

Дрогобицький державний педагогічний університет
імені Івана Франка

Олег Кузик, Олеся Даньків

ФІЗИКА КОЛЬОРУ ТА СВІТЛА



Дрогобич
2023

УДК 535(075.8)
К 89

*Рекомендовано до друку вченою радою Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка
(протокол № 7 від 18 травня 2023 р.)*

Рецензенти:

Гольський Віталій Богданович, доцент кафедри фізики та інформаційних систем Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка, кандидат фізико-математичних наук;

Британ Віктор Богданович, доцент кафедри фізики та інформаційних систем Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка, кандидат фізико-математичних наук.

Кузик О., Даньків О.

К 89 Фізика кольору та світла : навч. посіб. Дрогобич : ДДПУ ім. Івана Франка, 2023. 146 с.

Навчально-методичний посібник **“Фізика кольору та світла”** написаний відповідно до програми навчальної дисципліни **“Фізика кольору та світла”** для підготовки фахівців другого рівня вищої освіти, затвердженої науково-методичною радою Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка.

У посібнику подано матеріал з основних розділів **“Фізика кольору та світла”**, до кожного з яких підбрані питання для самоконтролю.

Посібник сприятиме формуванню у студентів знань про фізичну природу світла, кольору та їх взаємозв'язок, особливості сприйняття кольору людським оком, підвищенню художньо-естетичного рівня особистості та виховання емоційно-естетичного ставлення до оточуючого світу.

© О. Кузик, О. Даньків, 2023
© Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка, 2023

З М І С Т

ВСТУП	6
ТЕМА 1. ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК МІЖ СВІТЛОМ ТА КОЛЬОРОМ	8
1.1. Науки, які вивчають колір та їх взаємозв'язок. Природа кольору з точки зору фізики, хімії, фізіології та психології. Етапи формування зорового відчуття. Колірні явища	8
1.2. Фізична природа світла. Фотони та електромагнітні хвилі.....	12
1.3. Шкала електромагнітних хвиль. Інфрачервоне та ультрафіолетове випромінювання. Рентгенівські промені. γ -випромінювання	19
1.4. Видима частина спектра. Співвідношення між довжиною хвилі та кольором світла.....	22
<i>Контрольні питання</i>	23
ТЕМА 2. Дисперсія світла і колір тіл	24
2.1. Розкладання білого світла в спектр. Дослід Ньютона. Дисперсія показника заломлення для різних матеріалів	24
2.2. Поняття про додаткові кольори	27
2.3. Світло і колір тіл. Поглинання, відбивання і пропускання світла	28
2.4. Кольорові тіла, освічені білим світлом	32
2.5. Кольорові тіла, освічені кольоровим світлом	33
2.6. Розсіювання світла. Закон Релея. Колір неба і зірок	35
2.7. Розкладання білого світла в спектр у явищах інтерференції та дифракції.....	36
<i>Контрольні питання</i>	40
ТЕМА 3. Фізичні основи кольоросприйняття	41
3.1. Основні фотометричні величини.....	41
3.2. Співвідношення між енергетичними і світловими характеристиками випромінювання	51

3.3. Спектральна чутливість ока. Функція видимості людського ока	55
3.4. Будова ока та зорові відчуття. Чутливість людського ока до сприйняття світла різного кольору в різних умовах	60
3.5. Спотворення сприйняття кольору. Хроматична аберация. Дальтонізм	66
3.6. Маскування та демаскування	69
Контрольні питання	72
ТЕМА 4. Змішування кольорів	73
4.1. Закони змішування кольорів.....	73
4.2. Основні характеристики кольору. Яскравість. Насиченість. Колірний тон.....	76
4.3. Спектральний круг	78
4.4. Система колориметрії на основі змішування трьох кольорів	81
4.5. Просторове (субтрактивне) змішування кольорів.....	88
4.6. Кольорова модель змішування Мансела	89
Контрольні питання	91
ТЕМА 5. Яскравість і колір розжарених предметів	93
5.1. Теплове випромінювання	93
5.2. Закони випромінювання чорного тіла	96
5.3. Яскравість світіння за різної температури	98
5.4. Температура і колір.....	101
5.5. Пірометри.....	104
5.6. Спектральний склад світла різних джерел.....	107
Контрольні питання	113
ТЕМА 6. Оптичні ілюзії	114
6.1. Обман зору. Ілюзія сприйняття кольору. Ілюзія сприйняття глибини. Рухомі ілюзії.....	114
6.2. Міражі.....	121
6.3. Контраст	122

6.4. Кольорові асоціації. Емоційний та фізіологічний вплив кольору на людину. Специфіка сприйняття кольору дитиною	124
<i>Контрольні питання</i>	126
ТЕМА 7. Колірні моделі	127
7.1. Визначення характеристик кольору засобами комп'ютерних технологій. Режими зображення	127
7.2. Колірні моделі HSV, HSB та HSL.....	130
7.3. Колірна модель CMYK	131
<i>Контрольні питання</i>	132
ВПРАВИ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ	133
ЛІТЕРАТУРА	144

ВСТУП

Фізика кольору та світла є однією з найцікавіших та найважливіших тем у фізиці. Ця галузь науки досліджує природу світла та колірний спектр, який уособлюється в різних об'єктах: від зірок до рослин та живих організмів.

Фізика кольору – це наука, що вивчає фізичні властивості кольорів, їхню взаємодію зі світлом та іншими матеріалами. Ця галузь науки не тільки допомагає розуміти явища, пов'язані з кольором, але й має безліч застосувань у практичній діяльності, включаючи мистецтво та дизайн.

Вивчення фізики кольору та світла є підґрунтям для реалізації STEAM-освіти. STEAM-освіта – це підхід до навчання, що базується на інтеграції науки, технології, інженерії, мистецтва та математики. Цей підхід допомагає учням розвивати творче і критичне мислення, а також навички, які потрібні для подальшої успішної кар'єри в різних сферах. Фізика кольору та світла, по-перше, базується на наукових дослідженнях і математиці, а отже, її вивчення допоможе учням і студентам розвинути свої наукові й математичні здібності. По-друге, фізика кольору та світла тісно пов'язана з фізіологією, психологією, мистецтвом та дизайном.

Сприйняття кольору є результатом взаємодії між фізичними, фізіологічними та психологічними процесами. Зокрема, колір може бути результатом деяких фізичних властивостей та характеристик, таких як відбивання, поглинання світла, довжина хвилі світла, але сприйняття кольору залежить від того, як наш зір та мозок обробляють ці сигнали. Психологія вивчає, як ми сприймаємо та розуміємо колір з психологічної точки зору, зокрема, які емоції і асоціації викликають різні кольори, а також, як ми можемо використовувати кольори для впливу на психіку людини.

Тому студенти, вивчаючи цей курс, можуть дізнатися не тільки про фізичну природу кольору і світла, але й особливості фізіологічного та психологічного сприйняття, про те, як кольори впливають на емоційний стан людей та як їх можна використовувати для створення різних настроїв у мистецтві й дизайні. Викладений у посібнику матеріал також буде корисним у майбутній професійній діяльності і вчителя фізики, і психології, і вчителя мови та літератури.

Особливо важливим є вивчення цієї дисципліни для майбутніх вчителів інтегрованого курсу “Природознавство”. Вивчення природи світла та кольорів істотно допоможе у викладі різних тем цього курсу. Вивчення фізики кольору та світла допоможе учням розуміти явища, пов’язані зі світлом та кольором, які вони спостерігають щодня. Наприклад, вони зможуть досліджувати, як змінюватимуться кольори, коли змішати дві або більше фарб, як сонце впливає на колір речей або як змінюватиметься колір вогню, коли змінювати його температуру.

Вивчення “Фізики кольору та світла” також сприятиме різнобічному розвитку студентів. Передовсім підвищить зацікавленість природничими та гуманітарними дисциплінами, а також допомагатиме у комплексному й цілісному розумінню світу через поєднання науки та мистецтва. Наприклад, майбутні фахівці зможуть навчитися застосовувати наукові принципи для створення мистецьких творів, засвоїти технології, пов’язані з обробкою зображень та фотографією.

Отже, “Фізика кольору та світла” є важливою складовою STEAM-освіти, оскільки поєднує в собі науку (фізику, хімію, біологію, фізіологію, психологію), технології та мистецтво. Вивчення “Фізики кольору та світла” допоможе студентам розвивати інноваційне мислення та творчість, а також набути практичних навичок розробки і керування STEAM-проектами під час своєї педагогічної діяльності.

ТЕМА 1. ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК МІЖ СВІТЛОМ ТА КОЛЬОРОМ

- 1.1. Науки, які вивчають колір та їх взаємозв'язок. Природа кольору з точки зору фізики, хімії, фізіології та психології. Етапи формування зорового відчуття. Колірні явища.**
- 1.2. Фізична природа світла. Фотони та електромагнітні хвилі.**
- 1.3. Шкала електромагнітних хвиль. Інфрачервоне та ультрафіолетове випромінювання. Рентгенівські промені. γ -випромінювання.**
- 1.4. Видима частина спектра. Співвідношення між довжиною хвилі та кольором світла.**

1.1. Науки, які вивчають колір та їх взаємозв'язок. Природа кольору з точки зору фізики, хімії, фізіології та психології. Етапи формування зорового відчуття. Колірні явища

У житті людини величезна роль належить світлу – променевій енергії, яка робить видимим навколишній світ. Зорові відчуття виявились біологічно найбільш важливими, що привело до вдосконалення зорового аналізатора в ході еволюції людини. Основну частину інформації про світ, більше, ніж 90 %, несе зоровий аналізатор, до складу якого входить око. Дія подразника, наприклад, світла, викликає відчуття. У зоровому аналізаторі виникають відчуття світла, кольору, глибини простору.

Відчуттями називають побудовані образи деяких властивостей навколишніх предметів при безпосередній взаємодії з ними. Якщо *світловідчуття* представляє суб'єктивний образ, що виникає в результаті впливу світла загалом на зоровий аналізатор, то *кольоровідчуття* – це суб'єктивний образ спектра випромінювання, тобто світла, розкладеного на частотні складові. Прикладом спектра є різноколірна райдуга.

Відчуття відображає тільки певну властивість предмета. Суб'єктивний цілісний образ предметів як результат безпосередньої дії на аналізатори формується у процесі сприйняття. Порівняно з відчуттям, що відображає тільки деякі сторони предметів, образ сприйняття представляє увесь предмет як комплекс усіх його властивостей.

Сприйняття синтезує наші відчуття і формує результуючий образ такого процесу. Прийом і обробка людиною інформації, що надходить через органи чуття, завершується появою образів предметів чи явищ. *Сприйняття* є процесом побудови суб'єктивних цілісних образів предметів як комплексу їхніх властивостей (іноді вживають терміни “перцепція”, “перцептивний процес”). Кінцевим етапом сприйняття є формування уявлень, які виділяють змістову сторону, суть об'єкта, незалежно від варіантів його форми.

Таким чином, **світло**, зазнаючи взаємодії з матеріальними тілами, в тому числі й з органами зору, викликає сприйняття **кольорів**.

Від найдавніших часів природа **кольорів** була предметом дослідження багатьох вчених, але до 1760 року всі тодішні теорії були хибними. Ще Аристотель висував гіпотезу, що **колір** створюється унаслідок змішування **світла** і темряви. Чимало схожих теорій розвивалися у наступні періоди Р. Декартом, Й. Кеплером, Р. Гуком. Причину **кольору** багато вчених того часу пов'язували із властивостями самого світла, а не з роботою ока.

Основу сучасних наукових уявлень про **колір** заклав І. Ньютон. І хоча відтоді наука про колір отримала великий розвиток, багато положень, які встановив І. Ньютон, використовуються на практиці і в наші дні.

Сучасна наука дає наступне визначення кольору: *колір – це відчуття, яке виникає в органі зору при дії на нього світла.*

Вивчення явищ, пов'язаних із зором, із **кольором**, виходить за межі фізики. Воно потребує комплексного використання знань різних наук. Труднощі у пізнанні природи **кольору** полягають у тому, що

необхідно інтегрувати всі різноманітні спостереження і закономірності різних наук в єдине цілісне уявлення про **колір**.

Природа кольору з точки зору фізики, хімії, фізіології та психології

Теорія кольору – широка та складна область знань. До неї входять елементи різних наук: оптики, спектроскопії, колориметрії, анатомії і фізіології людини, теорії та історії мистецтва, психології, естетики та інших прикладних наук.

Розглянемо коротко можливості різних наук для вивчення кольору.

Фізика вивчає двоїсту природу світла як електромагнітної хвилі та світлових квантів (фотонів), можливості розкладу білого світла в спектр при його призматичному розсіюванні, проблему кольорів предметів. Окрім того, фізика вивчає змішування кольорів. Вимірюванням і класифікацією кольорів також займаються вчені-фізики.

Хімія займається вивченням молекулярної будови матеріалу різного кольору чи пігменту, досліджує їхню міцність та вицвітання, вивчає склад розчинників, зв'язуючих речовин, виготовляє синтетичні барвники.

Фізіологія вивчає як світло та колір впливають на зоровий апарат – око та мозок, його анатомію, взаємозв'язки, функціональне призначення. Важливий предмет досліджень фізіології – як зір людини налаштовується на світло і темряву, хроматичне бачення. Також фізіологія займається дослідженням феномену залишкових зображень.

Психологія ж досліджує, як впливає кольорове випромінювання на психічний і моральний стан людини. Символ кольору, особливості кольоросприйняття різними людьми є важливою темою досліджень у психології, як і вивчення експресивності, зумовленої колірним впливом.

Етапи формування зорового відчуття

Обговорюючи механізм формування сприйняття кольору, можна виокремити такі головні процеси: випромінювання світла (фізичний); вплив світла на око і перетворення його на нервові імпульси, що йдуть у мозок людини (фізіологічний); сприйняття кольору (психологічний). Кожен процес відповідає етапу формування зорового сприйняття (рис. 1.1).

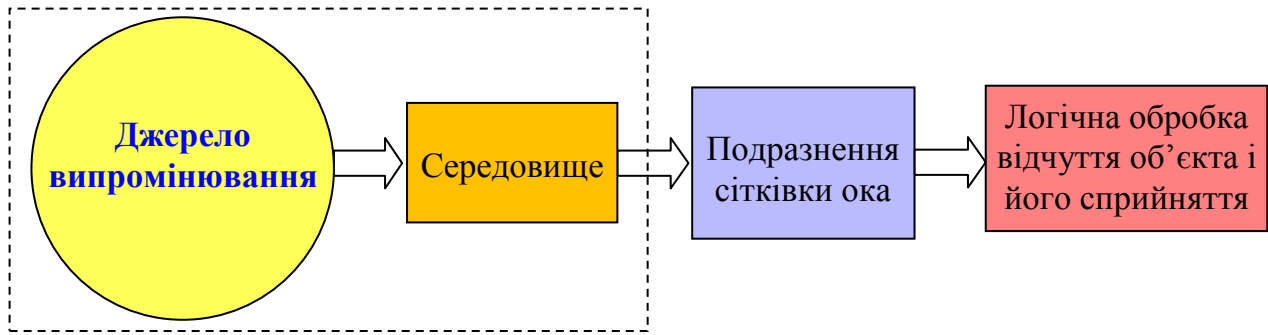


Рис. 1.1. Етапи формування зорового відчуття

Фізичний етап полягає у перетворенні енергії видимого випромінювання різними середовищами на енергію зміненого потоку випромінювання. Видиме випромінювання називається *світлом*.

Фізіологічний етап протікає у сітківці ока, де енергія випромінювання перетворюється на інформацію, що передається до головного мозку.

Психологічний етап належить до вищої нервової діяльності людини. На ньому відчуття кольору переходить у його сприйняття. Воно виникає в результаті логічної обробки інформації всіх органів чуття і пам'яті.

Етапи формування зорового відчуття кольору вивчають різні науки: фізичний – фізика; психологічний – психологія зорового сприйняття; хімічний – хімія, фізіологія, біологія. Фізика вивчає випромінювання, поширення, взаємодію світла з різними середовищами; фізіологія кольору – процеси, що відбуваються в органах зору під дією світла; психологія – зорове сприйняття. Перечисленні науки складають фундамент науки про колір.

Колірні явища

Розглянемо феномен кольору. Феномен – поняття, що означає незвичне явище, яке досягається в чуттєвому досвіді. У філософії вживання терміна “феномен” ототожнюється з явищем, що відображає зовнішні властивості і зв'язки предмета, які розкривають його суть.

Феномен кольору значно ширший, ніж представлений у класичних дисциплінах. Колір – це проблема, яка проходить через всі перелічені і

ще багато не згаданих тут дисциплін. Розгляд феномену кольору в багатьох аспектах, під різними кутами зору робить дослідження міждисциплінарним.

Особливу увагу при вивченні природи світла приділяють колірним явищам. Що ж таке колірні явища? Одні відносять до колірних явищ кольори, які сприймає людина, інші – всі явища, які у певний спосіб пов'язані з кольором, а ще багато хто – всі можливі кольорові явища, які мають місце в природі і застосовні до живопису.

До колірних явищ належать: виникнення кольорів, їхнє змішування, взаємодія (кольорова індукція, кольорові контрасти і т. д.). Деякі вчені в окрему категорію колірних явищ виділяють вплив кольору на людину. До такої впливів належать емоції та уявлення, які індукуються сприйняттям кольору, індивідуальні особливості кольорової переваги, питання кольорової естетики (гармонійні поєднання кольорів). Враховуючи різноманітність колірних явищ та різну їхню природу, надалі розглянемо їх детальніше.

1.2. Фізична природа світла. Фотони та електромагнітні хвилі

Розвиток уявлень про природу світла

Розглянемо, як виникла і розвивалася фізична теорія світла. Світло, за допомогою якого ми бачимо, представлене широким колом різноманітних явищ. Тому обмежимося лише тією незначною частиною світлових явищ, які необхідні для розуміння природи світла, його виникнення, поширення, взаємодії із середовищем, а також механізму бачення світла та кольору.

Для того, щоб був колір, потрібне світло. Саме промені світла, потрапляючи на сітківку ока, викликають відчуття кольору. Щодо поняття світла, то фізики жартома називають світлом найтемніше місце в фізиці. Світло віддавна дивувало людину, викликало її зацікавлення, але залишалося загадкою для неї протягом довгого часового періоду.

