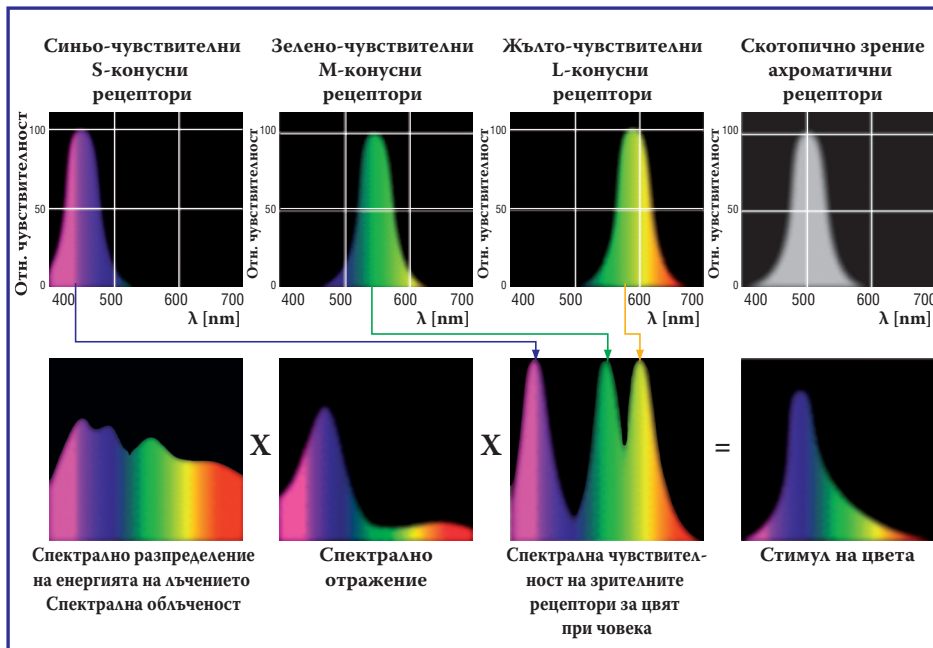
При адитивното смесване на два или повече ахроматични спектъра задължително се получава ахроматичен неутрален спектър. При смесване на хроматичен и ахроматичен спектър се получава хроматичен спектър.

Ситуацията при смесване на отделни цветове е малко по-различна. Ако два хроматични цвята се смесят, се получава или хроматичен, или неутрален цвят. Само в случаите на метамерно възприемане може да се реализират и двете възможности едновременно.

Когато се смесят два или повече неутрални цвята, задължително се получава ахроматичен цвят. При смесване на повече от два цвята, хроматични и неутрални, положението е по-сложно. Специално внимание заслужават т.нар. **комплексни цветове**, които заемат междинно място между отделните цветове и цветните спектри.

При смесването на цветовете са валидни законите, открити от немския учен и изследовател Херман Гюнтер Грасман, публикувани през 1853 г. Първият от тях гласи: четири различни цвята винаги са зависими (всеки един от тях може да бъде получен чрез смесване на други три цвята). Броят на цветовете, които могат да бъдат получени от три независими цвята, е неограничен. Вторият закон постулира: не съществуват цветове, които да не могат да бъдат получени при смесването на други цветове. При изменение на някой от цветовете при смесване (количествено или качествено) се променя резултантният цвят. Третият закон гласи: полученият цвят зависи само от цветовете на смесваните цветови стимули. Под **стимул на цвята** се разбира лъчение с определена интензивност и спектрален състав, което, прониквайки в окото, предизвиква усещане за цвят.





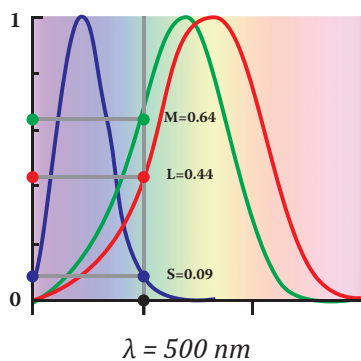
Стимулът на цвета е функция от спектралното разпределение на енергията на лъчението от един или повече светлинни източници, от трансформацията, която това лъчение претърпява, преди да достигне до зрителните органи и от спектралната чувствителност на сензорните клетки за цвят в очите. Лъчението може да бъде отразено от дадено тяло и тогава стимулът на цвета ще зависи от спектъра при отражение от повърхност-

Получаване на стимул на цвета

та му и по-точно от това вълни с каква дължина ще бъдат отразени от тази повърхност. Трите вида рецепторни клетки за цвят – късо-вълнови (**S**hort waves), средновълнови (**M**iddle waves) и дълговълнови (**L**ong waves), които са разположени в ретината на окото, ще реагират на отразеното лъчение в зависимост от своята спектрална чувствителност. Така в крайна сметка ще се формира стимулът на цвета, който ще предизвика съответното усещане за цвят у човека.

При монохроматично лъчение с определена дължина на вълната трите основни типа рецептори за цвят в окото на човека ще реагират по различен начин. Така например при монохроматично лъчение с дължина на вълната $\lambda = 500 \text{ nm}$ най-силно ще отреагират M-конусчетата, по-слабо L-конусчетата и най-слабо S-рецепторите. Коефициентите за степента на отреагиране на трите вида рецептори са дадени на графиката. При монохроматично лъчение с друга дължина на вълната от видимия обхват съответно тези коефициенти ще имат съвсем други стойности.

Възприемане на монохроматично лъчение при дължина на вълната 500 nm



Електромагнитните вълни, които пронизват пространството, имат различни честоти и интензитет. Различният честотен диапазон на светлината е една от основните причини за съществуването на богатата палитра на усещанията за цвят. Втората причина за съществуването на огромно количество усещания за цвят се дължи на получаването на нови цветове и нюанси при смесването на електромагнитни вълни с различни дължини. Ако смесим боя, отразяваща електромагнитно лъчение, което предизвиква усещане за син цвят, с боя, отразяваща електромагнитно лъчение, което предизвиква усещане за жълт цвят, ще получим боя, предизвикваща усещане за зелен цвят. Всъщност усещанията за цвят се предизвикват от биоелектрични сигнали, свързани със средната енергия на фотоните, приети за единица време от рецепторите за цвят, както и от техния брой и спектрално разпределение. Всеки фотон се характеризира с електромагнитната енергия, която пренася. Тя се определя по формулата $E = h\nu = hc/\lambda$.

От формулата следва, че фотон с дължина на вълната $\lambda = 760 \text{ nm}$ пренася два пъти по-малко енергия от фотон с дължина на вълната 380 nm . Обикновените светлинни източници излъчват фотони с различен спектрален състав и енергия. Електромагнитното лъчение само по себе си е насочено движение на енергетични кванти, наречени фотони. Усещането за различните цветове се предизвиква от електромагнитни лъчения с различен интензитет и спектрален състав. Възприемането на цветовете на наблюдаваните обекти се влияе силно и от тяхната осветеност и яркост. Всички тези величини се изучават от науката фотометрия.

Фотометрията (от гръцки *photos* – светлина, и *metreo* – измервам) е раздел от физичната оптика и метрология, в която се разглеждат енергетичните характеристики на оптичното лъчение в процесите на неговото излъчване, разпространение и взаимодействие с веществата. По-важни величини във фотометрията са: интензитет на светлината, светлинен поток, осветеност и яркост.

Интензитетът на светлината (I) може да се представи като брой излъчени за единица време кванти енергия (фотони) от даден светлинен източник в пространствен ъгъл един стерadian. В такъв аспект интензитетът на светлината е величина, характеризираща насоченото излъчване от даден източник. Излъчването на фотоните от даден източник във всички посоки и преносът на електромагнитна енергия се изразява чрез величината **светлинен поток (Φ)**. При малки точковидни източници разпространението се извършва равномерно във всички посоки (4π стерadiana).

Един стерadian (sr) е мярка за пространствен ъгъл, изразяваща се с площ от повърхността на сфера, равна на квадрата на радиуса на сферата. Повечето реални светлинни източници, като различните типове лампи, излъчват във всички посоки, но поради реалните си размери и форми излъчването не е равномерно разпределено. Интензитетът на светлината може да се разглежда като ограничен в определено направление светлинен поток. За да се получи тоталният светлинен поток от даден източник, трябва да се сумира измереният интензитет на светлината във всички посоки на разпространение.

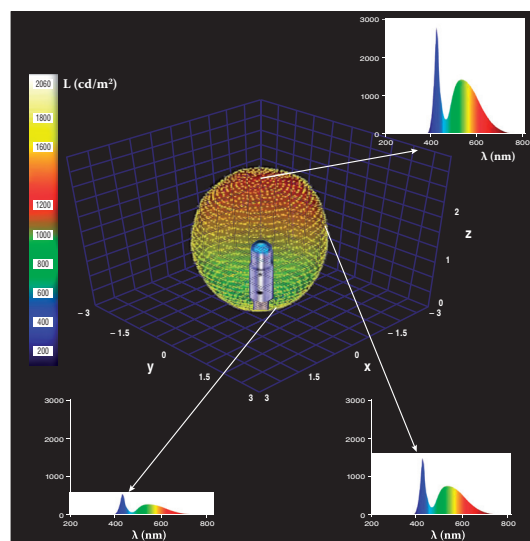
В отделните направления на разпространение интензитетът на светлината (I) обикновено има различни стойности. При измерването и отчитането им се получава светлоразпределението на източника. Когато светлинният поток (Φ) попадне върху дадена повърхност с площ dA , той я осветява и тя променя яркостта си. Осветеността на повърхностите намалява обратно пропорционално на квадрата на разстоянието до източника на светлина. Така например ако на разстояние (d) един метър от източника имаме осветеност $E_1 = 400 \text{ lx}$, то на разстояние 2 m ще има осветеност:

$$E_2 = E_1 / d^2 = 400 / 2^2 = 100 \text{ lx}.$$



Светлоизмерителна лампа за светлинен поток

Светлоразпределение и спектрално разпределение на бял светодиод



Светлинният поток (Φ) от определен източник на светлина може да бъде получен, като се интегрира интензитетът на светлината от всички възможни направления по вертикала и хоризонтала. В този случай на практика се измерва осветеността (E) с фотометричен приемник на

определено разстояние (d) от източника. Въз основа на получените стойности по закона за обратните квадрати се изчислява интензитетът на светлината $I = Ed^2$ в определено от площта dA на приемника направление.

Светлинният поток се дефинира като лъчист поток (Φ_e), количествено оценен по светлинното усещане, което той предизвиква в стандартен фотометричен наблюдател. Той се определя по формулата

Геометрично представяне на връзката между светлинния поток от даден източник, интензитетът на светлината и осветеността

Геометричното изразяване на тоталния светлинен поток (Φ) от даден източник на светлина се определя от уравненията

$$\Phi = \int_{\Omega} I d\Omega$$

$$\Phi = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} I(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi,$$

където I е интензитетът на светлината в дадено направление, определено от пространствения ъгъл $d\Omega$. Или:

$$\Phi = \int_A E dA,$$

където E е осветеността на единица площ dA

$$\Phi = r^2 \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} E(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi.$$

$$\Phi = K_m \int_0^{\infty} \frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (1),$$

където:

K_m – максимална спектрална светлинна ефективност;

$\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda}$ – спектрално разпределение на лъчистия поток;

$V(\lambda)$ – относителна спектрална светлинна чувствителност на човешкото око.

Максималната спектрална светлинна ефективност е определена за монохроматично лъчение с дължина на вълната $\lambda_m = 555 \text{ nm}$ и лъчист поток $\Phi_e = 1 \text{ W}$, което съответства на светлинен поток $\Phi = 683 \text{ lm}$.

$$K_m = 683 \text{ lm W}^{-1}$$

Формула (1) придобива използвания в практиката вид:

$$\Phi = 683 \int_{380}^{780} \Phi_e \cdot V(\lambda) d\lambda$$

Връзката между светлинния поток и интензитета на светлината се определя от формулата:

$$d\Phi = I d\Omega,$$

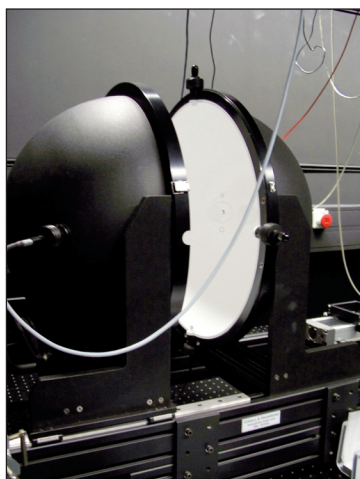
където:

$d\Phi$ – преминал през единица пространствен ъгъл лъчист поток;

I – интензитет на светлината;

$d\Omega$ – пространствен ъгъл.

Фотометрично кълбо за измерване на светлинният поток на светодиодни източници на светлина

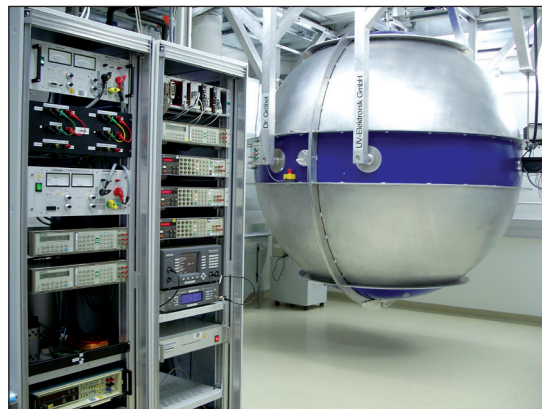


Единицата за светлинен поток е лумен (lm).

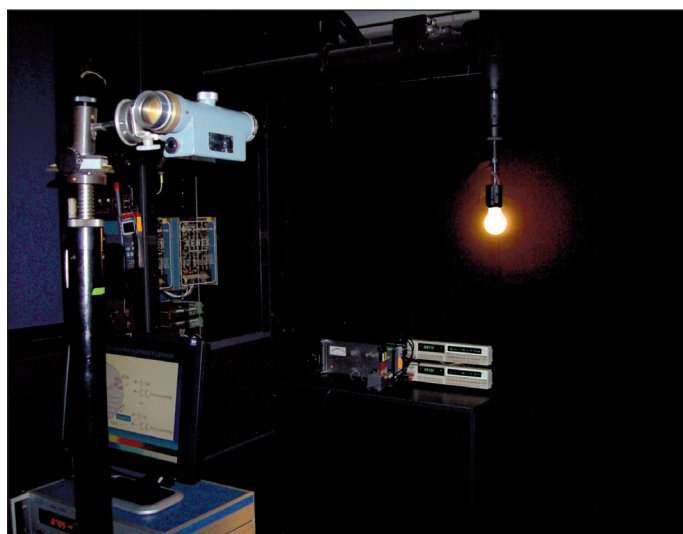
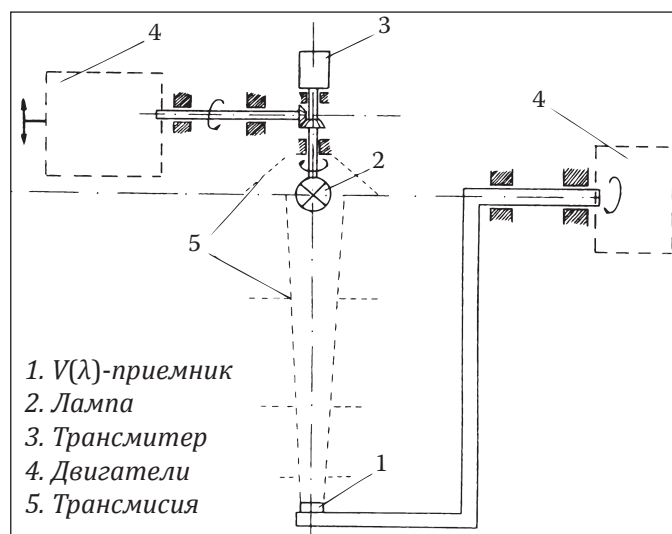
От формулата следва, че

$$1 \text{ lm} = 1 \text{ cd}\cdot\text{sr}.$$

Светлинният поток се измерва по два начина – с гониофотометър и с фотометрично кълбо на Улбрих. При измерването с гониофотометър източникът на светлина се завърта последователно на стъпки около оста на закрепване, а приемникът, закачен на друго въртящо рамо на всяка установена позиция на светлинния източник, се завърта в равнина, перпендикулярна на равнината на въртенето му. При това последователно завъртане през определени интервали с помощта на приемника се отчита интензитетът на светлината. Светлинният поток се получава, като се интегрира (сумира) интензитетът на светлината, който е измерен във всички тези направления. Създадени са гониофотометри и с два сканиращи приемника, които измерват едновременно интензитета на светлината около източника.