Виникає питання: який механізм бачення світла? Одна з найперших ідей зводилася до такого: існує дещо, що виходить з ока і

відчуває навколишні предмети. Ці положення про тілесність світла та твердження про тотожність зору і світла в Давній Греції лягли в основу вчення про світло. Давні греки вважали, що світло витікає з наших очей, як вода зі шланга. Спрямовуючи світло на предмет, ми його “обшупуємо”, тобто бачимо. Незважаючи на дивакуватість уявлень про зорові промені, вони були прогресивними, оскільки давали змогу пояснити отримане зображення предмета при відбиванні світла. Ці уявлення про світло існували в науці до XVII століття.

Далі виникає і розвивається наступна ідея: існує дещо, що потрапляє в око при відбиванні від предметів. У XVII столітті І. Ньютон представив цю ідею як корпускулярну теорію, в якій світло є потоком частинок (їх ще називали корпускулами), який випромінюють світні тіла у всіх напрямках вздовж прямих ліній.

За теорією Ньютона, рух таких частинок можна описати за допомогою законів механіки. Зокрема, відбиванню світла ставили у відповідність пружний співудар кулі і площини, у результаті якого куля пружно відбивалася від неї. Заломленню світла давали таке пояснення: частинки, переходять між середовищами, змінюючи свою швидкість. Ньютон робив спроби також пояснити інтерференцію, припускаючи, що світлові процеси є періодичними. Тобто вже в ті часи певні хвильові уявлення про світло були покладені в основу корпускулярної теорії Ньютона.

Приблизно в той самий час (кінець XVII століття) голландським астрономом та фізиком Х. Гюйгенсом була висунута хвильова теорія світла. За цією теорією, від джерел виходять світлові хвилі і викликають відчуття бачення. Учений заперечував корпускулярну теорію, використовуючи аргумент, який полягав у тому, що коли світло уявляти потоком частинок чи стріл, то незрозуміло, як інші стріли можуть легко через них проходити.

Хвильова теорія базується на принципі Гюйгенса: довільна точка, якої досягає хвиля, – це джерело вторинних хвиль; їх огинаюча – це хвильовий фронт у наступні часові моменти.

До кінця XVII століття були два підходи, що по-різному пояснювали природу світла: корпускулярною теорією Ньютона та хвильовою теорією Гюйгенса. Саме ними була обґрунтована прямолінійність руху світлових променів, фізичний зміст законів відбивання та заломлення. Основний аргумент Ньютона, який він наводив, щоб заперечити хвильову теорію, полягав у такому: хвилі повинні мати щось, у чому вони поширюються. Так, хвиля не існує без води, а світлові хвилі поширюються в пустоті. Це й викликало несприйняття хвильової теорії.

У XIX столітті корпускулярну теорію було відкинуто на користь хвильової, яка перемогла. Це було пов'язано із дослідженнями інтерференції та дифракції англійським фізиком К. Юнгом та французьким фізиком О. Френелем. Детально пояснюючи інтерференцію та дифракцію, ці вчені опиралися на хвильову теорію світла. Надважливим експериментальним підтвердженням цих явищ були незалежні дослідження М. Фуко та Л. Фізо середини XIX століття: вимірне значення швидкості світла у воді було меншим за відповідне значення у вакуумі.

Хоча в цей період хвильова теорія була загально визнаною, фізична природа світла залишалася непоясненою. У 1860-х роках англійський фізик Дж. Максвел встановив загальні закони електромагнітного поля, що дало підставу зробити висновок, що світло є електромагнітною хвилею. У 1860 році Дж. Максвел довів, що електромагнітна хвиля поширюється у вакуумі з такою ж швидкістю, як і світло. На основі цього він висунув ідею про електромагнітну природу світла, за якою світло – поперечна електромагнітна хвиля, тобто електричне і магнітне поля, які поширюються на великі відстані та породжуються дуже швидкими коливаннями електронів.

Однак згодом було відкрито низку явищ (фотоефект, ефект Комптона, закономірності випромінювання абсолютно чорного тіла), які хвильова теорія не могла пояснити і які були пояснені на основі квантової теорії світла. За цією теорією, світло випромінюється окремими порціями – фотонами.

Сьогодні визнають ідею двоїстої природи світла (корпускулярно-хвильовий дуалізм), за якою хвильова теорія використовується для пояснення дифракції, інтерференції, поляризації світла, а корпускулярна – для пояснення явища фотоефекту, ефекту Комптона та ін. Все вищесказане дає розуміння історії розвитку уявлень про природу світла.

Електромагнітні хвилі

Розглянемо кількісний опис розвитку основних ідей про природу світла.

Світлові електромагнітні хвилі вивчає *оптика*. Існування електромагнітної хвилі було теоретично передбачено Дж. Максвелом. Електромагнітна хвиля є електромагнітним полем, яке поширюється у просторі та часі. Вона може поширюватися як у середовищах, так і в вакуумі. Це відрізняє її від механічної хвилі, що поширюється тільки у певних середовищах. Електромагнітна хвиля є поперечною хвилею, натомість механічні – і поперечні, і поздовжні.

У поперечній хвилі напрям коливань і напрям поширення хвилі є перпендикулярними (рис. 1.2).

Поздовжня хвиля – це хвиля, в якій напрям коливань збігається із напрямком поширення (рис. 1.3).

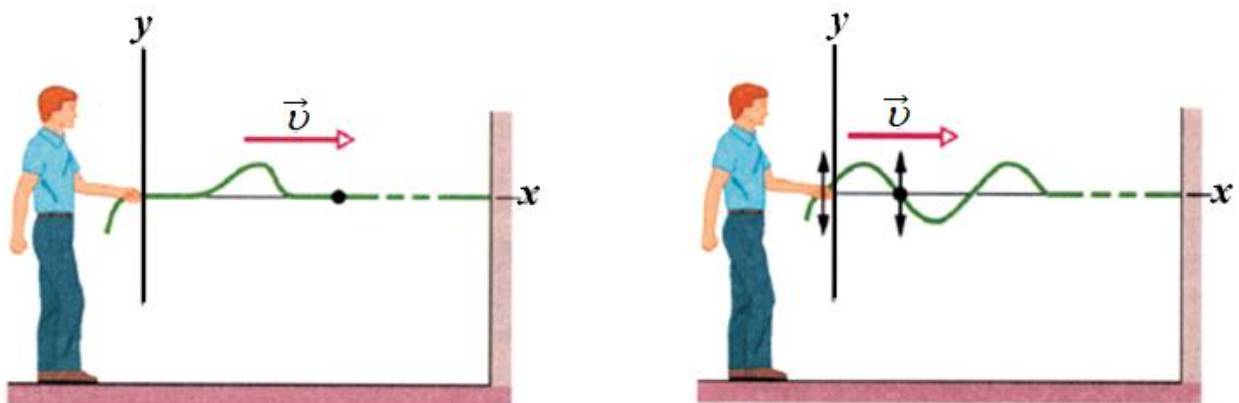


Рис. 1.2. Поперечна механічна хвиля

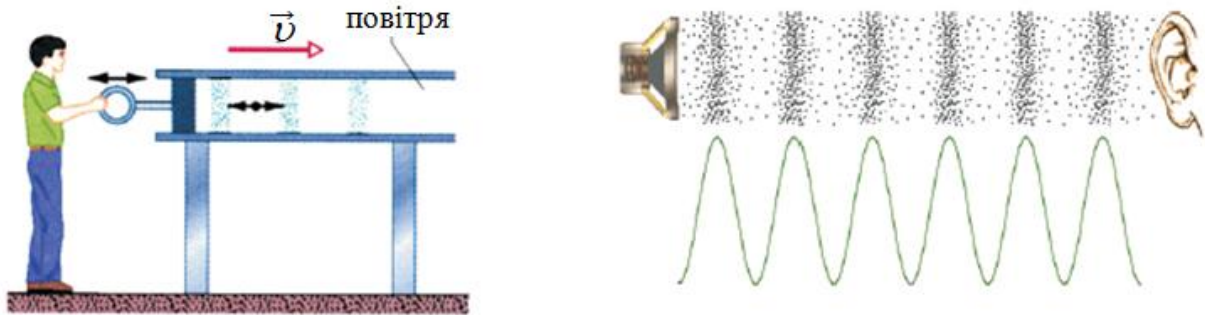


Рис. 1.3. Поздовжня звукова хвиля

В електромагнітній хвилі вектори напруженості електричного \vec{E} та магнітного \vec{H} полів перпендикулярні між собою та перпендикулярні до напрямку поширення хвилі, тобто електромагнітна хвиля – це поперечна хвиля (рис. 1.4).

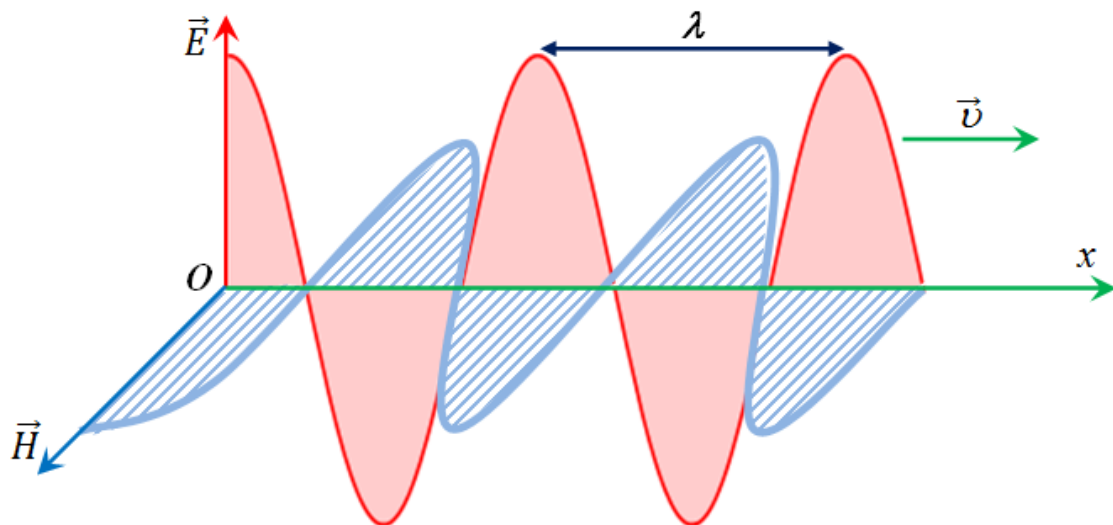


Рис. 1.4. Електромагнітна хвиля

Плоска електромагнітна хвиля (рис. 1.2), яка поширюється вздовж осі Ox , описується рівняннями:

$$E = E_m \cos(\omega t - kx + \alpha), \quad (1.1)$$

$$H = H_m \cos(\omega t - kx + \alpha), \quad (1.2)$$

де E_m, H_m – амплітуди напруженостей електричного та магнітного полів, відповідно; $\omega = 2\pi\nu$ – циклічна частота; $k = 2\pi/\lambda$ – хвильове число; α – початкова фаза коливань; λ – довжина хвилі.

Довжина хвилі, λ (м) – це фізична величина, яка дорівнює відстані між двома сусідніми точками, які коливаються в однаковій фазі, або відстані, на яку поширюється фронт хвилі за один період коливань (рис. 1.4).

Частота, ν (Гц) – це кількість коливань за 1 с.

Період – час одного коливання: $T = 1/\nu = 2\pi/\omega$.

Фазова швидкість – це швидкість переміщення у просторі поверхні постійної фази хвилі (фронту хвилі). У вакуумі електромагнітні хвилі поширюються зі швидкістю $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Довжина хвилі, частота коливань та швидкість хвилі пов'язані співвідношенням:

$$v = \nu\lambda, \quad (1.3)$$

де ν – частота коливань.

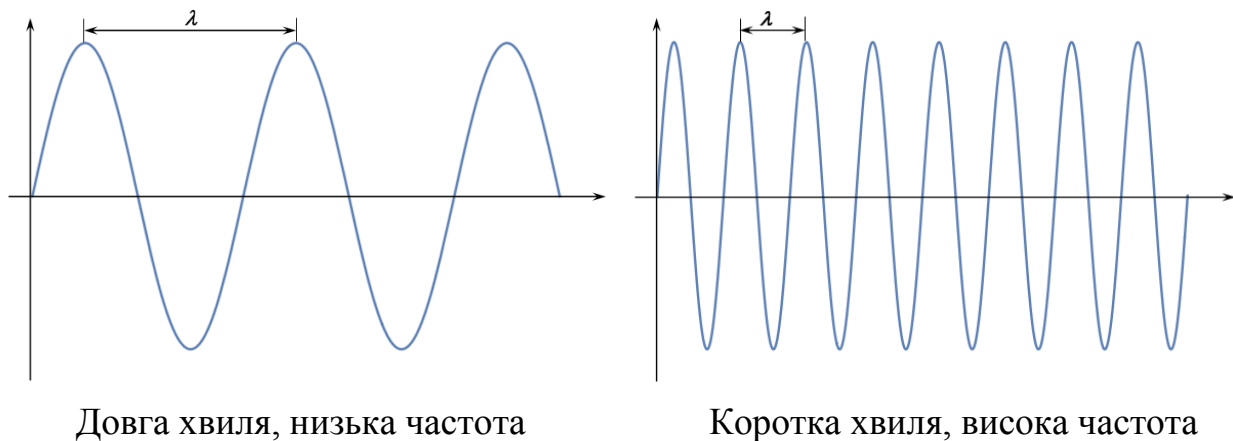


Рис. 1.5. Довжина і частота

Фотони

Електромагнітна теорія пояснила природу дифракції, інтерференції та поляризації світла. Але ця теорія так і не змогла стати цілісною для пояснення всіх оптичних явищ. Уже на початку

XX століття з'ясувалося, що електромагнітна теорія світла не може пояснити явища, спричинені взаємодією світла і речовини. Пояснити закономірності теплового випромінювання чорного тіла, фотоефекту, ефекту Комптона стало можливим, коли були введені квантові уявлення. Науково підтвердилися факти, що світло, з одного боку, проявляє хвильову природу, а з іншого – корпускулярну. Це є свідченням того, що природа світла – двоїста; її характеризують терміном *корпускулярно-хвильовий дуалізм*.

Вивчаючи дію світла, фізики прийшли до висновку, що частинки речовини можуть поглинати і випромінювати світло тільки окремими порціями – квантами. Наприклад, вицвітання тканини чи паперу під дією світла відбувається не відразу, а поступово, – за рахунок поглинання молекулами речовини окремих квантів світла. Подальший розвиток фізики привів до припущення, що світло поширюється також квантами і є потоком частинок – фотонів.

Основними характеристиками фотона є його енергія, маса та імпульс.

Енергія фотона залежить від частоти (довжини хвилі) і дорівнює

$$E_{\phi} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (1.4)$$

де $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Тобто низька частота (довга хвиля) відповідає малій енергії фотона (і навпаки).

Доволі часто використовують сталу Планка $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с. Тоді енергія фотона дорівнює

$$E_{\phi} = \hbar\omega = \frac{2\pi\hbar c}{\lambda}. \quad (1.5)$$

Виходячи з основних висновків теорії відносності, що встановлює взаємозв'язок маси та енергії,

$$E = mc^2, \quad (1.6)$$

можна визначити масу фотона:

$$m_{\phi} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}. \quad (1.7)$$

Оскільки фотон рухається зі швидкістю світла, то він має імпульс з абсолютною величиною

$$p_{\phi} = m_{\phi}c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (1.8)$$

і напрямком, що збігається з напрямком поширення хвилі.

Маса та імпульс фотона залежать від частоти світла (довжини хвилі). Коли довжина хвилі зменшується, то маса фотона зростає і для γ -променів перевищує масу електрона. На відміну від інших елементарних частинок, фотон не має маси спокою.

У формулах (1.4), (1.5), (1.7) та (1.8) основні характеристики фотона (маса, енергія, імпульс) виражаються через характеристики електромагнітної хвилі (довжину хвилі, частоту). У цьому проявляється двоїста корпускулярно-хвильова природа світла.

За малих частот (довгі хвилі) переважають хвильові властивості світла (тому, наприклад, для червоного світла явище дифракції набагато краще спостерігати, ніж для фіолетового). Навпаки, для коротких хвиль (високих частот) краще проявляються квантові властивості світла.

1.3. Шкала електромагнітних хвиль.

Інфрачервоне та ультрафіолетове випромінювання.

Рентгенівські промені. γ -випромінювання

Шкала електромагнітних хвиль

Електромагнітні хвилі – це поперечні хвилі, які можуть поширюватися як у вакуумі, так і в середовищі, та можуть мати різні довжини хвиль. Спектр електромагнітних хвиль складається з видимих та невидимих для людського ока променів. Усі електромагнітні хвилі є неперервною послідовністю, яку можна представити у вигляді *шкали* (рис. 1.6). Вона охоплює діапазон від 10^{-14} метра до тисяч кілометрів.

Межі ділянок спектра достатньо умовні. Електромагнітні випромінювання різної частоти мають принципово різні властивості. Ці відмінності визначаються однією спільною закономірністю: при переході від довгих хвиль до коротких хвильові властивості проявляються все слабше, а квантові – сильніше.

Видима ділянка спектра ((380–760) нм) на своїх межах (фіолетовій (Ф) та червоній (Ч)) плавно переходить у темряву (невидиме для людського ока випромінювання). З боку більших довжин хвиль є *інфрачервоне* випромінювання (ІЧ), виявлене Ф. Гершелем у 1800 році, який помістив у темряву за червоним краєм сонячного спектра термометр із зачорненим кінцем. Термометр помітно нагрівався. Так було виявлено, що в області спектра від 760 нм до 0,1 нм є промені, які невидимі для людського ока, але викликають нагрівання. Далі по шкалі розміщуються радіохвилі, які створюються радіостанціями або зірками.