Кълбо на Улбрих, институт РТВ (впрочем той е първият научен институт в света, създаден от Сименс и Фраунхофер през 1887 г.), Германия



Интензитет на светлината е отношението на светлинния поток $d\Phi$ от източник, разпространяващ се в елемент от пространствен ъгъл $d\Omega$, съдържащ дадената посока, към този пространствен ъгъл:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}.$$

Така дефинираното понятие интензитет на светлината е строго приложимо само за точковидни източници.

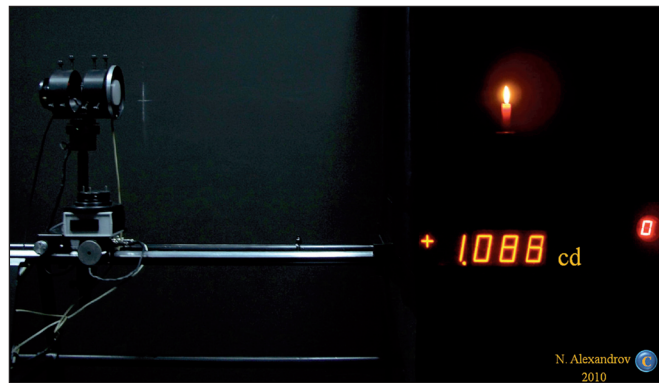
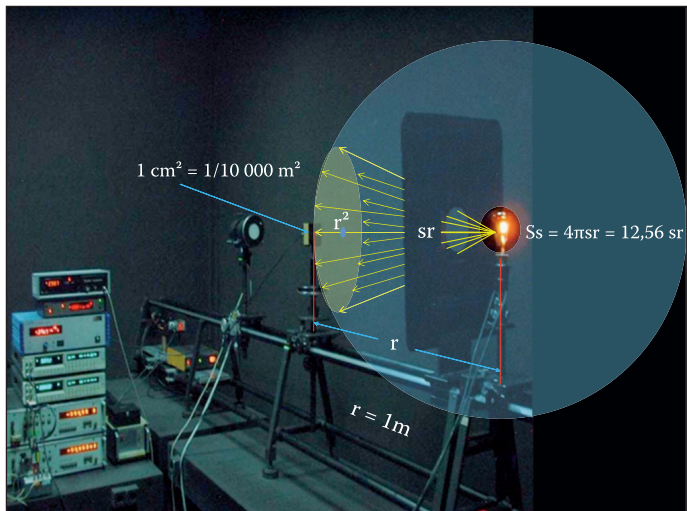
Единицата за интензитет на светлината е **кандела (cd)**. Тя е една от седемте основни единици в Международната система единици SI.

Съгласно последната международно приета дефиниция **Кандела (cd)** е интензитетът на светлината в дадена посока на източника, излъчващ монохроматично лъчение с честота $540 \cdot 10^{12}$ Hz и с интензитет на лъчението в тази посока $1/683$ W/sr.

Еталон за светлинен поток, реализиран с гониофотометър, БИМ

Еталонна светлоизмерителна лампа за интензитет на светлината





Името на единицата кандела произлиза от английската дума за свещ – candle. Свещта има интензитет на светлината приблизително 1 cd

Така приетата дефиниция може да бъде изразена и по-друг начин – чрез броя излъчени фотони за единица време в пространствен ъгъл единстерадиан (**sr**).

Броят на фотоните с дължина на вълната 555,016 nm при 1/683 W/sr е 4 091 942 880 631 100 фотона/sr.

Единицата за интензитет на светлината се възпроизвежда от фотометрични приемници с максимална спектрална чувствителност при дължина на вълната 555 nm (човешкото око има също максимална чувствителност при тази дължина) и източник на светлина с определена цветна температура (източник A).

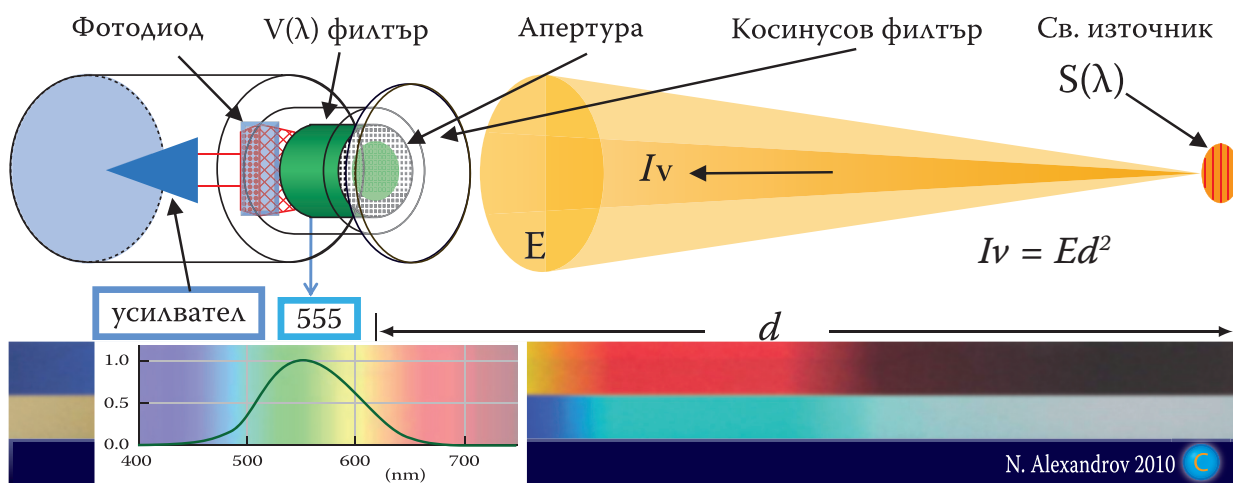
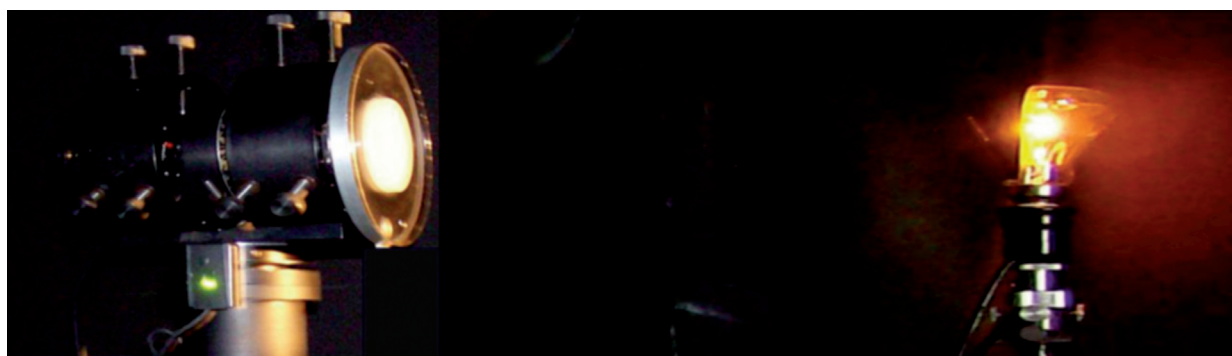


Схема на възпроизвеждане на единицата за интензитет на светлината, БИМ

При еталонните системи за интензитет на светлината приемникът и светлоизмерителната лампа се разполагат на специален фотометричен стенд, като всички операции по измерването са напълно автоматизирани.

Осветеността (E) е повърхностната плътност на падналия върху осветяваната повърхност светлинен поток. Изразява се с отношението на светлинния поток $d\Phi$, падащ на елементарна част от повърхнината, към площта dA на тази елементарна част и числено се определя от израза

$$E = \frac{d\Phi}{dA},$$

където:

$d\Phi$ – светлинен поток, паднал върху елементарна част от повърхнината;

dA – площта на елементарната част от повърхнината, върху която пада светлинният поток.

От формулата следва и определянето на единицата за осветеност лукс (lx):

$$1 \text{ lx} = 1 \text{ lm} \cdot \text{m}^{-2},$$

Тъй като единицата за светлинен поток е

$$1 \text{ lm} = 1 \text{ cd} \cdot \text{sr},$$

то

$$1 \text{ lx} = 1 \text{ cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{m}^{-2},$$

където:

cd – единица за интензитет на светлината;

sr – единица за пространствен ъгъл.

Осветеността (E) може да бъде изразена и чрез интензитета на светлината (I) чрез закона на Ламберт при условие, че най-малкото допустимо разстояние между светлинния източник и приемната повърхност на луксметъра не трябва да е по-малко от 100 пъти размера на светещото тяло на светлинния източник:

$$E = \frac{I \cos \theta}{d^2},$$

където:

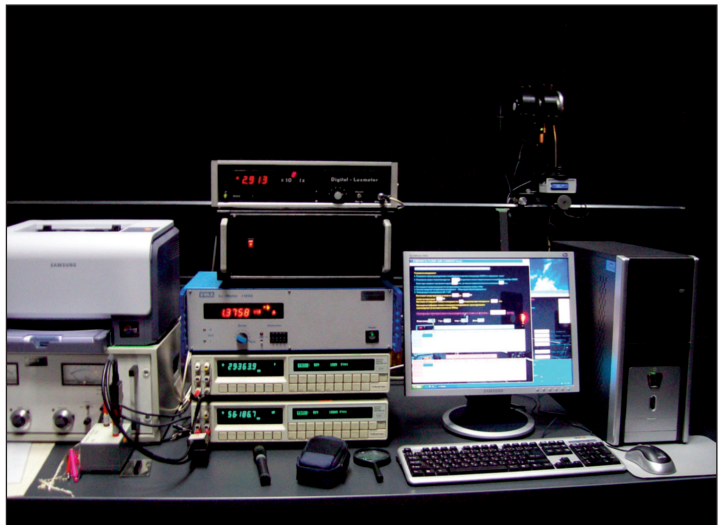
I – интензитет на светлината от дадения светлинен източник;

d – разстояние между светлинния източник и приемната повърхност на луксметъра;

θ – ъгъл между нормалата към повърхността и правата, свързваща центъра на тази повърхност със светлинния източник.

Осветеността се измерва с уреди, наречени луксметри. Фотометричните приемници на тези уреди имат спектрална чувствителност почти напълно еквивалентна с тази на човешкото око.

През последните години са създадени специални 2D анализатори, които могат да дадат разпределението на осветеността в про-



БИМ: еталон на единицата за интензитет на светлината



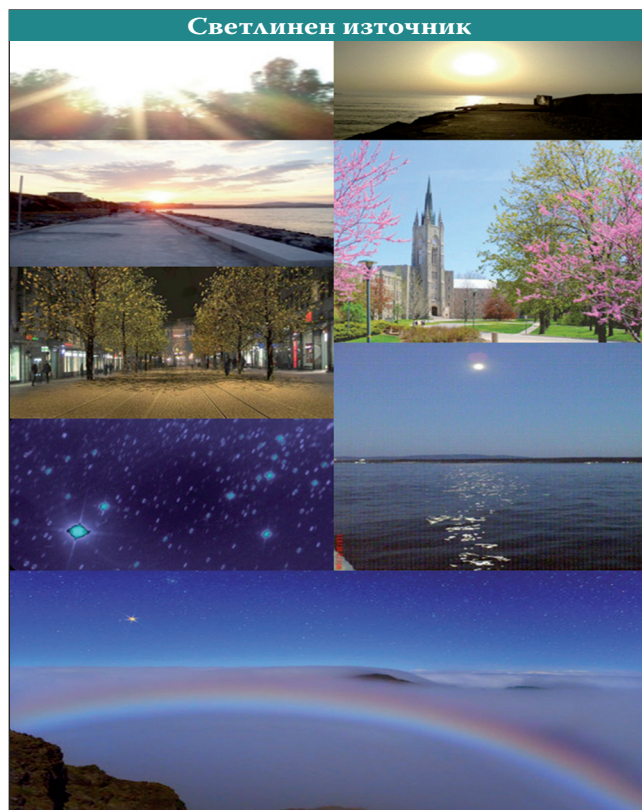
2D анализ на осветеността

странството. В тях нивата на осветеност се маркират с подходящо избрани цветове от цветни скали на съответствие.

От големината на осветеността зависи зрителното възприятие и качеството на възприемането на цветовете. При осветеност под 0,01 lx рецепторите за цвят при човека не функционират. Рецепторите за нощно скотопично зрение при човека не реагират на осветености под 0,000001 lx. Нормалната осветеност, необходима за четенето на книга, е от 300 до 500 lx. В ясен слънчев ден осветеността от Слънцето е в рамките между 100 000 и 150 000 lx. Увеличаването на осветеността води до много по-качествено възприемане на образите и цветовете.

Най-добрите цветни снимки се правят на естествено осветление, когато денят е ясен и слънчев. Повисоката осветеност води до по-наситени тонове на цветовете.

Осветеността е количествена характеристика на светлината и не определя нейната качествена страна, свързана със спектралния ѝ състав. Възможно е да има добре осветен обект с изкуствено осветление, което да не дава вярна представа за истинския цвят на обекта.



Друга важна за възприемането на цветовете фотометрична величина е **яркостта**, която характеризира интензитета на светлината за единица площ. Тя описва количеството светлина, което се отразява или излъчва от единица площ в даден пространствен ъгъл.

Яркостта често се използва за характеризиране на излъчването или отражението от плоска дифузна повърхност.

Яркостта L на елемент A от дадена повърхнина в дадена посока, сключваща ъгъл ν с направлението към източника на светлина, е равна на отношението на интензитета на излъчваната от елемента светлина I към проекцията на лицето му σ^\perp върху равнина, перпендикулярна на тази посока:

$$Lv = \frac{Iv}{\sigma^\perp \cos \nu}.$$

Коефициентът на яркост (β_α) е отношение на лъчистата яркост на несамосвещещо тяло към яркостта на идеалния отражател при еднакви условия на облъчване (в дадена точка от повърхността и в дадена посока).

$$\beta_\alpha = \frac{L_\alpha \pi}{E},$$

откъдето $L_\alpha = \frac{\beta_\alpha E}{\pi}.$

Единицата за яркост в SI е кандела на квадратен метър (cd.m^{-2}). Метричната единица за яркост е Ламберт – 1 Ламберт = $10^4 / \pi \text{ cd.m}^{-2}$.

Яркостта може да бъде дефинирана и чрез светлинния поток с уравнението:

$$L = d^2\Phi / dA d\Omega \cos \theta,$$

където

L – яркостта (cd/m^2);

Φ – светлинният поток (lm);

θ – ъгълът между нормалата към повърхността и даденото направление;

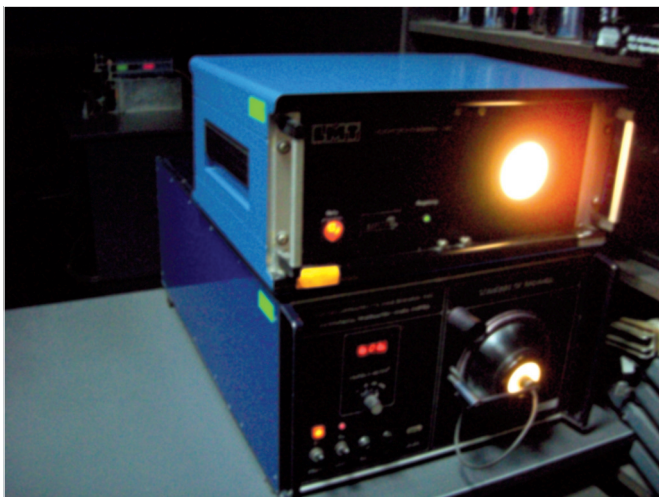
A – площта на дадената повърхност (m^2);

Ω – пространственият ъгъл (sr).

Яркостта се измерва със специални уреди, наречени яркомери. При тях чрез ъгъла на фокусиране може да се задава съответната площ на измерване върху дадена повърхност с определена яркост.

Вляво: яркостни тела.

Вдясно: яркомер



Връзка между светлинният поток (Φ) от даден източник, осветеността (E) и яркостта (L) на осветен от него елемент (A)

Идеален разсейвател
с коефициент на отражение $\rho = 1$

E (lx) Φ (lm) L (cd/m²)

Идеален разсейвател

L Φ_{out} Φ_{in} I_n

E $I_n \cos \theta$

Връзка между величините осветеност E и яркост L

$L = E / \pi$

откъдето следва, че: $E = \pi L$

За Ламбертова повърхност: $L = \rho E / \pi$

За реална повърхност:

$L = \beta E / \pi$, където β е коефициент на яркост

Φ – светлинен поток

$\Phi_{out} = \Phi_{in} = E \cdot A$ (1)

$I_n = L \cdot A$ (2)

$I(\theta) = I_n \cos \theta$

$\Phi_{out} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_n \cos \theta \sin \theta \, d\theta \, d\phi$

$\Phi_{out} = \pi I_n$ (3)

От (1), (2) и (3), следва, че

$L = E / \pi$

Яркомерите могат да се калибрират и настройват с яркостни тела като показаните на снимката, които могат да променят яркостта си в определен обхват.