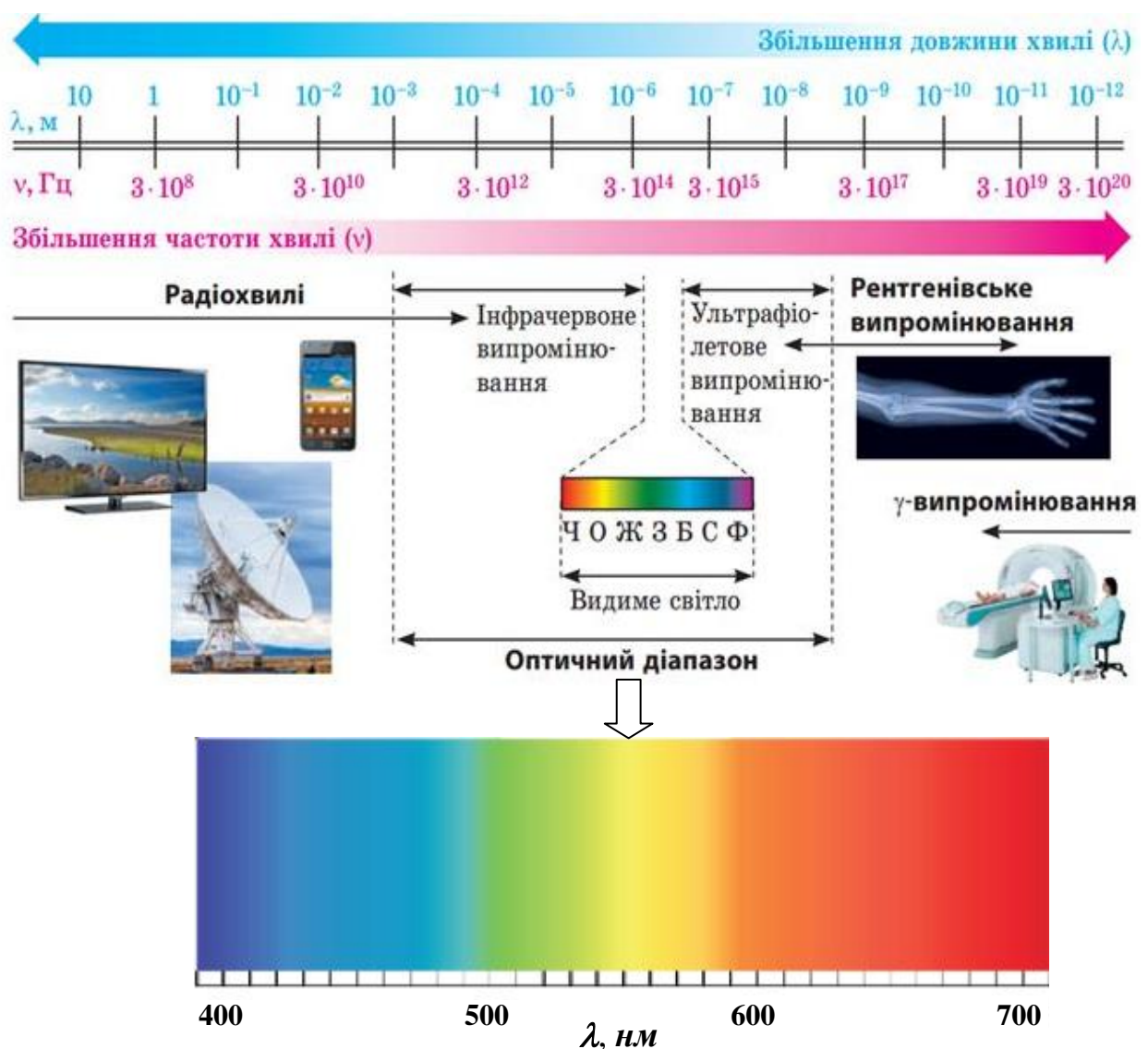


Рис. 1.6. Шкала електромагнітних хвиль

З боку коротких хвиль видимого спектра за фіолетовою межею є ультрафіолетові хвилі. Якщо помістити туди фотопластинку, то вона почорніє. Так проявляються невидимі для людського ока *ультрафіолетові* (УФ) промені. Вони лежать в інтервалі від 380 *нм* до 10 *нм*. Далі йдуть *x*-промені (рентгенівські промені), які були відкриті в другій половині XIX століття. *X*-променева лампа Івана Пулюя (1881 р.) була прототипом рентгенівської трубки, створеної Вільгельмом Рентгеном, тільки через 14 років. Подальші дослідження показали, що *x*-випромінювання є електромагнітним випромінюванням з довжиною хвилі в межах від 0,01 *нм* до 10 *нм*. Ще меншу довжину за *x*-промені має γ -випромінювання, яке створюється радіоактивними речовинами і має довжину меншу, ніж 0,1 *нм*.

Виникає запитання, чому людина бачить такий маленький діапазон хвиль. Природним джерелом світла на Землі є Сонце, а його спектр – не безмежний. Найкоротші хвилі, які доходять від Сонця до Землі, – це хвилі довжиною 290 *нм*. Це пов'язано з тим, що більш короткі хвилі затримуються шаром озону. Більш довгі УФ хвилі до 380 *нм* наше око не тільки не сприймає, але й захищається від них, оскільки вони руйнують органічні речовини. Діапазон (380–760) *нм* є безпечним для людського організму та необхідним для підтримки життєдіяльності. Наступну ділянку спектра – ІЧ випромінювання – око людини не бачить. Якщо б наше око бачило таке випромінювання з довжиною, більшою, ніж 760 *нм*, то враховуючи, що сама людина є джерелом ІЧ випромінювання, вона бачила б тільки внутрішню частину свого ока і більше нічого (а це рівносильно сліпоті). У дальшому діапазоні, з довжиною хвилі (1–5) *мкм*, око людини не бачить, оскільки енергії такого кванта вже недостатньо, щоб здійснювати фотохімічні процеси (зміну молекул під дією світла), які забезпечують механізм зору.

1.4. Видима частина спектра. Співвідношення між довжиною хвилі та кольором світла

Колір передовсім визначається частотою (довжиною хвилі). Визначимо, що людина побачить, дивлячись на електромагнітне випромінювання однієї частоти. Фізики називають це монохроматичним світлом (побутове значення цього слова – “один колір”, але фактично – “одна частота”).

Низькочастотне випромінювання невидиме для людського ока. З доволі яскравого джерела, починаючи з приблизно 400 ТГц ($1 \text{ ТГц} = 10^{12} \text{ Гц}$), більшість людей починають сприймати тьмянний червоний колір. Зі збільшенням частоти колір, що сприймається, поступово від червоного змінюється до помаранчевого, потім до жовтого, до зеленого, до синього та фіолетового. Око не так добре сприймає фіолетовий колір. Він завжди виглядає темним порівняно з іншими джерелами однакової інтенсивності. Деся між 700 ТГц і 800 ТГц світ знову стає темним. Світлові відчуття у людини може викликати тільки маленька частина спектра ($380\text{--}760 \text{ нм}$), діючи на око. Кожному кольору відповідає своя довжина хвилі (таблиця 1.1): найкоротша хвиля – фіолетовий колір, найдовша – червоний.

Таблиця 1.1. Довжина хвилі видимої частини спектра

Колір	Довжина хвилі, нм	Частота коливань, 10^{12} Гц
Червоний	760 – 640	395 – 470
Помаранчевий	640 – 580	470 – 520
Жовтий	580 – 550	520 – 550
Зелений	550 – 490	550 – 610
Блакитний	490 – 460	610 – 650
Синій	460 – 440	650 – 680
Фіолетовий	440 – 380	680 – 790

Контрольні питання

1. Що таке колір?
2. Що таке відчуття, сприйняття, уявлення?
3. Опишіть механізми та етапи формування сприйняття кольору.
4. Наведіть приклади колірних явищ.
5. Які науки вивчають колір? Опишіть їх взаємозв'язок.
6. Порівняйте енергію та імпульс фотона видимого світла й інфрачервоного випромінювання.
7. Для видимого випромінювання з довжиною хвилі 555 нм розрахуйте частоту, енергію кванта, імпульс фотона.
8. Розташуйте червоне, фіолетове, ультрафіолетове, інфрачервоне та зелене випромінювання в порядку зростання енергії кванта.

ТЕМА 2. ДИСПЕРСІЯ СВІТЛА І КОЛІР ТІЛ

- 2.1. Розкладання білого світла в спектр. Дослід Ньютона. Дисперсія показника заломлення для різних матеріалів.**
- 2.2. Поняття про додаткові кольори.**
- 2.3. Світло і колір тіл. Поглинання, відбивання і пропускання світла.**
- 2.4. Кольорові тіла, освічені білим світлом.**
- 2.5. Кольорові тіла, освічені кольоровим світлом.**
- 2.6. Розсіювання світла. Закон Релея. Колір неба і зірок.**
- 2.7. Розкладання білого світла в спектр у явищах інтерференції та дифракції.**

2.1. Розкладання білого світла в спектр. Дослід Ньютона. Дисперсія показника заломлення для різних матеріалів

В основі отримання кольорів лежить ідея розкладання білого світла в спектр на окремі кольори. Для такого розкладу отримують різні оптичні явища: дисперсію, інтерференцію, дифракцію світла. Спрямовуючи на певне фізичне тіло біле світло, можна отримати після виходу з нього набір кольорів (чи спектр). Для спостереження явища дисперсії таким тілом є скляна призма (рис. 2.1), інтерференції – біпризма Френеля (тонкі плівки, рис. 2.2), дифракції – щілина (рис. 2.3) чи дифракційна ґратка (рис. 2.4). Отримані спектри називають дисперсійними, інтерференційними та дифракційними, відповідно.

З історії вивчення теорії кольору бачимо, що перше дослідження сонячного світла і причин виникнення кольорів було проведено І. Ньютоном у роботі “Нова теорія світла і кольорів” (1672). Ця робота заклала основу сучасних наукових уявлень про колір.

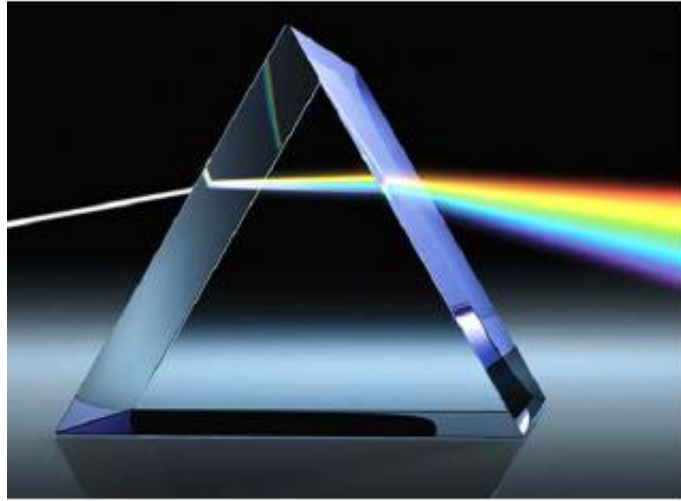


Рис. 2.1. Дисперсія при проходженні білого світла через трикутну призму



Рис. 2.2. Інтерференція світла у плівці бензину на поверхні води



Рис. 2.3. Дифракція світла на щілині



Рис. 2.4. Дифракція світла на компакт-диску, який є дифракційною ґраткою

При потраплянні у речовину світло зазнає зміни швидкості (заломлення) і проявляє *дисперсію*. *Дисперсією світла* називаються явища, зумовлені залежністю показника заломлення речовини від довжини (або частоти) світлової хвилі.

При пропусканні через скляну призму вузького пучка світла на екрані, встановленому за призмою, утворюється райдужна смужка, яку називають *спектром*. При цьому найбільше відхиляється світло фіолетового кольору, а найменше – червоного (рис. 2.1). Оскільки кут падіння на першу грань у променів усіх кольорів однаковий, а кути заломлення – різні, то із закону заломлення випливає, що для світла фіолетового кольору показник заломлення найбільший, а для червоного – найменший. Розкладання світла в спектр скляною призмою є наочним доведенням залежності абсолютного показника заломлення скла від довжини хвилі світла. Ця залежність властива всім речовинам. Закон заломлення має вигляд:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (2.1)$$

де i та r – кут падіння та кут заломлення, відповідно; n_1 та n_2 – абсолютні показники заломлення, відповідно, першого та другого середовища.

Таким чином, у досліді Ньютона відображені два основні факти: по-перше, біле світло – сукупність простих кольорів; по-друге, світло різного кольору (різної довжини хвилі) по-різному заломлюється в матеріалі.

Райдуга (веселка) – це дисперсія сонячного світла на краплинках дощу (рис. 2.5). Райдуга завжди розміщена проти Сонця, а центр кола, частиною якого є дуга райдуги, лежить на продовженні лінії, проведеної від Сонця до спостерігача. Кутовий радіус цього кола завжди той самий. Що нижче Сонце, то вище над горизонтом райдуга. У головній райдузі зовнішній край червоного кольору, а внутрішній – фіолетового. Іноді спостерігається і вторинна райдуга, в якій кольори розміщені у зворотному порядку.

Гра кольорів у дорогоцінному камені – це теж прояв дисперсії світла. Алмаз огранюють так, щоб світло, що ввійшло через одну грань, виходило через іншу. Біле світло при цьому розкладається в спектр, демонструючи захопливу гру кольорів.



Рис. 2.5. Дисперсія сонячного світла на краплинах дощу (райдуга)

Отже, кожен колір спектра характеризується своєю довжиною хвилі, тобто він може бути заданим досить точно довжиною хвилі або частотою. Світлові хвилі самі собою не мають кольору, колір виникає при сприйнятті цих хвиль людським оком та мозком.

2.2. Поняття про додаткові кольори

Три основні кольори світла – червоний, синій і зелений. Усі основні кольори змішуються, утворюючи біле світло (рис. 2.6). Коли змішати два будь-які основні кольори світла, то отримуються вторинні:

Основний колір + Основний колір = Додатковий колір

Синій + Червоний = Пурпуровий

Червоний + Зелений = Жовтий

Зелений + Синій = Блакитний

Червоний + Синій + Зелений = Білий

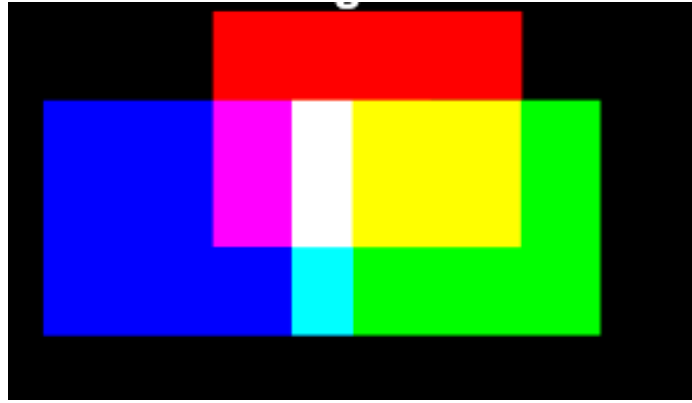


Рис. 2.6. Основні та додаткові кольори

Додаткові кольори (або *доповнювальні*) – це основні та вторинні кольори, які поєднуючись, утворюють біле світло. **Блакитний** – це вторинний колір, який є синтезом **синього** та **зеленого** в однаковій пропорції. Оскільки **синій** і **зелений** кольори змішуються з **червоним**, утворюючи біле світло, то **блакитний** колір змішується з **червоним**, утворюючи біле світло:

Основний колір + **Вторинний колір** = Біле світло

Червоний + **Блакитний** = Біле світло

Синій + **Жовтий** = Біле світло

Зелений + **Пурпуровий** = Біле світло

2.3. Світло і колір тіл.

Поглинання, відбивання і пропускання світла

Предмети, які не випромінюють власне світло (не є джерелами світла), відбиватимуть певну частину світла, що потрапляє на них, а інша його частина поглинатиметься цими предметами. Власне такі предмети бачимо у відбитому світлі. Якщо будуть поглинатися всі падаючі промені світла (всіх довжин хвиль) у пропорції, що відповідає спектра, то поглинання в такому випадку називається *невибірковим* (*неселективним*). Коли світлові промені поглинатимуться в іншій пропорції, ніж вони представлені у спектрі світла, що падає на предмет, то поглинання називають *вибірковим* (*селективним*).

Відношення інтенсивності поглинутого світлового випромінювання до інтенсивності падаючого називається *коефіцієнтом поглинання*.

Відношення інтенсивності відбитого поверхнею світлового випромінювання до інтенсивності падаючого називається *коефіцієнтом відбивання*.

Коефіцієнт відбивання та коефіцієнт поглинання залежать від довжини хвилі, тобто від кольору світла. Поверхня чорного кольору поглинає майже все випромінювання. Поверхня білого кольору відбиває практично все випромінювання, що падає на неї.

Світлові промені, які потрапляють на поверхню тіла, поглинаються, відбиваються, або проходять через це тіло (рис. 2.7). Прозорі тіла володіють всіма трьома властивостями, а непрозорі – тільки поглинанням та відбиванням.

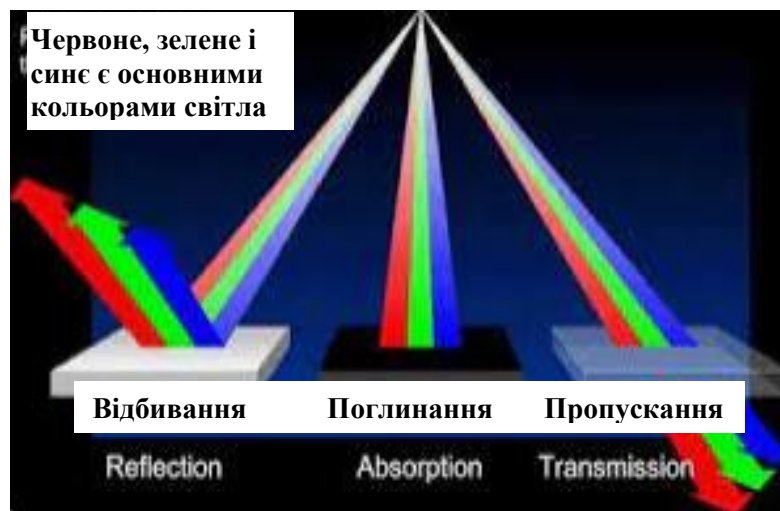


Рис. 2.7. Відбивання, поглинання та пропускання світла

Поглинання світла

Розглянемо процес поглинання світла окремими прозорими тілами. Тіло, яке поглинає світло певних довжин і пропускає інші електромагнітні хвилі, називається *світлофільтром*. Світлофільтр можна використовувати, щоб поглинати частину світла, а іншу пропускати.