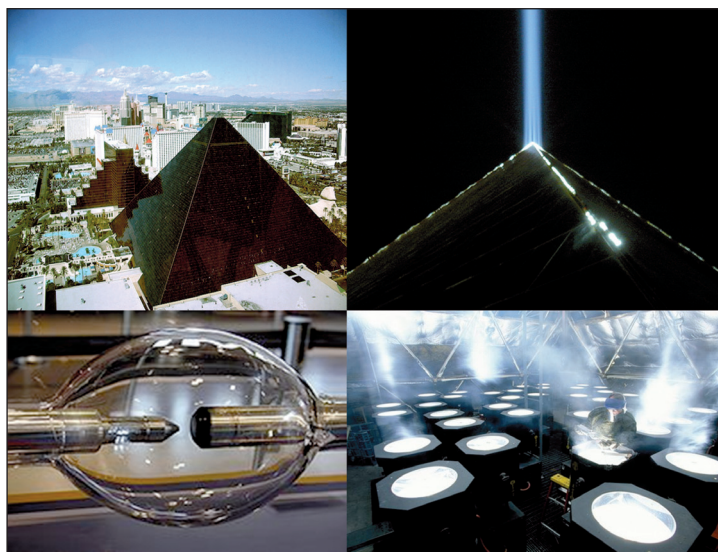


На нашата планета най-ярките природни обекти са мълниците и светкавиците. Тяхната яркост е близо 50 пъти по-голяма от тази на Слънцето, наблюдавано от земната повърхност. От своя страна яркостта на Слънцето в ясен ден е приблизително един милион пъти по-голяма от тази на Луната при пълнолуние.

В лабораторни условия най-голяма яркост е получена в САЩ в диамантен кристал, облъчен с мощни лазерни импулси. При експеримента яркостта на скъпоценния камък е надхвърлила 88 млн. пъти яркостта на Слънцето и за нищожно кратко време той е бил най-яркият обект в Галактиката ни.

Много ярък изкуствен обект, наблюдаван на Земята от околоземна орбита, е върхът на пирамидалната сграда на хотел „Луксор“ в Лас Вегас през нощта. Непосредствено под върха са разположени 38 прожектора, всеки с мощност 7 KW; сумарната мощност надхвърля четвърт милион вата. При включване яркостта е толкова голяма, че позволява да се чете вестник на височина 16 km над пирамидата.

Интензитетът на светлината, респективно осветеността и яркостта на обектите, са величини от съществено значение при възприемането на цветовете от заобикалящия ни свят.

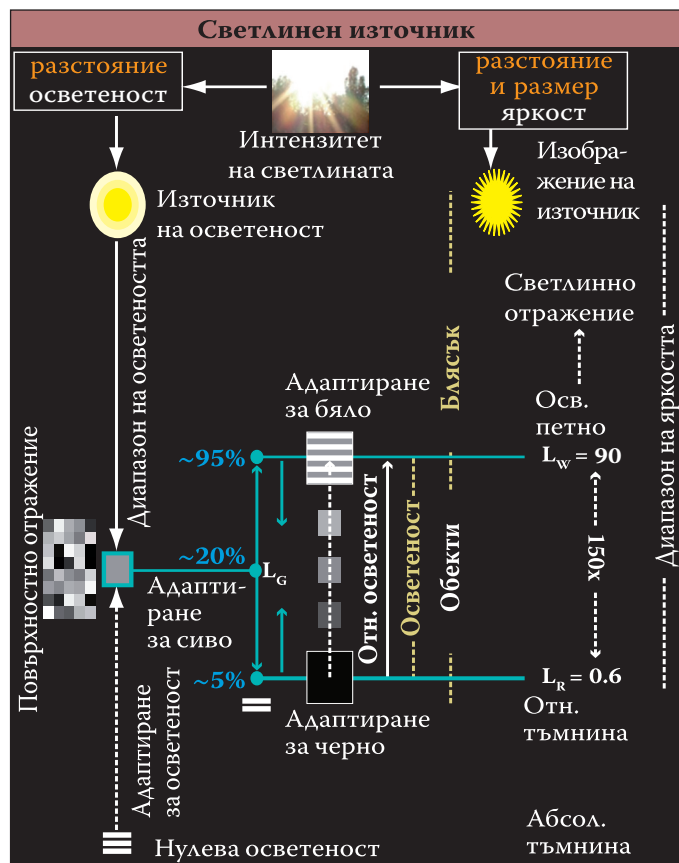


Двумерните диаграми на цветността се дават при фиксирани нива на яркостта, респективно на осветеността. При увеличаване на яркостта диаграмите се променят.

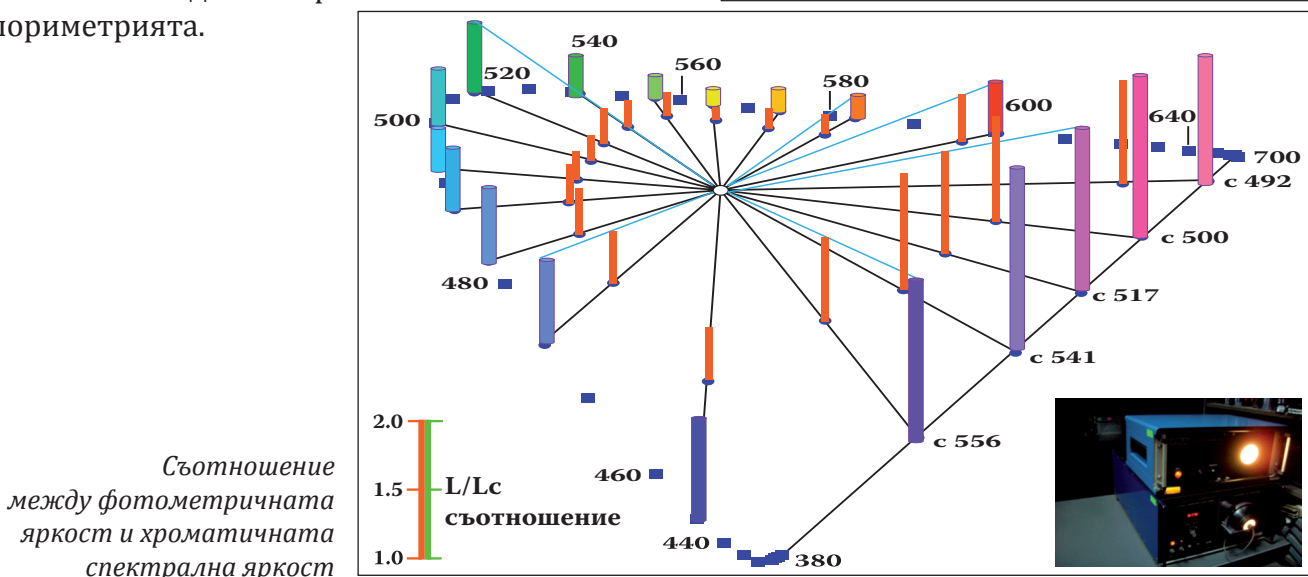
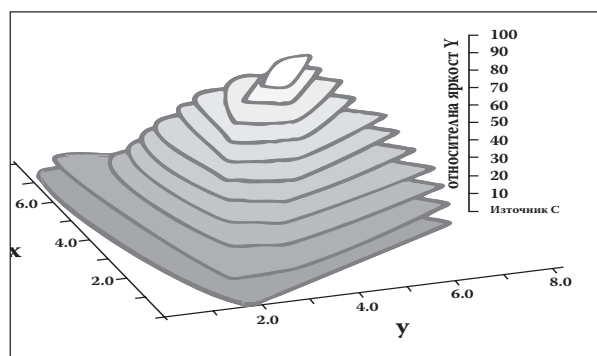
Трябва да се има предвид, че фотометричната (бяла) яркост се различава от хроматичната (спектрална) яркост, която се наблюдава при отражение от цветни обекти или при излъчване на цветни източници. Причината се крие в различната хроматична чистота на цветовете. Тя се определя от съответния коефициент на хроматична чистота на цвета – P_c , който за различните цветове приема различни стойности. Причината за съществуването на такъв коефициент се крие във факта, че различните цветове съдържат в една или друга степен част от белия цвят. На показаната по-долу диаграма може да се види, че жълтият цвят с дължина на вълната 564 nm съдържа в себе си най-много бял цвят.

За жълтия цвят съотношението бяло/жълто е $W/Y = 1 : 15$. За червения цвят това съотношение е $W/R = 1 : 170$, а за виолетовия цвят то е $W/P = 1 : 1000$. В случая разликата в съотношенията между жълтия и виолетовия цвят е повече от 60 пъти. Най-чистият спектрален цвят е червеният, а най-чист от неспектралните цветове е магентата.

Яркостта е от съществено значение при възприемането на цветовете, защото зрителното усещане е пропорционално на нейната големина. Яркостта е основен параметър при оценка на излъчването на телевизионните и компютърните дисплеи. Нещастливо тя е една от трите основни величини в колориметрията.



Адаптиране към различни нива осветеност и диапазон на яркостта



Основни понятия и величини в колориметрията



В колориметрията (науката за измерването на цветовете) цветът се определя от три основни величини: яркост, цветови тон и наситеност.

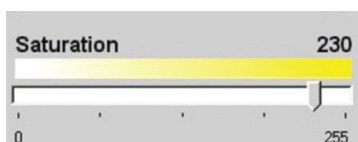
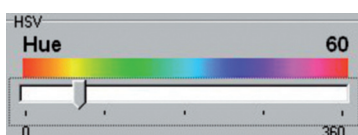
Яркостта на светлинния източник зависи от големината на лъчистия поток от този източник, попадащ в нашите очи. Колкото по-голяма е яркостта, толкова по-силно е светлинното дразнение. Увеличаването на яркостта води до нарастване на наситеността и контраста на цветовете. Яркостта се измерва в cd/m^2 . При различна яркост на един и същ обект координатите на цвета му се променят. В различните колориметрични системи се използват различни термини и символи за относителна яркост (Y). Относителната яркост при тези системи се дава в относителни единици от 0 до 100.

Цветовият тон (Hue) на наблюдавания обект е свързан със спектралния състав на излъчването. По цветовия тон на обекта можем да съдим за оцветяването

му – син, зелен, червен, жълт и др. Отделните участъци на видимия светлинен спектър се различават по оцветяването и предизвикват усещане за различен цвят. Затова е удобно цветовият тон да се характеризира с число, определящо дължината на вълната (λ) на спектралното излъчване. В системата HSV наситените цветови тонове се разполагат по периферията на кръг, разделен на 360° . Всъщност 360 nm е приблизително ширината на обхвата на видимия електромагнитен спектър (от 380 до 740 nm). Средностатистическият човек може да различи нормално от 100 до 180 цветови тона.

Наситеността (Saturation) характеризира степента на разреждането на цветовия тон с бял цвят. Например яркочервена наситена боя може да се разрежи с бяла, при което се получава розов цвят. При такова разреждане цветовият тон не се мени, а се променя само наситеността му. Розовото и червеното не се различават по цветовия тон, а само по наситеността си. Най-голяма наситеност на цвета на излъчване имат спектралните източници – монохроматори и лазери, излъчващи светлина само с една дължина на вълната. Наситеността на такъв източник е максимална. За белия цвят наситеността е минимална: $P = 0 \%$.

Връзката между цветовия тон и наситеността може да бъде нагледно показана чрез кръг, при който наситените цветове са



разположени по периферията, а наситеността за всеки тон се разполага по радиуса, който свързва центъра на окръжността със съответния наситен тон. В центъра на кръга наситеността на хроматичният тон е нула.

Наситеността на всеки цвят може да бъде намалена при смесването му с неговия комплементарен в определено съотношение. При изравнено съотношение на двата цвята се получава наситено сив цвят.

Наситеността се намалява не само при смесване с бял и сив цвят, но и при смесване с черен цвят. В тримерния модел наситеността характеризира степента на разреждане на цветовия тон с наситен сив цвят.

В програмите за обработка на изображения могат да бъдат променяни както цветовият тон, така и наситеността на цветовете и яркостта. При обработката на снимки трябва да се има предвид, че с нарастването на наситеността на цветовете красотата на изображението може да се подобри до определени граници, но картината става все по-нереална. В заобикалящата ни природа обикновено цветовете не са много наситени.

Между яркостта, наситеността на цвета и цветността, дадена с цветните координати, съществува пряка връзка, която в колориметричните системи се дава с различни уравнения. В системата CIE L*a*b* наситеността на цвета (Sab) се изразява с уравнението

$$S_{ab} = C^*_{ab} / L^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} / L^*,$$

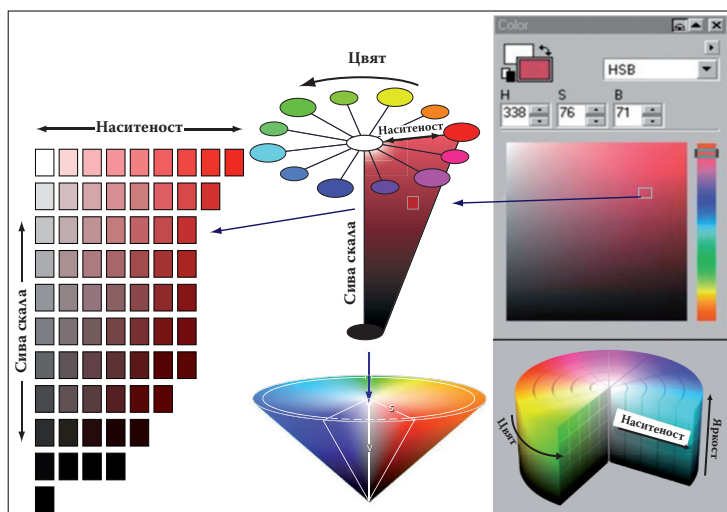
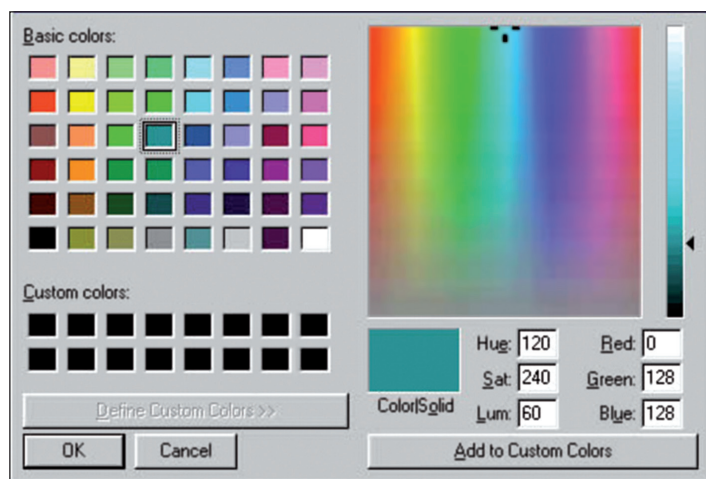
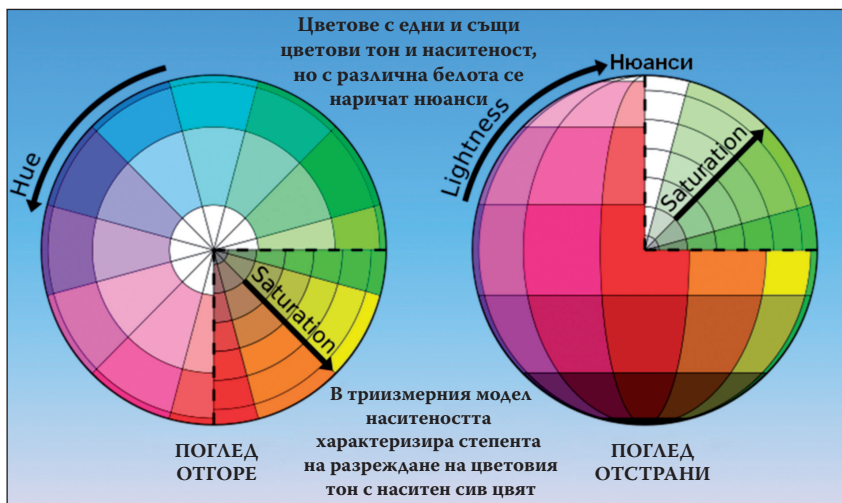
където:

C*_{ab} са цветните координати по осите a и b;

L* е относителната яркост.

Геометричното представяне на връзката между наситеността на цвета, яркостта и цветните координати в системата HSB може да се види на графиките.

В колориметрията се използват и други понятия като цветност, допълнителни цветове и адитивно смесване на цветовете.



Връзка между наситеност на цвета, относителна яркост и координати на цвета в системата HSB (Hue Saturation Brightness)



Дисперсия на светлината от призма

Цветността е качествена характеристика на цвета. Дава се с цветовия тон и наситеността (чистотата) на цвета.