Фільтр основного кольору

Фільтр основного кольору (червоний, синій або зелений) пропускатиме світло **лише цього** основного кольору (рис. 2.8, 2.9).

Якщо дивитися через червоний фільтр, світло буде виглядати червоним або чорним, якщо цього кольору світла немає (рис. 2.8). Блакитний колір – вторинний колір, який є синтезом синього та зеленого світла, тобто не містить червоної складової. Тому через такий світлофільтр не проходить ніяке світло.

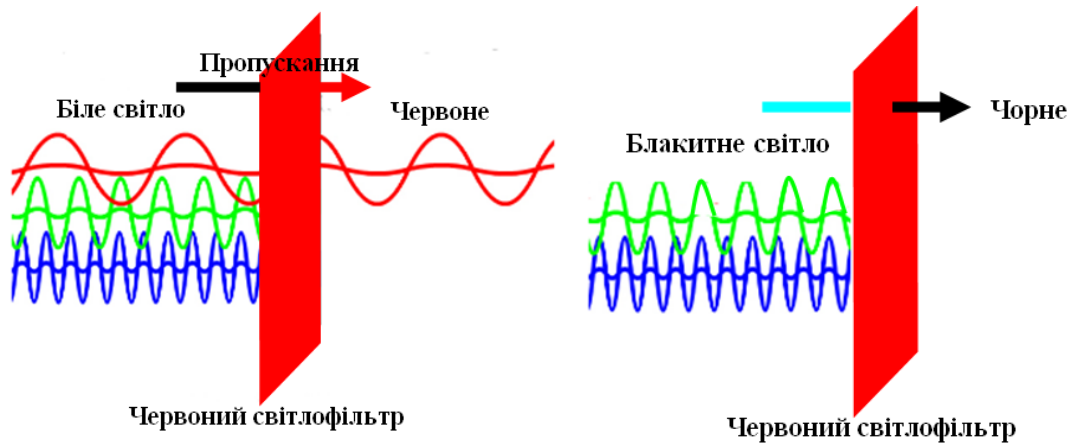


Рис. 2.8. Проходження білого та блакитного світла через червоний світлофільтр

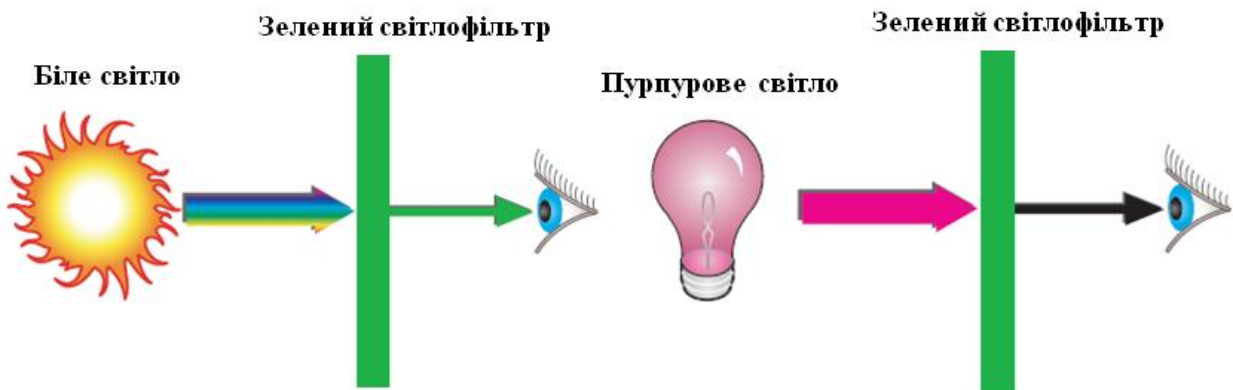


Рис. 2.9. Проходження білого та пурпурового світла через зелений світлофільтр

Аналогічну картину спостерігаємо при проходженні білого та пурпурового світла через зелений світлофільтр. Біле світло містить зелену складову, тому в око потрапляє зелене світло, а інші кольори поглинаються світлофільтром. Пурпуровий колір не містить зеленого світла, а отже, все випромінювання поглинається. Якщо ж через зелений світлофільтр пропустити жовте або блакитне випромінювання, то на виході будемо мати зелене світло. Це спричинено тим, що ці вторинні кольори містять зелений.

Фільтр вторинного кольору

За допомогою фільтра вторинного кольору (жовтого, пурпурового або блакитного (колір морської хвилі)) можна передати вторинний колір (або будь-який з основних кольорів, з яких він складається).

На рис. 2.10 показано результати проходження світла різного кольору через блакитний світлофільтр (світлофільтр вторинного кольору).

Біле світло як результат синтезу трьох основних кольорів містить і зелений, і синій колір. Блакитний світлофільтр поглинає всі кольори, окрім зеленого та синього. Тому через світлофільтр пройде світло синього та зеленого кольору, які при злитті дадуть блакитний. Пурпурове є синтезом червоного та синього кольору, але блакитний світлофільтр поглинає червоне світло. Тому зображення пурпурового предмета через блакитний світлофільтр буде повністю синім. Червоне світло повністю поглинається блакитним світлофільтром. Тому зображення червоних предметів через блакитний світлофільтр будуть чорними.

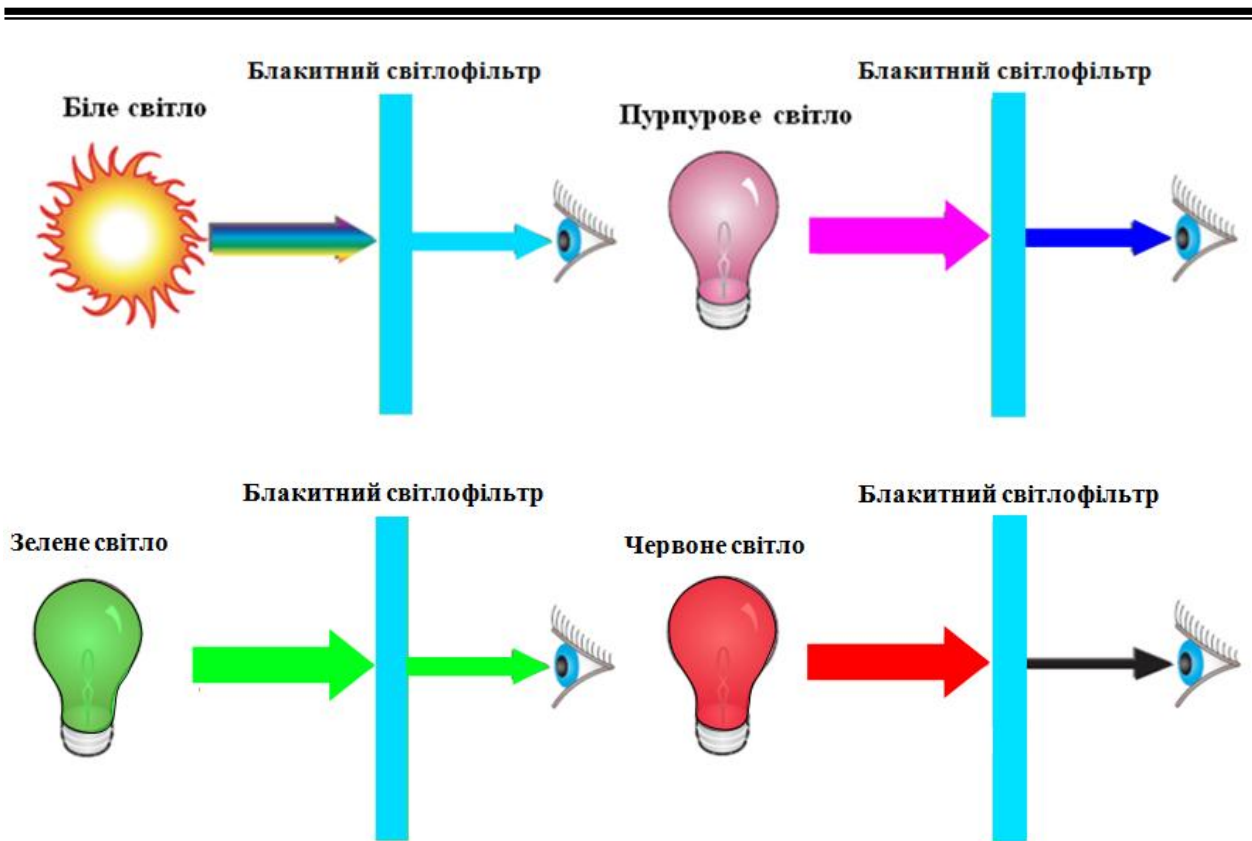


Рис. 2.10. Проходження світла різних кольорів через світлофільтр вторинного кольору (блакитний)

2.4. Кольорові тіла, освічені білим світлом

Відбивання та поглинання світла непрозорими тілами

В однорідному середовищі, наприклад, у повітрі, світлові промені поширюються прямолінійно. А якщо на своєму шляху вони зустрічають непрозору поліровану поверхню, то переважно відбиваються від неї. Дзеркальні поверхні дають правильне відбивання, шорсткі – відбитий розсіяний або дифузний. Залежно від спектрального розподілу коефіцієнтів відбивання та поглинання такими тілами, ми бачимо їх у певному кольорі (рис. 2.11). Якщо поверхня поглинає електромагнітні хвилі всіх довжин, окрім тих, які відповідають червоному кольору, то таке тіло в білому світлі ми бачимо червоним. Біла поверхня в однаковій пропорції відбиває електромагнітні хвилі у всьому видимому діапазоні.

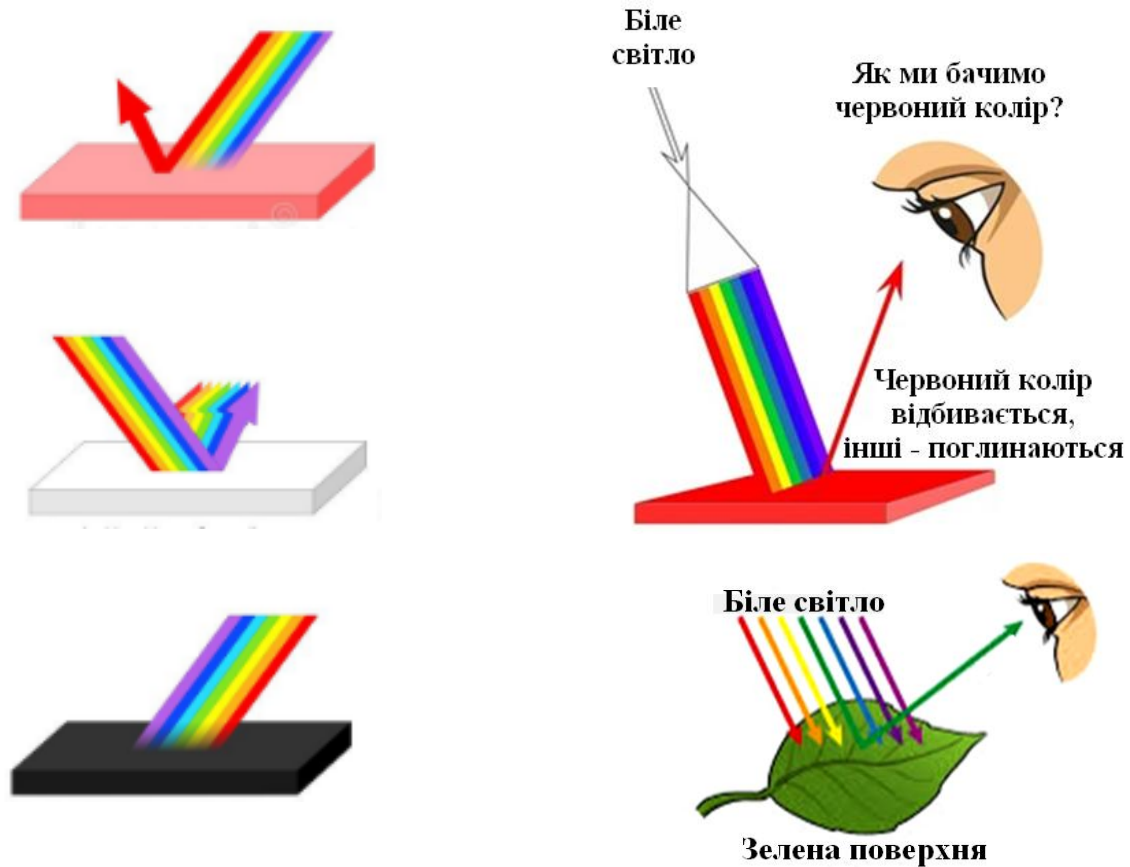


Рис. 2.11. Кольоросприйняття різних поверхонь при їх освітленні білим світлом

Причому, що менший коефіцієнт відбивання, то більш насичено-сірий колір матиме тіло. Абсолютно чорне тіло повністю поглинає світло будь-якої довжини хвилі (рис. 2.11).

2.5. Кольорові тіла, освічені кольоровим світлом

Цікавим є ефект кольору при освітленні предметів монохроматичним світлом. У випадку білого тіла, будемо бачити освітлений предмет такого ж кольору, яким світлом його освітлюємо (біла куля на рис. 2.12). Чорний предмет у будь-якому випадку, залишиться чорним, оскільки поглинаються всі кольори.

У випадку, наприклад, освітлення червоного куба червоним світлом, він залишиться червоним, оскільки червона поверхня відбиває тільки червоне світло. Навпаки, при освітленні синього куба червоним



Жовтий куб і біла куля, освітлені звичайною лампою денного світла

Жовтий куб і біла куля, освітлені блакитним світлом

Жовтий куб і біла куля, освітлені жовтим світлом



Синій, червоний та жовтий куб, освітлені звичайною лампою денного світла

Синій, червоний та жовтий куб, освітлені блакитним світлом



Синій, червоний та жовтий куб, освітлені червоним світлом

Синій, червоний та жовтий куб, освітлені жовтим світлом

Рис. 2.12. Кольоросприйняття різних поверхонь при їх освітленні монохроматичним світлом

світлом, бачитимемо його чорним. Це пояснюється тим, що синій куб відбиває тільки синє світло. Оскільки у такому випадку він освітлюється червоним світлом, то все випромінювання, що падає, поглинається.

Складніша ситуація, коли маємо справу зі світлом та поверхнями неосновних кольорів. Так, при освітленні жовтого куба блакитним світлом, бачимо його в зеленому кольорі. Це пояснюється так: жовтий колір є сумішшю зеленого та червоного, а блакитний – зеленого та синього. Отже, жовтий куб відбиває зелене та червоне світло, а інші поглинає. Тобто у такому випадку відбиватиметься тільки зелене світло. Аналогічно, при освітленні синього куба жовтим світлом останній буде чорним. Оскільки жовте світло – це суміш зеленого та червоного, які в цьому випадку поглинаються.

2.6. Розсіювання світла. Закон Релея. Колір неба і зірок

Реальні середовища практично ніколи не бувають однорідними, бо в них завжди є різні макроскопічні неоднорідності: тверді частинки в газі (дим), рідина, в якій наявні краплини нерозчиненої іншої рідини (емульсії), тверді частинки в рідині (суспензії). Такі середовища називаються *каламутними*.

В оптично неоднорідних середовищах світло поширюватиметься у напрямках, що відрізняються від напрямку поширення падаючої хвилі. *Розсіюванням світла* є процес, який супроводжується зміною напрямків руху світла в речовині.

У випадку поширення світла в каламутних середовищах відбувається дифракція його на неоднорідностях. Внаслідок дифракції світло поширюється в напрямках, що відмінні від напрямку поширення падаючої хвилі, тобто розсіюється. Хвилі, які випромінюють частинки каламутного середовища, некогерентні між собою і при накладанні не можуть інтерферувати. Тому оптично неоднорідні середовища розсіюватимуть світло в усіх напрямках.

Інтенсивність розсіюваного світла істотно залежатиме від того, як розмір оптичних неоднорідностей співвідноситься з довжиною хвилі. Розсіювання світла в каламутних середовищах з розмірами неоднорідностей, не більшими $(0,1-0,2)\lambda$, називається *явищем Тіндаля*. Його можна спостерігати, наприклад, під час проходження яскравого пучка світла крізь шар повітря, наповненого дрібними частинками диму. Якщо каламутне середовище освітлюється пучком білого світла, то при спостереженні збоку воно здається блакитним. У пучку світла, який пройшов через товстий шар каламутного середовища, переважає довгохвильове світло, тому середовище в прохідному світлі здається червонуватим. Цю закономірність вивчав в 1899 році Релей і показав, що інтенсивність світла, яке розсіює частинка, є обернено пропорційним довжині хвилі в четвертій степені:

$$I \sim \frac{1}{\lambda^4}. \quad (2.2)$$

Як результат, фіолетові та сині промені розсіюватимуться сильніше від червоних. Так, у випадку розсіювання білого світла, воно буде блакитного відтінку, а світло, що пройшло в оптичному середовищі, буде збагаченим довгохвильовим випромінюванням. Саме цим і пояснюється синій колір неба. Якщо б не розсіювання світла, то воно здавалось би чорним, оскільки не є джерелом світла. Навпаки, у прямих сонячних променях є недостача синього світла і, відповідно, надлишок червоного. Це пояснює червоне забарвлення Сонця, коли воно заходить за горизонт. У цьому випадку сонячні промені проходять в атмосфері значно більший шлях, ніж опівдні.

2.7. Розкладання білого світла в спектр у явищах інтерференції та дифракції

Кожна людина неодноразово спостерігала кольорові плями на калюжі з тонкою плівкою бензину (рис. 2.13) чи кольорову мильну бульбашку. Постає запитання: звідки беруться кольорові забарвлення цих плівок при освітленні білим світлом? Усе це – результат інтерференції.

Інтерференція – це явище накладання когерентних хвиль, в результаті чого спостерігається перерозподіл інтенсивності світла: в одних місцях спостерігається підсилення, в інших – навпаки, послаблення. *Когерентні хвилі* – це хвилі однакової частоти зі сталою в часі різницею фаз.

У випадках інтерференції в тонких плівках, когерентні хвилі виникають, як правило, в результаті відбивання від верхньої та нижньої поверхні плівки. Зрозуміло, що такі хвилі є когерентними, оскільки виникають у результаті поділу однієї і тієї ж хвилі: частина хвилі відбивається, а інша заломлюється, проходить в друге середовище і відбивається від нижньої межі плівки (рис. 2.13).

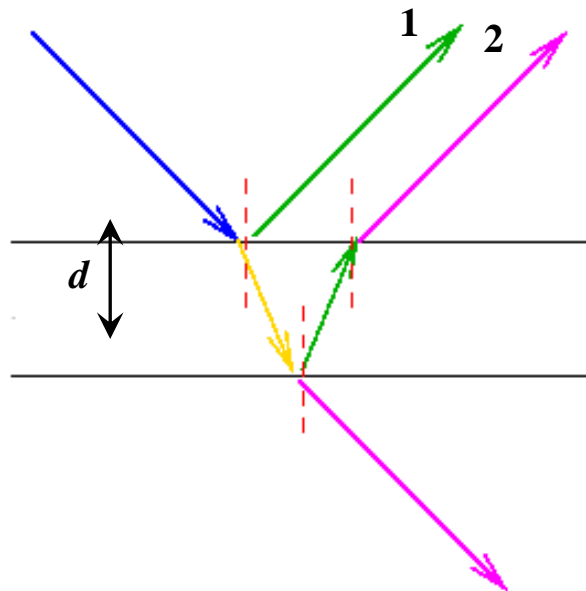


Рис. 2.13. Інтерференція світла в тонкій плівці

Підсилення інтенсивності світла (*максимум інтерференції*) спостерігається за умови, коли різниця ходу двох променів дорівнює цілому числу хвиль (або парному числу півхвиль):

$$\Delta = k\lambda, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.3)$$

Навпаки, послаблення інтенсивності світла (*мінімум інтерференції*) спостерігається за умови, коли різниця ходу двох когерентних променів дорівнює непарному числу півхвиль:

$$\Delta = (2k + 1)\lambda/2, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.4)$$

У випадку, коли промені падають під малим кутом (практично перпендикулярно до поверхні), різниця ходу між променями 1 та 2 $\Delta = 2d$. Тут важливо врахувати таке. Коли має місце відбивання від більш оптично густого середовища, то втрачається пів хвилі (фаза коливань змінюється на протилежну). *Більш оптично густе середовище* – це середовище із більшим показником заломлення. У формулах (2.3) та (2.4) також треба врахувати, що в середовищі довжина хвилі зменшується в n разів (n – показник заломлення).

З формул (2.3) та (2.4) бачимо, що результат інтерференційної картини залежить від довжини хвилі (кольору світла). Оскільки на практиці плівка не є однакової товщини, то максимум інтерференції спостерігається в місцях різної товщини для різних кольорів при

освітленні плівки білим світлом. Виникають кольорові смуги, які називають смугами однакової товщини.

Такими смугами є, наприклад, *кільця Ньютона*, які можна спостерігати в результаті накладання променів 2 та 3 на рис. 2.14.

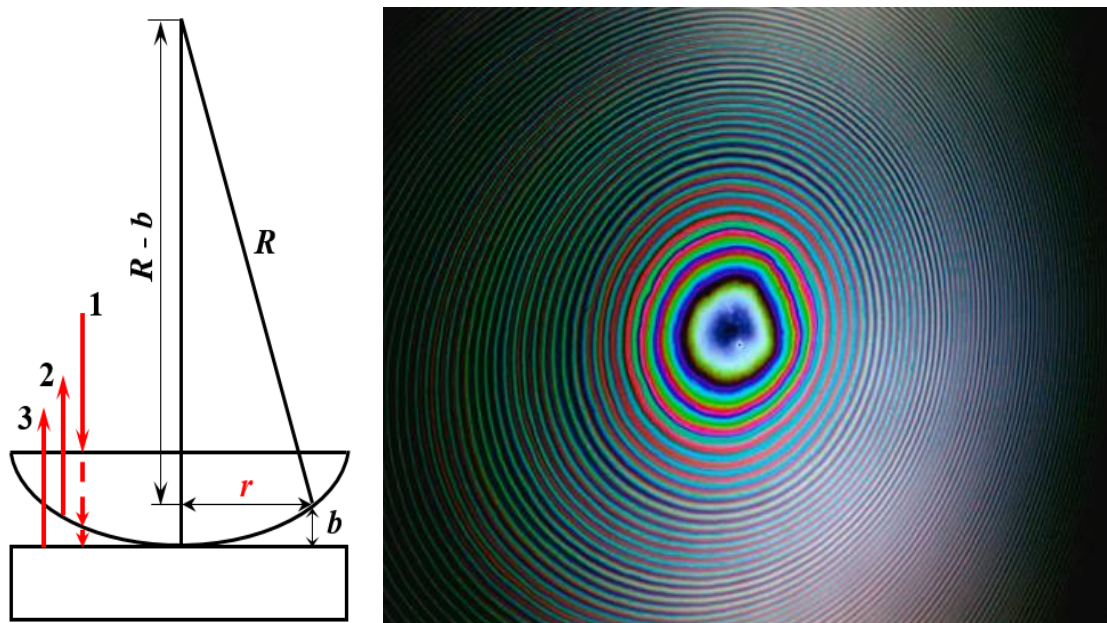


Рис. 2.14. Кільця Ньютона

Також можна спостерігати розкладання в спектр білого світла при його проходженні через вузьку щілину (рис. 2.3), дифракційну ґратку (періодично розташовані вузькі щілини), на компакт-диску (рис. 2.4). Це – результат дифракції світла. *Дифракція* – це явище огинання хвилями перешкод (відхилення від їхнього прямолінійного поширення). Явище дифракції пояснюється на основі принципу Гюйгенса-Френеля. Кожна точка простору, в яку приходить хвиля, є джерелом вторинних хвиль, і ці хвилі є когерентні між собою, тобто можуть інтерферувати.

При потраплянні світла на дифракційну ґратку, світло відхиляється і спостерігається підсилення інтенсивності світла в точках, положення яких визначається співвідношенням:

$$d \sin \varphi = k \lambda, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (2.5)$$

де d – період дифракційної ґратки; φ – кут відхилення променя відносно початкового напрямку поширення (рис. 2.15).

Як бачимо з цієї формули, положення максимуму (кут відхилення) залежить від довжини світлової хвилі, тобто від кольору світла (окрім центрального максимуму, $k = 0$). Тому в центрі спостерігаємо білу смугу, а в інших місцях – кольорові (рис. 2.15). При більших значення k може мати місце перекриття ліній, що відповідають різній довжині хвилі. У цьому випадку відокремити їх вже неможливо. Це відбувається за умови:

$$k\lambda_1 = (k+1)\lambda_2. \quad (2.6)$$

Ще один цікавий момент: у випадку дифракції сильніше відхиляються промені з більшою довжиною хвилі (червоні) (рис. 2.15), на відміну від дисперсії (рис. 2.1), де найбільше заломлюється фіолетове світло.

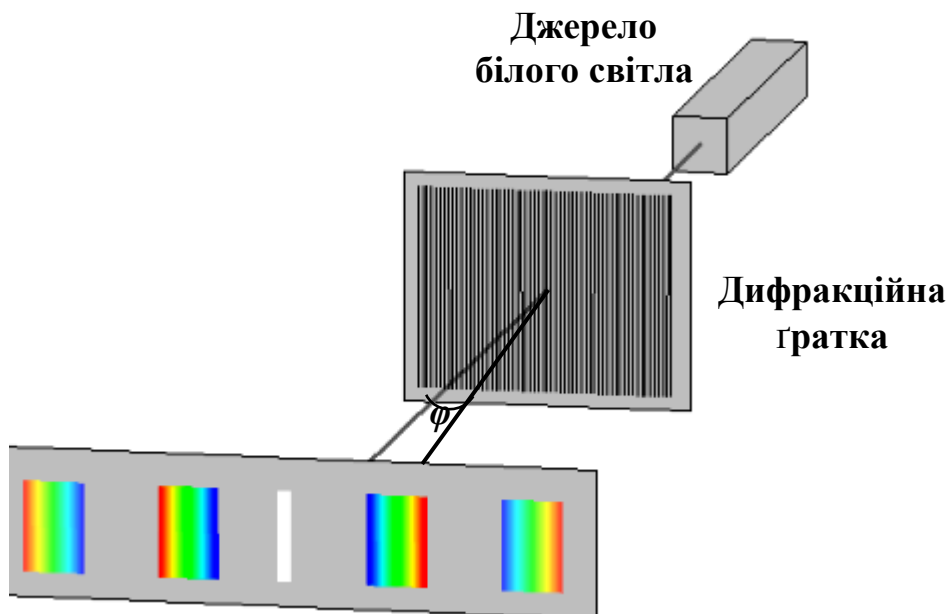


Рис. 2.15. Дифракція білого світла на дифракційній ґратці

Контрольні питання

1. Поясніть явище дисперсії. Чому дисперсія виникає після дощу?
2. Чому промені світла, які мають різну довжину хвилі, по-різному заломлюються в скляній призмі?
3. Наведіть приклади дисперсії у природі, техніці, мистецтві.
4. Назвіть три основні кольори, при накладанні яких утворюється біле світло.
5. Який колір матиме вночі ялинка, якщо вона освічена червоним світлом?
6. Який колір матиме вночі ялинка, якщо вона освічена зеленим світлом?
7. Яке тіло при освітленні білим світлом ми бачимо чорним?
8. Якщо зелене світло пропустити через жовтий світлофільтр, то світло якого кольору потрапить в наше око?
9. Якими оптичними властивостями володіє біла поверхня?
10. Поясніть, чому небо синє.
11. Поясніть, чому при заході сонця воно червоного кольору.
12. Що таке розсіювання світла?
13. Поясніть явище інтерференції та сформулюйте умови спостереження максимуму та мінімуму інтерференційної картини в даній точці.
14. Назвіть приклади явища інтерференції в природі та техніці.
15. Що таке смуги рівної товщини та рівного нахилу?
16. Назвіть приклади явища дифракції в природі та техніці.
17. Поясніть, чому при проходженні світла через трикутну скляну призму сильніше заломлюється фіолетове світло, а через дифракційну ґратку – червоне.

ТЕМА 3. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ КОЛЬОРОСПРИЙНЯТТЯ

3.1. Основні фотометричні величини.

3.2. Співвідношення між енергетичними і світловими характеристиками випромінювання.

3.3. Спектральна чутливість ока. Функція видності людського ока.

3.4. Будова ока та зорові відчуття. Чутливість людського ока до сприйняття світла різного кольору в різних умовах.

3.5. Спотворення сприйняття кольору. Хроматична аберація. Дальтонізм.

3.1. Основні фотометричні величини

Задачі світлових вимірювань

Світло відрізняється кількісно. Так, переходячи з одного приміщення в інше, ми виявляємо, що в одному місці світліше, а в іншому – темніше. Користуючись різними джерелами світла, наприклад лампами, бачимо, що одна з них світить яскравіше, ніж інша. Тобто до світла можна використовувати поняття “більше”, “менше” чи “дорівнює”, а отже, його можна виміряти кількісно.

Коли від загальних якісних уявлень “більше” – “менше” перейти до чисел, то потрібно передовсім точно визначити ті величини, якими характеризуються відповідні властивості об’єкта і які потрібно виміряти в такій задачі. Наприклад, таку властивість предмета, як “розмір”, можна виразити або довжиною, або площею, або об’ємом, однак – це різні величини. Так, якщо кавун у 10 разів має більший діаметр, ніж яблуко, то площа його поверхні у 100 разів, а об’єм – в 1000 разів більші від відповідних параметрів яблука.

Це стосується й світла. Наприклад, усім очевидно, що сонячне світло значно інтенсивніше, ніж місячне. Але відповідь на питання, у скільки разів, буде залежати від того, які саме величини будуть зіставлятися. Так, за середньою яскравістю диска, Сонце перевершує повний Місяць в 445000 разів, за освітленістю поверхні Землі – в 465000, а за силою світла – в 60 мільярдів. При цьому, загальний потік світла, яке випромінює Сонце у всіх напрямках, є більшим, ніж розсіяний потік світла освітленою поверхнею Місяця, приблизно в 400 мільярдів разів.

Для того, щоб на практиці виміряти світло у потрібній кількості, залежно від задачі та умов, користуються різними величинами. Коли характеризують світло, створюване певною лампою, то говорять про *силу світла* цієї лампи. Якщо хочуть розповісти про те, наскільки добре освітлений стіл, то використовують термін *освітленість* його поверхні. Якщо ж потрібно описати ефект від дії цього предмета на зір людини, то виходять з поняття *яскравості*.

Оскільки під терміном “світло” розуміють взаємодію між променевою енергією та органом зору – оком, то природно, що й для вимірювання світла також користуються зором. Але тут виникає проблема, яка на початковому етапі створює певні труднощі при розв’язуванні цієї задачі.

Якщо порівнювати два однакових за кольором предмети, то завжди можна впевнено стверджувати, який з них яскравіший, а який темніший. Але встановити, у скільки саме разів яскравість одного з них більша чи менша від яскравості іншого, наш зір не здатний. У цьому і полягає істотна відмінність сприйняття яскравості від багатьох інших зорових відчуттів, наприклад, від сприйняття розмірів предмету. Порівнюючи розмір книги з іншими предметами, ми можемо сказати більш-менш точно, що вона в десять разів менша від довжини стола, на якому лежить. Оцінити ж, у скільки разів білий папір є яскравішим, ніж чорні букви, які на ньому надруковані, дуже і дуже непросто. В десять разів? У сто чи тисячу? Бачимо, що зробити таку оцінку неможливо. Єдине, що зір може оцінити, – це рівність чи нерівність двох

яскравостей. Ось на цій здатності і ґрунтується мистецтво точного вимірювання світла, яке і є предметом *фотометрії*.

Енергія, яка переноситься світлом, називається *світловою* чи *променистою*. Відомо, що світло створене певним джерелом. Розділ оптики, що вивчає параметри джерела світла і потоків світлової енергії, називається *фотометрією*. Термін “фотометрія” утворений від двох грецьких слів: “фос” – світло і “метрео” – вимірюю, та означає світлові виміри.

Але для чого потрібно вимірювати світло? По-перше, воно може становити інтерес саме собою. Наприклад, дуже важливо визначити освітленість аудиторій, шкільних кабінетів, заводських цехів, щоб з’ясувати, чи достатньо вони освітлені, чи мають предмети в цих приміщеннях таку яскравість, щоб зір учня, студента чи працівника не втомлювався і водночас використовувався з найбільшою ефективністю. Також важливим є вивчення різного роду ламп та інших освітлювальних приладів з метою визначення їхньої придатності для створення в деякому приміщенні умов, найбільш сприятливих для роботи зору. І в першому, і в другому випадку світло повинно вивчатися в контексті взаємодії променистої енергії та органу зору людини.

По-друге, світлове випромінювання часто може слугувати важливою фізичною характеристикою досліджуваного об’єкта. Наприклад, в астрономії вимірювання світла зірок дає можливість встановити про відстань до зірки та її розміри.

Основні світлові фотометричні величини

У фотометрії для введення означень багатьох світлових величин використовують поняття “*точкове ізотропне джерело світла*”. *Точкове ізотропне джерело* є таким джерелом, яке можна прийняти за матеріальну точку, що випромінює світло однаково в усіх напрямках (нехтують розміром джерела). В однорідному ізотропному середовищі хвиля, яку випромінює точкове джерело, є сферичною. Реальним наближенням такого джерела може бути маленька розжарена кулька. У фотометрії джерело світла прийнято вважати *точковим*, якщо

відстань від випромінювача до приймача світла перевищує лінійні розміри випромінювача не менше, ніж у 10 разів.

Довільний предмет, що світиться, наприклад, вогонь, електрична лампа, Сонце, випромінюють променисту енергію, яка у вигляді електромагнітних хвиль поширюється в різних напрямках.

Розглянемо обмежений пучок променів у вигляді конуса (рис. 3.1), всередині якого неперервно тече промениста енергія.

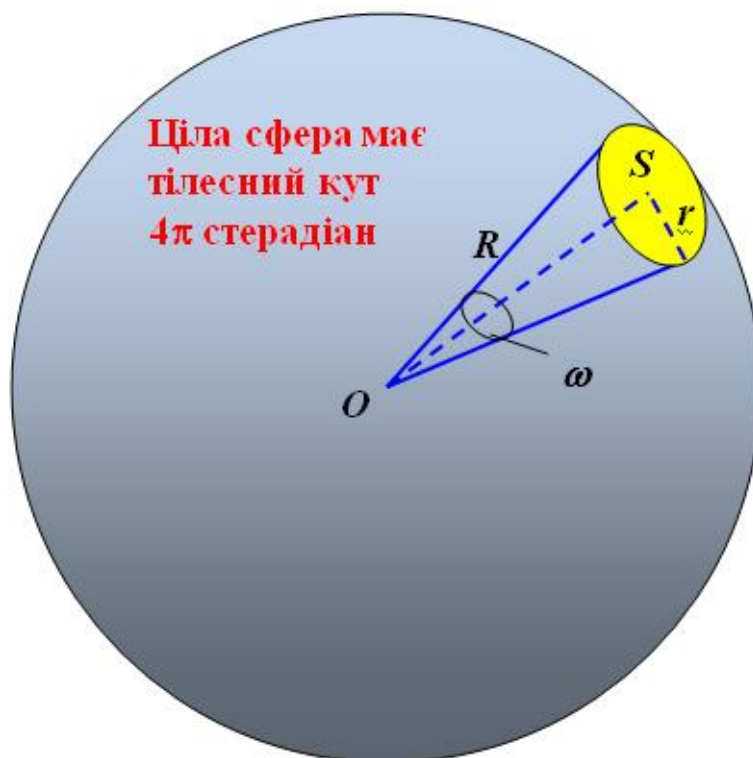


Рис. 3.1. Пучок світла від точкового ізотропного джерела світла

Тілесні кути ω вимірюють в *стерадіанах*. *Стерадіан* – це тілесний кут з вершиною в центрі сфери, що вирізає на сферичній поверхні площу, рівну квадрату радіуса сфери. Формула для знаходження тілесного кута:

$$\omega = \frac{S}{R^2} = \frac{\pi r^2}{R^2}, \quad (3.1)$$

де S – площа сферичної поверхні, на яку спирається тілесний кут. Повний тілесний кут дорівнює 4π стерадіанів.