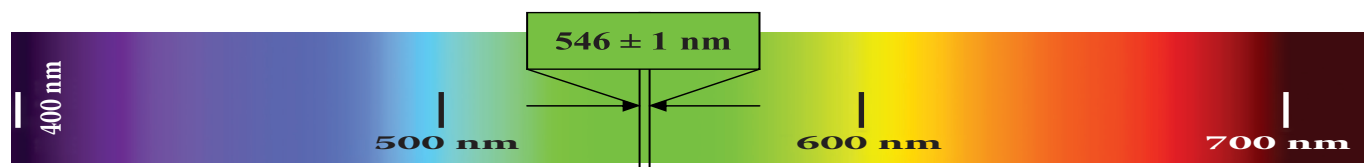
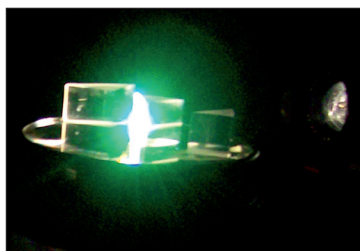
Комплементарни цветове са всеки два произволно избрани цвята, които при адитивно смесване в определени съотношения дават ахроматичен цвят.

Адитивното смесване на цветовете е смесване на цветовете, което е резултат на попадане (едновременно или в бърза последователност) на цветни потоци върху един и същ участък от ретината, при което окото не може да различи получените отделни дразнения.

За всеки стимул на цвета чрез адитивно смесване може да се намери едно обратимо, еднозначно числено измеримо съотношение на три подходящо подбрани компонента на смесване, наречени **стандартни стимули на цвета**. Те трябва да отговарят на условието да не може чрез адитивно смесване на два от тях да се получи третият.

Спектрални цветове са всички цветове, които се възпроизвеждат с една определена дължина на вълната от видимия спектър на светлината или от една много тясна спектрална лента от този спектър. Те имат най-чистите цветни тонове. Могат да бъдат реализирани при използването на стабилизирани лазерни системи, които излъчват лъчи с една дължина на вълната. Призмените и дифракционните монохроматори също излъчват спектрални цветове с чисти тонове, защото разлагат спектъра на светлината на светлинни снопове с отделни дължини на вълните. Чисти цветни тонове имат и цветните линии в емисионните спектри на атомите и молекулите. Използваните в практиката телевизори, монитори и принтери не могат добре да възпроизвеждат спектралните цветове. Единствено дифракционните дисплеи и лазерните проектори са в състояние да направят това. Възможностите на хората да възприемат спектралните цветове с чисти тонове са ограничени от гледна точка на малкия брой зрителни усещания, които покриват спектъра на светлината. На практика човек може да възприеме и различи максимум 180 цветни тона в този спектър, макар че той е непрекъснат и безкраен по отношение на линиите на възприемане. Спектралната ширина на видимия спектър е от порядъка на 360 nm, които се покриват от 180 цветни тона. Това означава, че средната спектрална ширина на един цветен тон е 2 nm.

Зелена монохроматична светлина от призма

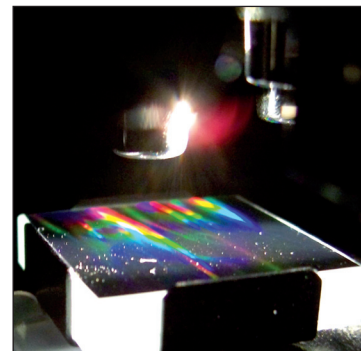


Неспектрални цветове са всички цветове, които не могат да бъдат възпроизведени от източник на лъчение с една дължина на вълната или с набор от много близки дължини на вълните. Такива са ахроматичните неутрални цветове – черен, сив и бял. Сивият и белият цвят могат да бъдат разглеждани като комплексни спектрални цветове само в случаите, когато се възпроизвеждат при смесване на два или повече спектрални цвята. Цветът магента също е неспектрален цвят за човека, защото във видимия спектър няма

дължина на вълната, която да предизвиква усещане за този цвят. При разлагане на светлината с призма този цвят не присъства в получения спектър. Зрително усещане за него може да се получи само при смесване на два други цвята като червен и син. Някои птици и насекоми, които виждат спектъра на светлината по различен начин от човека, вероятно възприемат цвета магента в близката ултравиолетова област на този спектър, която е невидима за нас. С други думи, цветът магента е спектрален за тях, макар че е неспектрален за хората.

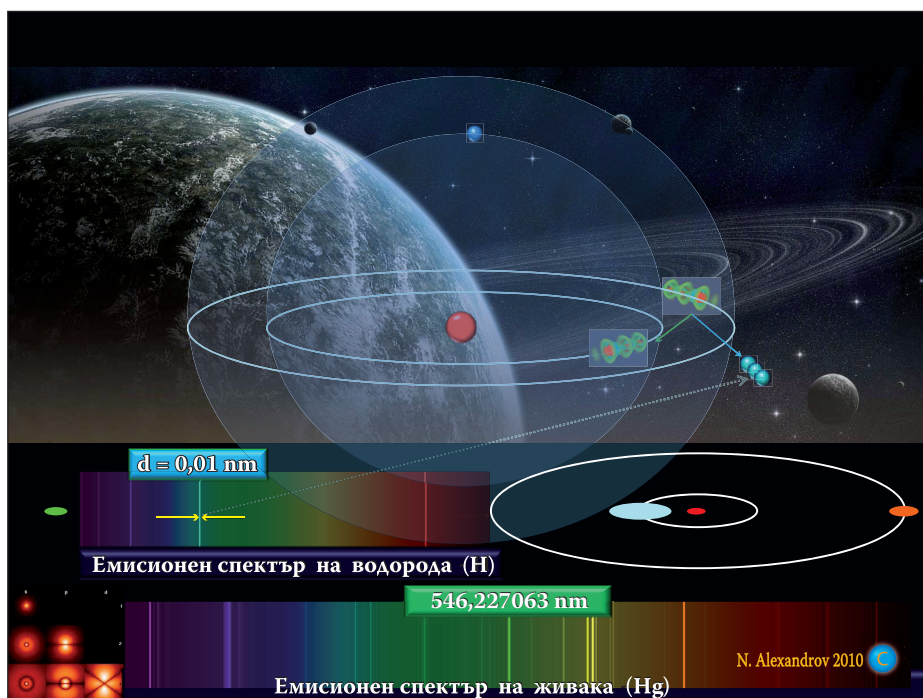
Абсолютен спектрален цвят е този, който може да бъде възпроизведен от източник на лъчение с една дължина на вълната, фиксирана с абсолютна точност във времето и пространството. Спектралните източници не могат да излъчат светлинни вълни с такава точност. Причината се крие във факторите на заобикалящата среда, като температура, влажност и налягане, които постоянно флукутират във времето. Тези флукутации пречат дори на стабилизирани лазери да поддържат една и съща честота на излъчване във времето. Обикновено стабилността при тях се движи в рамките на $\pm 0,001$ nm. Ако се намали интервалът от време, в който лъчението да бъде възприето и анализирано, стабилността за този интервал може да се дефинира до $\pm 0,0001$ nm при максимална разделителна способност: $\pm 0,000001$ nm. Това е максималната резолюция, с която съвременните интерферометри, Фурие-спектрометри и Раманови спектроскопи могат да определят дължината на вълната на спектралните емисионни линии на атомите и молекулите. В същото време средната за видимия спектър на светлината разделителна способност на човешкото око е едва 2 nm. Следователно човек не би могъл без помощта на уредите да оцени колко близък до идеалния е един цвят и колко чист е неговият цветен тон.