Питання про сприйняття світла оком належать, строго кажучи, до фізіологічної оптики. Тут переплітаються і фізичні, і фізіологічні процеси.

Принцип фотометрії такий. Користуючись зоровим відчуттям, вимірюють силу випромінювання як нову основну величину, що має назву *сили світла*. Введення цієї основної величини достатнє для того, щоб всі інші фотометричні величини вимірювались як похідні величини.

Сила світла (I) – це характеристика джерела світла, що визначає за зоровими відчуттями, яку енергію випромінює джерело за одну секунду в тілесний кут, рівний одному стерadianу.

На початковому етапі еталоном сили світла була свічка, яка горіла в певних умовах. Її параметри були близькими до звичних нам свічок. Як легко здогадатися, подібне джерело було дуже ненадійним стандартом. З 1 січня 1948 року основною фотометричною одиницею сили світла є *кандела (кд)*, від лат. *candele* – свічка).

Кандела (кд) – це основна одиниця вимірювання сили світла в системі СІ. Вона дорівнює силі світла, що випромінюється еталоном перпендикулярно до поверхні, площею $1/60 \text{ см}^2$, при температурі тверднення платини (2042,5 K) за нормального атмосферного тиску. У 1979 році на 16-й Генеральній конференції, присвяченій проблемам міри та ваги, було прийняте таке формулювання: “Кандела – це таке значення сили світла в деякому визначеному напрямку від джерела монохроматичного випромінювання, частота якого дорівнює $540 \cdot 10^{12} \text{ Гц}$, а значення енергетичної сили світла в заданому напрямку складає $1/683 \text{ Вт/ср}$ ”. У метрологічних інститутах за первинним еталоном виготовляють вторинні еталони сили світла у вигляді ламп розжарення, які вимагають відповідних режимів експлуатації.

Розмірковуючи про силу світла, ми вважали джерело світла є точкою. Але насправді, світло випромінює не точка, а деяке тіло, що має певні розміри та форму. У випадку протяжного джерела можна говорити про силу світла з елемента його поверхні.

Яскравість (B) – це характеристика випромінювання такого джерела у деякому напрямку. За фізичним змістом, яскравість – це таке значення сили світла, яке випромінює у визначеному напрямку поверхня одиничної площі, перпендикулярна до напрямку поширення:

$$B = \frac{I}{S_n}. \quad (3.2)$$

У випадку нахиленої або викривленої випромінювальної поверхні береться площа проєкції випромінювальної поверхні на площину, перпендикулярну до заданого напрямку. Одиницею яскравості служить $\text{кд}/\text{м}^2$. Значення яскравості, як і сили світла, можуть бути різними різних напрямків. Яскравість ламбертівської поверхні не залежить від напрямку.

Яскравість безпосередньо сприймається оком людини. Коли відсутнє поглинання світла середовищем, у якому воно поширюється, яскравість не залежатиме від відстані.

При яскравості, що перевищує приблизно $0,75 \text{ кд}/\text{см}^2$, відбувається звуження зіниці ока.

Таблиця 3.1. Приклади яскравості деяких джерел світла

Джерело	$B, \text{кд}/\text{см}^2$
Нічне небо	10^{-7}
Місяць	0,25
Сонце біля горизонту	600
Сонце в обід	150 000
Полум'я свічки	до 1
Лампа розжарення матова	5-40
Лампа розжарення прозора	200-3000
Лампа денного світла	0,2-0,4
Ксенонова лампа високого тиску	50 000 – 1 000 000

Світловий потік (Φ) є потоком променистої енергії, що оцінюється за зоровими відчуттями. Це сила світла, помножена на тілесний кут. Для випадку, коли значення сили світла не стало в області, на яку спирається

тілесний кут, то $\Phi = \int I d\omega$. Звідси одержимо формулу, за якою обчислюється повний світловий потік джерела світла:

$$\Phi_0 = \int_0^{4\pi} I d\omega. \quad (3.3)$$

Світловий потік вимірюють в люменах (лм). Люмен – це таке значення світлового потоку, створеного ізотропним джерелом за значення сили світла 1 кд та величини тілесного кута 1 стерadian.

Значення повного світлового потоку, створеного ізотропним джерелом:

$$\Phi_0 = 4\pi I. \quad (3.4)$$

Світність (R) – це фізична величина, що описує густину випромінювання з поверхні протяжного джерела світла. Це значення сумарного світлового потоку, який світна поверхня одиничної площі випромінює у всіх напрямках:

$$R = \frac{\Phi}{S}. \quad (3.5)$$

Вимірюється світність в лм/м². Світність описує, як дана область поверхні випромінює світло у всіх просторових напрямках. Яскравість, якщо пригадати, характеризує випромінювання у заданому напрямку. Світність R та яскравість B ламбертівського джерела пов'язані простим співвідношенням:

$$R = \pi B. \quad (3.6)$$

Освітленість (E) використовують, щоб охарактеризувати не світне тіло, а поверхню, на яку потрапляє світловий потік. Освітленість – це величина світлового потоку, що потрапляє на одиницю площі освітлювальної поверхні:

$$E = \frac{\Phi}{S}. \quad (3.7)$$

Вимірюють освітленість в люксах (лк, від лат. lux – світло). Люкс – це освітленість, яку створює потік у один люмен, який рівномірно розподілений по одиниці площі поверхні. Тобто $1 \text{ лк} = 1 \text{ лм} / 1 \text{ м}^2$. Позасистемна одиниця освітленості: $1 \text{ фот} = 1 \text{ лм} / 1 \text{ см}^2$. У США, Великобританії та деяких інших країнах за одиницю освітленості обрано фут-кандела: $1 \text{ фут-кандела} = 1 \text{ лм} / 1 \text{ фут}^2 = 10,764 \text{ лк}$.

Освітленість, створену точковим джерелом, виражають через значення сили світла та відстань до поверхні джерела. Нехай на площадку ΔS (рис. 3.2) потрапляє світловий потік в межах тілесного кута $\Delta\omega$, що спирається на площадку ΔS . Кут $\Delta\omega = \frac{\Delta S \cos i}{r^2}$. Отже,

$$\Delta\Phi = \frac{I \Delta S \cos i}{r^2}, \text{ або освітленість}$$

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S} = \frac{I}{r^2} \cos i. \quad (3.8)$$

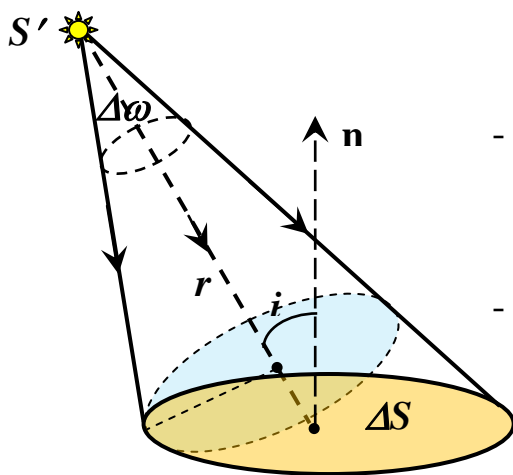


Рис. 3.2

Ця формула відображає **два закони Ламберта:**

- **Освітленість поверхні точковим джерелом є обернено пропорційною до квадрата відстані до джерела.**
- **Освітленість поверхні є прямо пропорційною до косинуса кута падіння світлових променів.**

Залежністю освітленості від кута падіння сонячного проміння пояснюється зміна пір року.

Треба зазначити, що освітленість поверхні можна створювати не лише за допомогою одного джерела, а будь-якого числа довільно розміщених джерел, що спрямовують світло на певну поверхню (або її фрагмент) уздовж різних прямих, які утворюють різні кути з нормаллю до освітлюваної поверхні. Отже, загальну освітленість обчислюватимемо як суму освітленостей поверхні в даній точці, створюваних різними світними тілами:

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n + \dots$$

Остання формула є математичним записом *закону адитивності*, з якого випливає, що загальну освітленість утворює сума освітленостей поверхні в даній точці, створених різними джерелами світла. У таблиці 3.2 наведені значення освітленості, створеної різними джерелами за різних умов.

Сприйняття яскравості зором людини

Вище йшла мова про те, що з п'яти основних фотометричних величин, тільки яскравість сприймається зором людини. Нехай G – око (рис. 3.3). Його складну систему представимо у спрощеному вигляді: у вигляді лінзи L , яка розташована на місці рогівки і має радіус ρ . На поверхні предмета P , який розглядається оком, виділимо невелику ділянку у вигляді круга радіусом R , що розміщений на відстані F від ока. Зображення цієї ділянки на сітківці ока буде мати вигляд круга радіусом r .

Таблиця 3.2. Приклади освітленості в різних умовах

Умови	E , лк
Сонячне світло на межі земної атмосфери	135 000
Денна освітленість у безхмарну погоду	5 000 – 90 000
Денна освітленість у хмарну погоду	3 000 – 30 000
У кімнаті, вдень	10 – 300
На столі, освітленому настільною лампою	20 – 100
Освітленість в безхмарну погоду в “білу ніч”	1
У місячну ясну ніч	0,1 – 0,2
У похмуру осінню ніч	$10^{-3} - 10^{-4}$
Від планети Венера	$8 \cdot 10^{-5}$
Від зірки	$8 \cdot 10^{-7} - 10^{-14}$

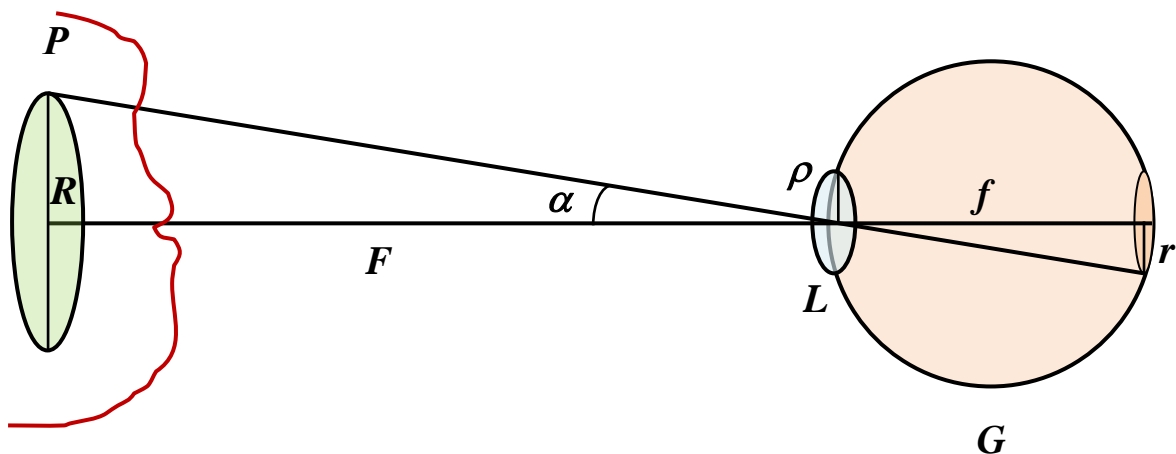


Рис. 3.3. Сприйняття яскравості оком

Позначивши відстань від L до сітківки через f (для ока, на відміну, наприклад, від фотоапарата, ця відстань є сталою), можна записати:

$$\frac{r}{R} = \frac{f}{F}. \quad (3.9)$$

Нехай яскравість об'єкта дорівнює B . Тоді сила світла I ділянки буде дорівнювати

$$I = \pi R^2 B. \quad (3.10)$$

Тоді освітленість, яку ділянка створює на оці:

$$E = \frac{I}{F^2} = \pi B \frac{R^2}{F^2}. \quad (3.11)$$

Світловий потік, що проникає всередину ока і доходить до сітківки, дорівнює освітленості, помноженій на площу лінзи L і ще на деякий коефіцієнт τ , який виражає втрати світла за рахунок відбивання біля поверхні і поглинання всередині ока:

$$\Phi = \tau \pi \rho^2 E = \tau \pi^2 \rho^2 B \frac{R^2}{F^2}.$$

Цей потік потрапляє на площу зображення, створюючи на ньому освітленість:

$$E_p = \frac{\Phi}{\pi r^2} = \tau \pi B \frac{R^2}{r^2} \frac{\rho^2}{F^2}. \quad (3.12)$$

Підставивши (3.9) в (3.12), отримаємо:

$$E_p = \tau \pi B \frac{\rho^2}{f^2}. \quad (3.13)$$

Сила світлового відчуття визначається саме цією освітленістю, яку отримує ділянка сітківки, на яку проектується зображення предмета, який розглядає людина. Це означає, що з усіх фотометричних характеристик об'єкта її визначає саме яскравість. Значення тут мають і деякі інші фактори, наприклад, радіус нашої уявної лінзи, який в дійсності визначається радіусом зіниці ока людини. Зіниця може змінювати розмір, що є одним з механізмів адаптації ока до яскравості предмета. Але це вже стосується системи ока, а не об'єкта.

3.2. Співвідношення між енергетичними і світловими характеристиками випромінювання

Як відомо, світло – це результат взаємодії променистої енергії із зором людини. Тому повинна існувати певна залежність між потужністю енергії та інтенсивністю світла. Загалом можна сказати: що більша енергія, то інтенсивніше світло. **Але чи завжди буде так? Ні, не завжди.** Тому що інтенсивність світла залежить не тільки від кількості променистої енергії, але і від її якості.

Світловий потік ми виражаємо в спеціальних, суто світлових, чи “фотометричних” одиницях – *люменах*. А для променистого потоку ми використовуємо звичайні одиниці потужності – *вати*. І тут постає питання: **чи існує певне співвідношення між кількістю *ват* енергії даного пучка променів та кількістю *люменів* світлового потоку у ньому?**

Таке співвідношення існує, але воно залежить від якості, а точніше, від спектрального складу променистої енергії. У цьому і полягає складність питання, яке розглядається.

Ми вже знаємо, що звичайне біле світло, наприклад, світло Сонця чи лампи, є сумішшю всіх кольорів: у ньому містяться і червоні, і жовті, і зелені, і сині промені. Більш строго, досліджуваний пучок променів, як правило, містить енергію всіх частин спектра. До його складу входять промені з різними довжинами хвиль. Але наше око на різні ділянки спектра реагує по-різному. До енергії однієї частини спектра воно більш чутливе, до іншої – менш чутливе; промені однієї довжини викликають більше подразнення, а іншої – менше. Наприклад, якщо до даного пучка променів додати небагато енергії жовто-зеленої частини спектра, то яскравість, яка визначається цим пучком, різко зросте. Це пояснюється тим, що око є дуже чутливим до жовто-зелених променів, і вже незначна їхня кількість сприймається як яскраве світло. Навпаки, до фіолетового світла чутливість ока є дуже низькою, тому, якщо додати навіть дуже велику кількість енергії таких променів, то виграш у яскравості буде дуже малим. І скільки б ми не додавали до пучка променів енергії ультрафіолетової ділянки спектра, на видимому

яскравість це жодним чином не вплине, оскільки ультрафіолетове випромінювання зовсім не діє на око людини і не викликає відчуття світла.

Таким чином, не всі *вати* однакові. Потік **фіолетових** променів в *один ват* для ока людини зовсім інший, ніж *один ват зелених*, оскільки останні викликають значно більше подразнення ока, а отже, й даватимуть світло більшої інтенсивності, ніж фіолетові промені такої ж потужності. Але в потоці білого світла містяться промені всіх кольорів. Промені кожного з них мають свою інтенсивність і по-своєму діють на око. Ось це й приводить до того, що розрахунок люменів за ватами, і навпаки, є доволі складною задачею.

Передовсім відзначимо, що світлові одиниці встановлені незалежно від кольору, а тому їх можна використовувати до джерел і об'єктів будь-якого кольору. Однак технічно це почасти нелегко, оскільки око може впевнено порівнювати тільки поля однакового кольору. Якщо ми будемо спостерігати поля порівняння фотометра при різному забарвленні (наприклад, червоному та зеленому), то знайти для них фотометричну рівновагу буде складно.

Проведемо такий експеримент. Виберемо декілька джерел світла з різним кольором випромінювання, але однаковим світловим потоком Φ . Нехай, наприклад, це будуть різнокольорові лампи розжарення – **червона**, **синя**, **зелена**, біла, причому кожна з них дає потік у рівно 1 люмен. За допомогою *термоелемента* – приладу, який дозволяє виміряти потік променистої енергії Φ_e , виражений у *ватах*, визначимо променисті потоки для кожної з цих ламп. Тоді виявиться, що хоча й світлові потоки цих ламп однакові, променисті потоки – різні. Це показує, що однозначної залежності між люменами і ватами немає. Для різних кольорів одному люмену відповідає різна кількість ват.

Відношення

$$K = \frac{\Phi}{\Phi_e} \quad (\text{лм/Вт}) \quad (3.14)$$

називають *світловою віддачею джерела світла*.

Нагадаємо, що пучок променів, в якому містяться тільки хвилі однієї певної довжини, називається монохроматичним (від грецьких слів “монос” – один та “хромос” – колір). Пучок променів, який містить хвилі різних довжин, називають складним або змішаним.

Якщо мати справу з монохроматичним пучком променів, то між світловим і променистим (енергетичним) потоками завжди буде проста пропорційна залежність: якщо потужність, наприклад, збільшується вдвічі, то й вдвічі збільшується світловий потік.

Позначимо світловий потік монохроматичного пучка з довжиною λ через $\Phi(\lambda)$, а відповідну йому потужність випромінювання – $\Phi_e(\lambda)$. Тоді можна записати:

$$\Phi(\lambda) = M(\lambda)\Phi_e(\lambda). \quad (3.15)$$

Коефіцієнт $M(\lambda)$ є різним для різних точок спектра. Це спостерігається тому, що чутливість ока до різних довжин хвилі є різною. Ця обставина має важливе значення для сприйняття як світла, так і кольору. Вивчаючи, як змінюється величина $M(\lambda)$ вздовж спектра, було встановлено, що вона досягає максимуму на довжині хвилі 555 нм, що відповідає жовто-зеленому кольору. У цій частині спектра монохроматичний потік променистої енергії відповідає найбільшому світловому потоку. Отже, на довжині 555 нм чутливість ока досягає максимуму. Це значення $M = M(\lambda)$, яке відповідає даній довжині хвилі, називають *світловим еквівалентом потужності*. Воно дорівнює 683 лм/Вт.

Розглянемо джерело світла, спектр якого є лінійчастим. При спостереженні в спектроскоп такий спектр виглядає сукупністю окремих ліній, розділених повністю чорними проміжками (рис. 3.4). Світло кожної такої лінії можна вважати монохроматичним. Кожній цій лінії відповідає променистий потік. Повний потік від джерела у такому випадку дорівнює сумі потоків, які відповідають кожній лінії.

Припустимо, що спектр складається з n окремих ліній, розташованих як у видимій, так і невидимій ділянці спектра. Цим лініям відповідають довжини хвиль $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ і, відповідно, світлові потоки $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$. Тоді повний потік буде складатися із суми цих потоків:

$$\Phi = \sum \Phi_i(\lambda) = \Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_n. \quad (3.16)$$

Якщо ми використовуємо джерела, які мають неперервний спектр, то цей спектр потрібно умовно розділити на вузькі поперечні смужки, які відповідають начебто спектральним лініям.

Уявно виріжемо із суцільного спектра смугу, яка, з одного боку, буде обмежена довжиною хвилі λ , а з іншого – довжиною хвилі $\lambda + \Delta\lambda$. Тобто $\Delta\lambda$ – ширина смуги, яка має бути якомога меншою. Із загального променистого потоку Φ_e , який охоплює весь спектр, на частку цієї поверхні припадає невелика частинка $\Delta\Phi_e(\lambda)$. Ця величина буде залежати від розподілу енергії за спектром і, окрім того, буде пропорційна ширині смуги $\Delta\lambda$:

$$\Delta\Phi_e(\lambda) = f(\lambda)\Delta\lambda.$$

Величина $f(\lambda) = \frac{\Delta\Phi_e(\lambda)}{\Delta\lambda}$ виражає розподіл енергії за спектром і називається *спектральною інтенсивністю променистого потоку*.

Повний потік у випадку неперервного спектра буде рівний сумі окремих монохроматичних потоків, як і у випадку лінійчастого спектра. Відмінність полягає лише у тому, що смужки вирізані уявно, тоді як у випадку лінійчастого спектра окремі спектральні лінії були розділені темними проміжками.

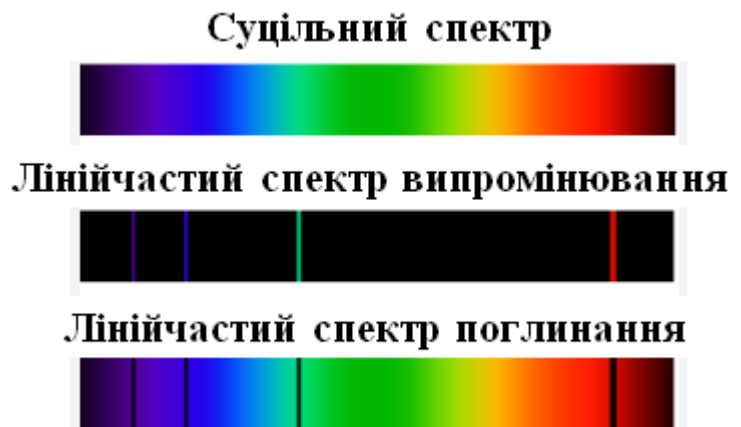


Рис. 3.4. Суцільний та лінійчастий спектр

3.3. Спектральна чутливість ока. Функція видності людського ока

Для вивчення питання про те, як око реагує на промені різних ділянок спектра, проведемо такий експеримент. Розташуємо перед спостерігачем тіло, яке випромінює монохроматичне світло з довжиною хвилі λ і тому здається спостерігачу таким, що світиться і забарвленим у відповідний спектральний колір. Наприклад, це може бути абсолютно білий екран, що повністю відбиває промені, які падають на нього, освітлений монохроматичним світлом. Поряд з цим екраном помістимо інший екран, освітлений світлом від постійного джерела світла. Нехай яскравість B цього другого еталонного екрана, який слугуватиме полем порівняння, буде постійною під час усього експерименту. Спектральний склад світла, яким освітлюємо другий екран, неважливий. Наприклад, це може бути біле світло.

Освіtimo перший екран спочатку **зеленим** світлом з довжиною хвилі $\lambda = 555 \text{ нм}$. Збільшуючи інтенсивність зеленого світла, доб'ємося рівності яскравостей двох екранів.

За цієї умови виміряємо енергію, яку випромінює поверхня першого екрана в бік спостерігача. Нехай ця енергія дорівнює $W_m \text{ ват}$ з кожного квадратного сантиметра на 1 стерадіан .

Потік променистої енергії, розрахований таким чином, тобто потік променистої енергії з нормальної до нього одиниці площі випромінювальної поверхні в межах тілесного кута 1 стерадіан , називають *енергетичною яскравістю*. Ця величина аналогічна візуальній яскравості і відрізняється лише тим, що замість світлового потоку створили променистий.

Тепер освіtimo наш екран променями з іншою довжиною хвилі, наприклад **жовтим** світлом, для якого $\lambda = 580 \text{ нм}$, і знову підберемо інтенсивність так, щоб яскравість екранів здавалась однаковою. Якщо тепер виміряти енергію, яку випромінює перший екран, то отримаємо нове значення енергетичної яскравості $W_1 > W_m$. Інакше кажучи, щоб викликати в оці таке ж відчуття яскравості променями жовтого світла,

потрібно більше енергії, ніж у випадку зелених променів. Якщо замість жовтих променів взяти промені **червоні**, наприклад, з довжиною хвилі $\lambda = 640 \text{ нм}$, то, вирівнявши яскравості екранів, отримаємо ще більше значення енергії $W_2 > W_1$.

Поступово рухаючись все далі в червону область спектра, отримуватимемо все більші і більші значення енергії, необхідні для створення тієї ж яскравості. І далі, при певному значенні довжини хвилі λ , вже ніяким збільшенням енергії не вдасться отримати однакою яскравість екранів. Це спостерігається межа видимого спектра з боку інфрачервоних променів.

Те саме ми спостерігатимемо, якщо будемо рухатися від зеленого світла з довжиною хвилі $\lambda = 555 \text{ нм}$ у фіолетову область спектра. Переходячи до блакитних, синіх, а далі і до фіолетових променів, побачимо, що енергія, яка необхідна для вирівнювання яскравостей двох екранів, збільшується.

Що ж означає отриманий результат? Він означає, що чутливість нашого зору до різних ділянок спектра неоднакова. Найбільш чутливим око є до зеленого світла з довжиною хвилі 555 нм . З віддаленням від цієї довжини як у бік довгих, так і коротких хвиль, чутливість ока зменшується.

Отже, підсумовуємо: хоча око й сприймає дуже вузький діапазон хвиль (від 380 нм до 760 нм), ступінь його чутливості в цьому інтервалі дуже відрізняється.

Візьмемо дві точки спектра, які визначаються довжинами хвиль λ_1 і λ_2 . Позначимо чутливість ока до цих променів як V_1 та V_2 , а енергетичні яскравості, необхідні для отримання однакої видимої яскравості B , як W_1 та W_2 , відповідно. З описаного вище випливає пропорція:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{W_2}{W_1}.$$

Чутливість ока при довжині хвилі $\lambda = 555 \text{ нм}$, тобто максимальну чутливість, приймемо за одиницю. Якщо енергетичну яскравість на цій

довжині позначити W_m , то чутливість в будь-яких точках спектра $\lambda_1, \lambda_2, \dots$ можна обчислити за формулою:

$$V_1 = \frac{W_m}{W_1}, \quad V_2 = \frac{W_m}{W_2}, \quad V_n = \frac{W_m}{W_n}. \quad (3.17)$$

Провівши такі досліди із залученням великої кількості людей, встановили, що залежність $V(\lambda)$ для кожної людини своя, особлива. В однієї людини максимум зміщений у бік фіолетових хвиль, в іншої – в бік червоних. Однак усі ці відхилення у більшості випадків незначні, або у небагатьох людей. Тому домовились вважати, що “нормальною” є чутливість такого ока, для якого крива $V(\lambda)$ відповідає середньому арифметичному з даних для великої кількості людей. Ця крива, яку називають *функцією видності людського ока*, наведена на рис. 3.5.

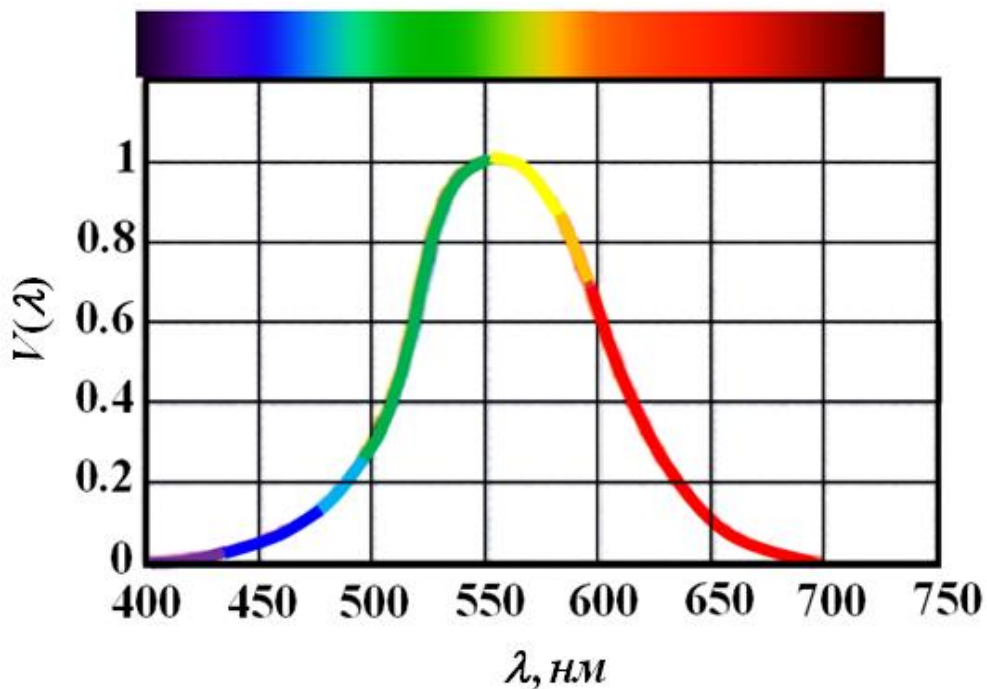


Рис. 3.5. Функція видності людського ока

Закон додавання світла для змішаного пучка променів

Усе вищерозглянуте розв’язує задачу про співвідношенням між променистим і світловим потоком для монохроматичного світла. Дійсно, 1 Вт променистого потоку з довжиною хвилі 555 нм відповідає $M = 683$ лм. Якщо довжина хвилі буде іншою, то й кількість люменів буде меншою, відповідно до функції видності $V(\lambda)$. Тому для

монохроматичного променистого потоку співвідношення між потужністю $\Phi_e(\lambda)$ і світловим потоком $\Phi(\lambda)$ виражається простою формулою:

$$\Phi(\lambda) = MV(\lambda)\Phi_e(\lambda). \quad (3.18)$$

На практиці справу з монохроматичним світлом мають дуже рідко. Природне, а також штучне світло від різноманітних ламп, – це завжди змішане світло, яке складається з променів всіх або хоча б багатьох частин спектра. Тому дуже важливо встановити, яке співвідношення між світлом і енергією для такого змішаного пучка променів.

Для того, щоб відповісти на це питання, повернемося до вищеописаного досліду. Знову розмістимо поряд два білі екрани, які утворюють поля порівняння фотометра. Один з них освітимо пучком променів сталого спектрального складу, наприклад, білим світлом, і будемо його вважати полем порівняння, а на другий спрямуємо пучок монохроматичних променів з довжиною хвилі λ_1 . Відбиваючи ці промені, екран отримає енергетичну яскравість W_1 . Відповідна світлова яскравість буде дорівнювати MV_1W_1 . Вимкнемо цей пучок променів і спрямуємо на екран інший, також монохроматичний пучок, але вже з довжиною хвилі λ_2 . У результаті цього екран буде мати яскравість MV_2W_2 . Після цього спрямуємо на екран відразу обидва пучки.

Відбивання одного пучка променів ніяк не впливає на відбивання іншого. Тому екран матиме енергетичну яскравість $W_1 + W_2$. Таким чином, якщо ці величини окремо були рівними, то енергетична яскравість екрана збільшиться вдвічі. Але чи подвоїться при цьому світлова яскравість? Очевидно, що ні, оскільки значення V_2 не дорівнює значенню V_1 . Яскравість екрана у цьому випадку можна визначити так:

$$B = MV_1W_1 + MV_2W_2. \quad (3.19)$$

Властивість сітківки ока додавати, сумувати монохроматичні яскравості, і причому так, що сумарна світлова яскравість завжди дорівнює сумі світлових монохроматичних яскравостей, називається *властивістю спектральної адитивності*. Далеко не кожен прилад, який реєструє енергію, володіє цим. Наприклад, це стосується фотоплівки.

Усе, встановлене нами стосовно яскравості, звичайно, стосується й інших світлових величин, – освітленості, сили світла, світлового потоку. Кожна з цих величин у випадку змішаного пучка може бути отримана як сума відповідних монохроматичних величин.

Після всього вищесказаного можна сформулювати нове означення “світла”. *Світло* – це сума монохроматичних складових променистої енергії, кожна з яких множиться на відповідне значення спектральної чутливості ока (функцію видності).

Ефект Пуркіньє

Зорове відчуття яскравості різнокольорових предметів сильно ускладнюється одним важливим явищем, яке вперше було спостережене вченим Яном Пуркіньє. Воно полягає у тому, що для різнозбарвлених предметів співвідношення їхньої видимої яскравості змінюється при зміні загального рівня яскравості. Для кращого розуміння цього ефекту розглянемо такий дослід. Одну частину поля фотометра освітлюють червоним світлом, а іншу – синім. При цьому освітлюють так, що для спостерігача вони виглядають однаково яскравими і сильно яскравими. Потім освітленість цих полів суттєво, але однаково зменшують, наприклад, у 1000 разів. Після цього синє поле здається нам набагато яскравішим, ніж червоне.

Отже, ефект Пуркіньє полягає у тому, що при значному послабленні світла, блакитні, сині та фіолетові кольори виграють в яскравості порівняно з жовтими, помаранчевими і червоними. Це ми постійно спостерігаємо в природі при переході від яскравого денного світла до нічної темряви.

Розглянемо для прикладу дві квітки: червоні маки та сині волошки. Вдень, при яскравому сонячному світлі, червоні маки здаються набагато яскравішими, ніж сині волошки. Але в сутінках і вночі співвідношення яскравостей змінюється: мак здається майже чорним, а волошки – світло-сірими.

На малюнку зображено фото герані за різної освітленості. Як бачимо, при добрій освітленості вона є набагато яскравішою, ніж навколишні об'єкти.

При зменшенні освітленості (у сутінках та вночі) червона квітка має меншу яскравість порівняно з іншими предметами.

Причина ефекту Пуркін'є полягає у зсуві кривої видності людського ока в бік коротких (фіолетових) хвиль при зменшенні яскравості. Якщо при денному освітленні максимум функції видності відповідає довжині хвилі 555 нм (рис. 3.5), то при дуже слабкій освітленості (вночі) він зсувається до 510 нм. Для кращого розуміння цього ефекту потрібно більш детально розглянути будову ока.



Квітка герані вдень, в сутінках та вночі (фото з Інтернету)

3.4. Будова ока та зорові відчуття. Чутливість людського ока до сприйняття світла різного кольору в різних умовах

Стереокольоровий зір людини – це дуже складний процес, який ще не вивчений до кінця, незважаючи на сотні років інтенсивних досліджень і моделювання. Зір передбачає майже одночасну взаємодію двох очей і мозку через мережу нейронів, рецепторів та інших спеціалізованих клітин. Першими кроками цього сенсорного процесу є стимуляція світлових рецепторів в очах, перетворення світлових подразників або зображень на сигнали та передача електричних сигналів, що містять зорову інформацію, від кожного ока до мозку через зорові нерви. Ця інформація обробляється у декілька етапів, зрештою досягаючи зорової кори головного мозку.

Людське око оснащене різноманітними оптичними компонентами, зокрема, рогівкою, райдужною оболонкою, зіницею, водянистим і склоподібним тілом, лінзою зі змінним фокусом та сітківкою. Разом ці елементи формують зображення об'єктів, які потрапляють у поле зору кожного ока. Коли об'єкт спостерігають, він спочатку фокусується через опуклу рогівку та елементи кришталика, утворюючи перевернуте зображення на поверхні сітківки – багатошарової мембрани, яка містить мільйони світлочутливих клітин. Щоб досягти сітківки, світлові промені, сфокусовані рогівкою, повинні послідовно пройти через водянисту вологу (у передній камері), кришталик, драглисте склоподібне тіло, а також судинний і нейрональний шари сітківки. Лише тоді вони досягають світлочутливого зовнішнього шару.

Незважаючи на деякі неправильні уявлення через широкий спектр термінології, яка використовується для опису анатомії ока, саме рогівка, а не кришталик, відповідає за більшу частину загальної заломлювальної сили ока. Будучи гладкою та прозорою, як скло, але гнучкою та міцною, як пластик, передня, сильно вигнута, прозора частина зовнішньої стінки очного яблука дозволяє світловим променям, що формують зображення, проходити всередину. Рогівка також захищає око, створюючи фізичний бар'єр, який забезпечує захист внутрішньої частини ока від мікроорганізмів, пилу, волокон, хімікатів та інших шкідливих матеріалів. Незважаючи на те, що ширина рогівки набагато тонша за кришталик, рогівка забезпечує приблизно 65 % заломлювальної сили ока.

Бачення починається, коли світло від предмета потрапляє в око людини. Кришталик в оці фокусує світло як зображення на сітківці. Сітківка ока людини використовує два типи клітин для сприйняття світла: палички і колбочки. Ці мікроскопічні сенсори розподілені по всій сітківці. Кожен тип виконує свою функцію.

Палички та колбочки перетворюють світло на електричні імпульси, які нервовими волокнами прямують до мозку, де перетворюються на відчуття від форми та кольору спостережуваного об'єкта.