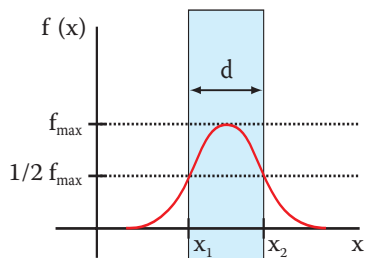
Понятието за абсолютен спектрален цвят е свързано със **спектралната ширина (d)** на атомните емисионни линии. Изследванията показват, че атомните емисионни линии на всеки един химичен елемент имат различна спектрална ширина и интензивност. Обикновено колкото по-интензивна е една емисионна линия, толкова е по-широка. Под ширина на една емисионна линия се разбира ширината на линията, измерена на половината от разстоянието до максималната стойност на нейната амплитуда. Спектралната ширина на емисионните линии обикновено се дви-



Дисперсия на светлината от дифракционна решетка

Спектрална ширина на емисионните линии на атоми на химични елементи





Ширината на спектралната линия се измерва на половината от максимума на амплитудата

жи в диапазона от 0,01 до 0,1 nm, но може да е и много по-малка. Тази ширина зависи от вариацията на енергията на електроните на съответните енергетични нива около ядрото. Колкото по-слаба е флукуацията на тази енергия на отделните енергетични нива, толкова по-малка е ширината на спектралната линия при преход между тях. Все пак намаляването на енергетичните флукуации на електрона има определена граница. Дори при нулеви въздействия върху електроните на орбита те продължават да извършват странични колебания по време на движението си около ядрото. Така на практика всяка спектрална линия има гранична минимална ширина, наречена **природна ширина на линията**. Съгласно принципа на Хайзенберг неопределеността на енергията ΔE е обратно пропорционална на времето за измерване Δt :

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar / 2, \text{ където } \hbar \text{ е редуцираната константа на Планк.}$$

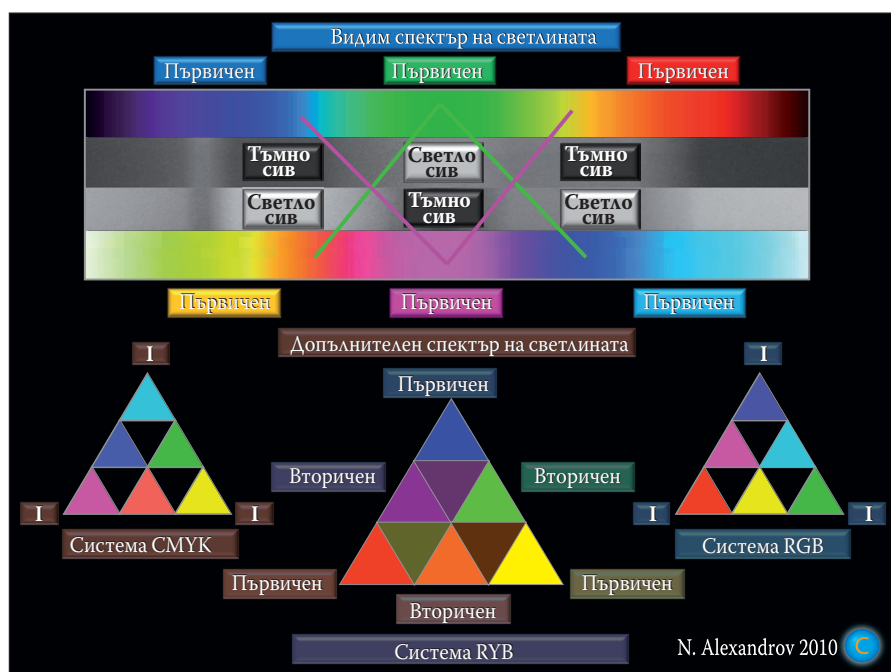
Ширината на спектралните линии се определя от големината на различните флукуации на електроните на отделните енергетични нива по време на прехода, а дължината на вълната на излъчените фотони – от разликата в енергията на нивата, между които той се извършва.

Монохроматични цветове са всички цветове, които представляват нюанси от определен спектрален цветови тон. Те се получават при смесване на определен спектрален тон с черен, сив или бял цвят.

Първични цветове са набор от цветове, които чрез комбиниране могат да възпроизведат всички останали съществуващи цветове. В практиката обикновено за тази цел се използват три избрани цвята като първични, тъй като основната част от хората са с трихромно зрение.

Най-често в цветните телевизори и дисплеи като първични се използват червен, зелен и син цвят при т.нар. система RGB (Red, Green, Blue). Този избор не е случаен. В спектъра на слънчевата

Основни първични и вторични цветове



светлина, получен при разлагане чрез призма, трите посочени цвята заемат основната част. Поради това съвсем логично е тяхното комбиниране да води до получаване на бял цвят. При възпроизвеждането на черен цвят обаче възникват определени затруднения. Недоброто възпроизвеждане на черния цвят води до намаляване на контраста на изображението. Затова екраните на модерните телевизори и компютърни дисплеи се правят максимално черни. Комбинирането и смесването на цветовете два по два води до

появата на нови три цвята – циан, магента и жълт, – които в избраната система RGB се приемат за вторични.

Вторичен цвят е всеки цвят, получен при смесване на два първични цвята от дадено цветно пространство.

В системата CMY (Cyan, Magenta, Yellow) първични цветове са циан, магента и жълт. Комбинирането на цветовете два по два води до появата на нови три цвята – червен, зелен и син, – които в избраната система се приемат за вторични. Така се получава взаимно обратимо съответствие между цветовете от двете избрани системи. Системата CMY в подобрен вариант с допълване на черен цвят CMYK основно се използва в печатарската индустрия и при различните видове принтери. Цветовете от тази система не възпроизвеждат добре белия цвят и по тази причина колкото по-бяла е хартията, на която се печата, толкова по-голям е контрастът.

В изкуството широко приложение намира системата от първични цветове RYB (Red, Yellow, Blue). При нея като вторични се получават цветовете лилав, оранжев и зелен.

В системата RGB първичните цветове не възпроизвеждат добре черния цвят, докато в системата CMYK – белия цвят. В резултат на тези особености цветовете на екрана на мониторите не са същите като тези, които се печатат. За доброто възпроизвеждане на черния и белия цвят би могло да се използва система, която включва шестте първични цвята от двете разгледани системи. Така се получава системата RMBCGY, която включва шест първични и шест вторични цвята.

Чрез смесването на шестте първични цвята на системата **RMBCGY** с шестте вторични може да се получат нови дванайсет третични цвята. Те заедно с първичните и вторичните ще образуват третото ниво от 24 цвята. При продължаване на смесването на първични, вторични и третични цветове се получават нови 24 цвята или общо 48 цвята на четвърто ниво. Така следващите две нива на цветовете – пето и шесто, ще включват съответно 2 x 48 и 2 x 96 цвята.

Характерно за всяко ниво е, че броят на цветовете в него е равен на броя на всички цветове от предходните нива. Така на практика броят на цветовете на шесто ниво е равен на сумата от цветовете от първо до пето. По-нататъшно разгъване на цветовата гама не е необходимо, когато става въпрос за възприемането ѝ от човека. Причината е, че човек не може да възприеме повече от 180 цветни





CMYK



RGB

тона. На шесто ниво системата RMBCGY притежава 192 цветни тона и почти напълно се доближава до спектъра на сивата светлина. От друга страна при спектрален анализ на определени лъчения броят на спектралните линии, респективно на цветовете, които те възпроизвеждат и които могат да бъдат регистрирани от спектралните прибори, нараства хилядократно. Специализираните уреди за спектрален анализ определено имат много по-големи възможности от човешкото око в това отношение.

Системата RMBCGY е в състояние да възпроизведе добре както черния, така и белия цвят. Тя най-пълно отговаря на матрицата на заложените усещания за цвят при хората. В същото време системата RGB най-добре съответства на зрителните рецепторни възможности при човека.

При системата RMBCGY анализът на преобразуването на първичните цветове от спектъра в сивата скала показва, че от някои от тях се получават тъмни тонове и дори черен цвят, докато други изглеждат светли и дори бели. Така например на цвета магента съответства черен цвят, докато зеленият цвят се преобразува в бял. На червения и синия цвят съответстват светлосиви тонове, докато на жълтия и циан – тъмносиви тонове.

В системата RGB (използвана широко в цветните дисплеи и телевизори) представянето на бял цвят за даден пиксел от екрана се задава с координати $R = G = B = 255$. Съответно: черният цвят се възпроизвежда при координати $R = G = B = 0$, наситеният сив цвят – $R = G = B = 127$, а всички ахроматични нюанси на сивото се задават при равни RGB координати. Например стойности $R = G = B = 64$ съответстват на тъмносив цвят, а координати $R = G = B = 192$ – на светлосив цвят.

Ако равенството на трите координатите се наруши, ще има хроматично замърсяване на сивия цвят, което автоматично ще го преобразува от ахроматичен в хроматичен.

Следователно системата RGB може да възпроизведе 254 нюанса на сивия цвят, задаващи сивия ахроматичен спектър. Повечето хора могат да различат от 50 до 100 нюанса в сивия ахроматичен спектър (тук не се включват хроматично замърсените сиви цветове).

При наслагване върху сивата скала на хроматични цветове с 90 % прозрачност тя се променя най-слабо при виолетовия цвят