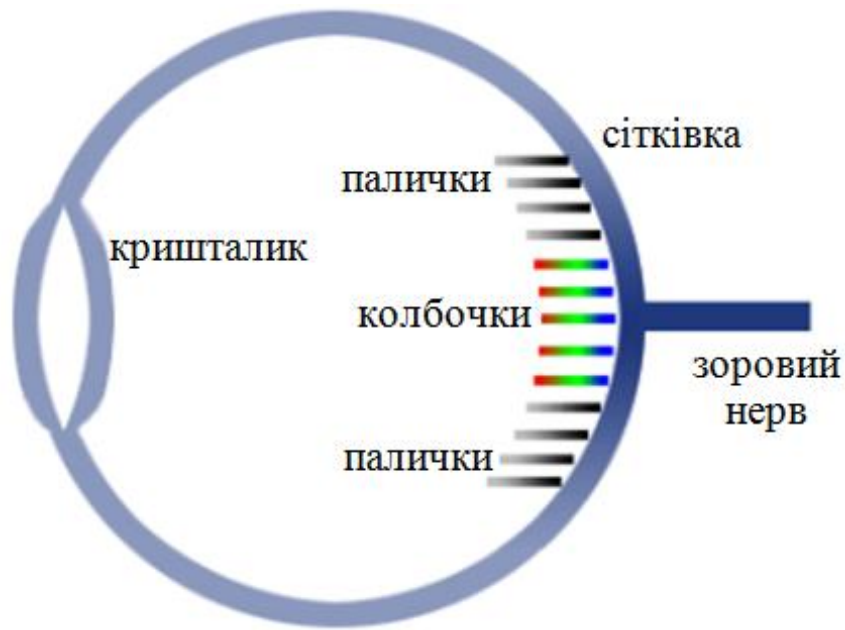


Рис. 3.6. Будова ока

Усі палички мають однакову чутливість до довжин хвиль світла, а отже, не можуть побачити колір об'єкта.

Палички сприймають всі предмети як відтінки сірого. Оскільки вони також дуже чутливі до світла (набагато чутливіші, ніж колбочки), то дають нам змогу бачити за дуже слабкого освітлення: наприклад, нічні предмети, освітлені лише зірками чи Місяцем. При яскравому освітленні палички втрачають чутливість і перестають виробляти сигнал, який мозок використовує для бачення. У випадку великої яскравості лише колбочки надають корисну інформацію мозку.

Існує три види колбочок: одні мають найбільшу чутливість до довгих хвиль видимого світла, другі – найбільш чутливі до середніх довжин хвиль видимого світла, а ще один вид має найбільшу чутливість до коротких довжин хвиль видимого світла.

Ми сприймаємо яскравість на основі загального рівня сигналу, що надходить від усіх колбочок, а колір – на основі відносних рівнів сигналу від цих трьох типів колбочок. Коли переважно подразнюються колбочки, чутливі до довгих хвиль, бачимо червоний колір. Коли ж, в основному, подразнюються колбочки, чутливі до середніх довжин

хвиль, бачимо зелений колір. Якщо ж подразнюються тільки колбочки, чутливі до коротких хвиль, ми бачимо синій колір.

Оскільки існує лише три типи колбочок, то весь зір базується на цих трьох колірних відчуттях. Тому більшість кольорів описують як світлі або темні, а також поєднання двох кольорів, наприклад, червоного та синього. Через обробку сигналів від колбочок у мозку ми не можемо побачити зеленувато-червоний або червонувато-зелений колір. Поєднання червоного і зеленого дає відчуття жовтого. Тому об'єкт виглядає зеленувато-жовтим або жовтувато-зеленим. Ці відчуття є результатом різної кількості сигналів від червоних і зелених чутливих колбочок. Коли ці сигнали абсолютно однакові, ми бачимо жовтий колір без червоного та зеленого. На рис. 3.7 показано чутливість паличок (чорна лінія) і трьох типів колбочок залежно від довжин хвиль видимого світла.

Такий розподіл спектральної чутливості паличок та колбочок людини дає можливість пояснити ефект Пуркін'є. В умовах доброї освітленості палички нечутливі, і основну роль у розпізнаванні предметів відіграють колбочки.

При зменшенні освітленості відновлюється чутливість паличок, яка є набагато більшою, ніж чутливість колбочок. Тому в цьому випадку функція видності людського ока визначається чутливістю паличок і має вигляд, наведений на рис. 3.8 (чорна лінія). Таким чином, в умовах низької освітленості максимум функції видності людського ока зсувається від жовто-зеленої частини спектра до зелено-блакитної (від 555 нм до 510 нм).

Причому, якщо порівняти чутливість ока для синього і червоного світла (470 нм і 650 нм) при добрій освітленості, то бачимо, що вона майже однакова і приблизно дорівнює 0,1 (кольорова крива на рис. 3.8). При низькій освітленості, за інших однакових умов, функція видності для червоного світла практично дорівнює нулю, а для синього приймає досить велике значення.

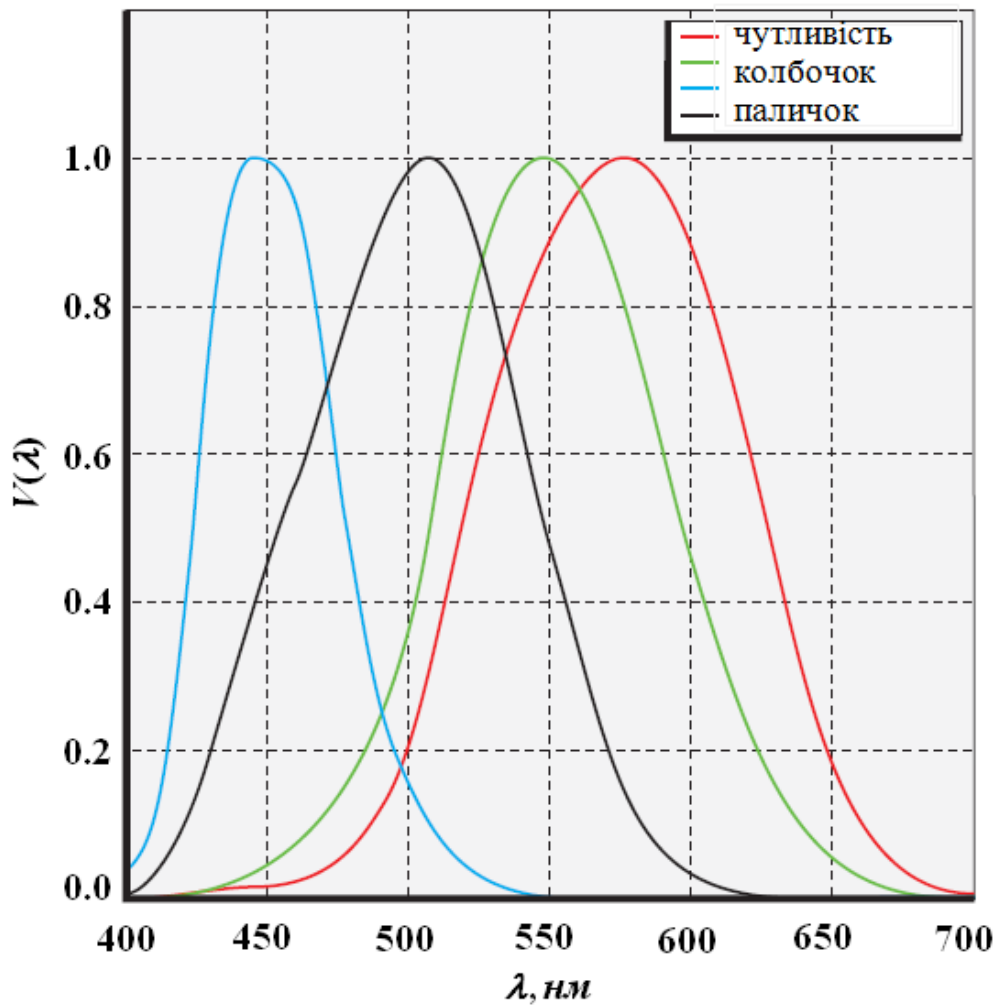


Рис. 3.7. Спектральна чутливість паличок людини та чутливих колбочок до червоного, зеленого та синього кольорів

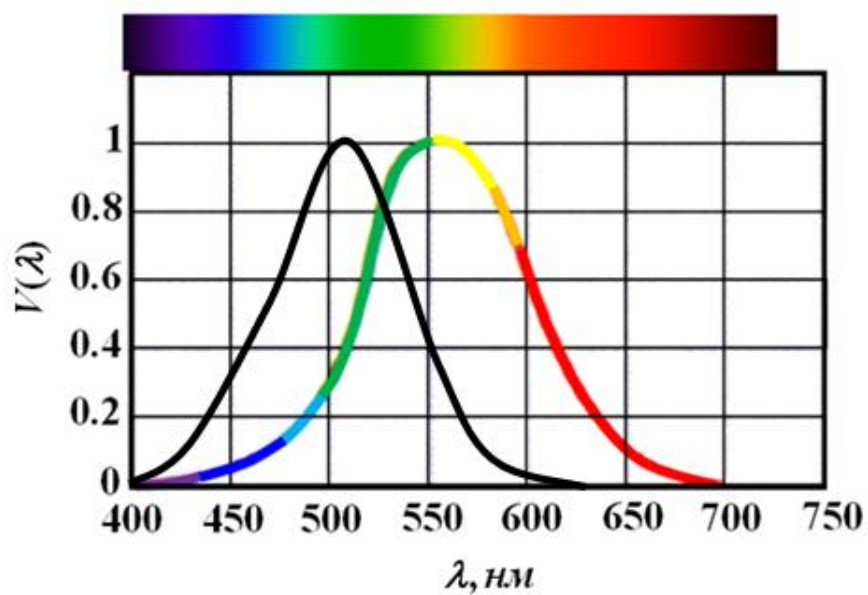


Рис. 3.8. Функція видності людського ока при добрій освітленості (кольорова лінія) та низькій освітленості (чорна лінія)

Палички сприймають всі предмети як відтінки сірого. Тому при низькій освітленості сині будуть здаватися відносно яскравими (світло-сірими), а червоні будуть чорними, практично невидимими.

Спектральна чутливість плівки подібна до чутливості колбочок. На рис. 3.9 порівнюються спектральні чутливості колбочок і плівки.

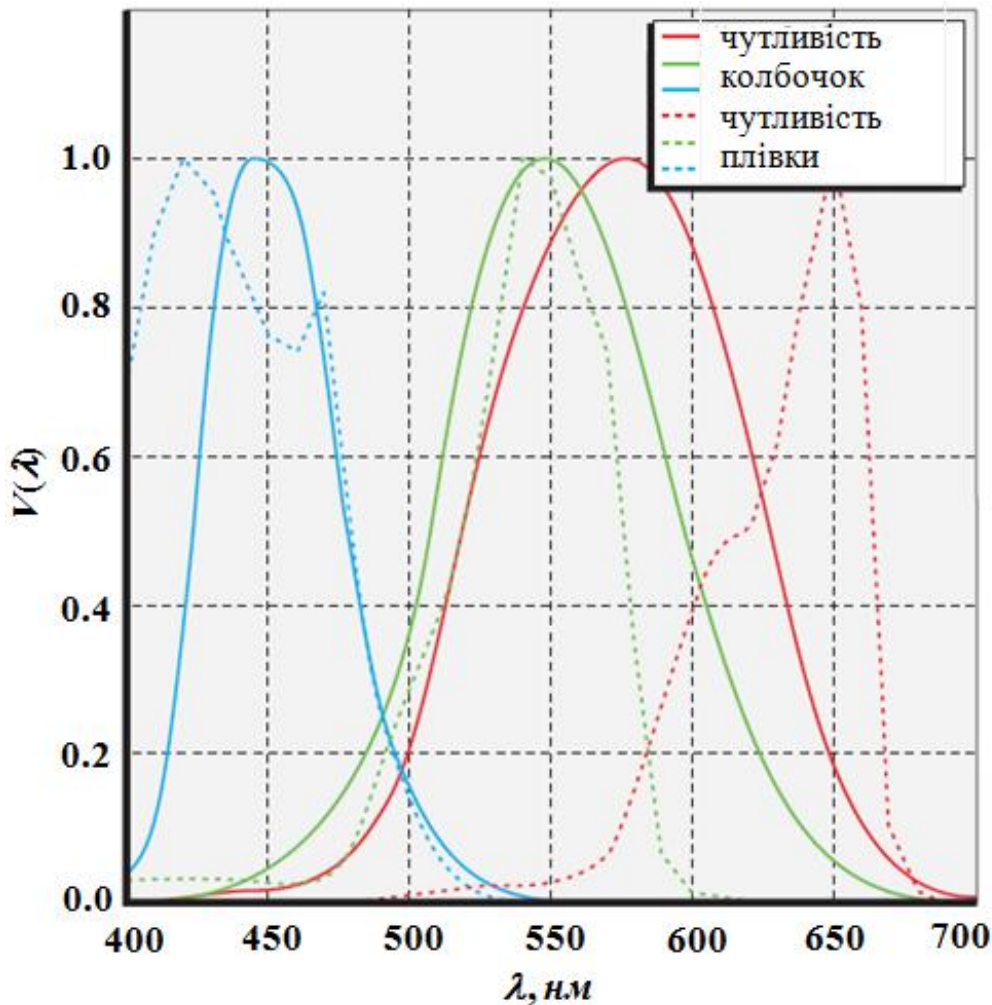


Рис. 3.9. Спектральна чутливість колбочок людини та чутливих до червоного, зеленого та синього шарів кольорової плівки

Існує низка причин відмінностей у спектральній чутливості плівки та колбочок. Велике перекриття чутливості червоного та зеленого колбочок вимагає значної обробки зображення в мозку, щоб створити відчуття почервоніння та зеленості. Плівка не здатна до такої обробки зображення. Відскановану плівку можна обробляти так само, як мозок обробляє сигнали колбочок, але обробка зображення збільшує

зернистість або шум на отриманому зображенні. Крім того, оскільки зображення зазвичай переглядаються в умовах нижчого освітлення, ніж під час фотозйомки, кольори мають бути посилені, щоб проєктовані відеозображення виглядали природними. Зміщуючи спектральну чутливість у плівці, легше хімічно чи цифрово посилити колір в отриманому зображенні плівки.

3.5. Спотворення сприйняття кольору. Хроматична аберація. Дальтонізм

Хроматична аберація

Оптичні елементи ока мають різні показники заломлення для різних довжин хвиль. Короткі хвилі (наприклад, сині) заломлюються більше, ніж довгі (червоні), тому сині та червоні зображення мають тенденцію бути сфокусованими відповідно перед сітківкою і позаду неї (рис. 3.10).

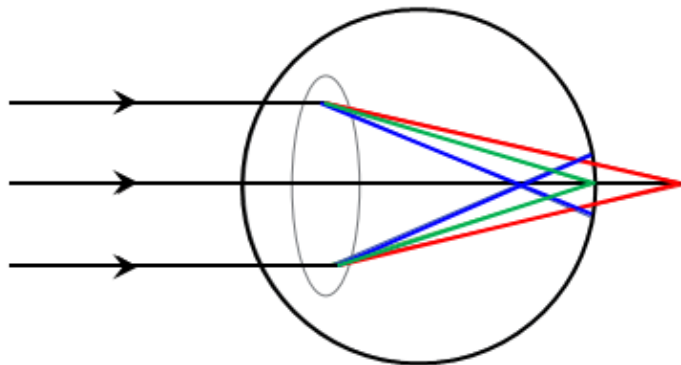


Рис. 3.10. Хроматична аберація

Коли око бачить предмет зі змінною глибиною, поздовжня хроматична аберація створює різні кольорні ефекти (наприклад, кольорові смуги) для різних відстаней до об'єктів відносно поточної відстані фокусування. Наприклад, коли око сфокусоване на білій точці, зелений колір на зображенні сітківки різкий, а червоний та синій – ні, тому навколо різкого зеленуватого центру видно фіолетову смугу. Але коли око фокусується ближче, ніж біла точка, зображення має чіткий червоний центр, оточений синьою смугою. При далекому фокусуванні ока зображення має синій центр і червону смугу.

Дальтонізм

У сукупності всі колбочки та їхня чутливість до кольору дають людині змогу розрізняти всі різні кольори, а також незначні суміші відтінків. Цей тип нормального кольорового зору відомий як *трихроматія* і ґрунтується на взаємодії діапазонів чутливості, що перекриваються, усіх трьох типів колбочок фоторецепторів. Помірний дефіцит колірного зору виникає, коли пігмент одного з трьох типів колбочок має дефект і його пік чутливості зсувається на іншу довжину хвилі, створюючи дефект зору, який називається *аномальною трихроматією*, що є одним з трьох видів дефектів кольорового зору. *Дихромація* – більш важка форма дальтонізму або дефіциту кольору, виникає, коли один із пігментів серйозно відхиляється у своїх характеристиках поглинання, або конкретний пігмент не виробляється взагалі. Повна відсутність відчуття кольору, або *монохромність*, надзвичайно рідкісне явище, але люди з повною кольоровою сліпотою (паличкові монохромати) бачать лише різний ступінь яскравості, а світ виглядає чорним, білим і відтінками сірого.

Дихромати можуть розрізняти деякі кольори. Вони менше страждають у своєму повсякденному житті, ніж монохромати, але зазвичай усвідомлюють, що мають проблеми з кольоровим зором. Дихроматію поділяють на три види: *протанопія*, *дейтеранопія* та *тританопія* (рис. 3.11). Приблизно 2 % чоловічого населення успадковують один з перших двох типів, а третій зустрічається набагато рідше.

Протанопія – це червоно-зелений дефект, що виникає внаслідок втрати чутливості до червоного, що спричиняє відсутність відчутної різниці між червоним, помаранчевим, жовтим і зеленим. Окрім того, яскравість червоного, помаранчевого та жовтого кольорів різко зменшується порівняно зі звичайним рівнем. Ефект зменшення інтенсивності може призвести до того, що червоні світлофори будуть виглядати темними (неосвітленими), а червоні відтінки загалом виглядатимуть як чорні або темно-сірі. Протанопи часто прилаштовуються правильно розрізняти червоний і зелений кольори, а також відрізняти червоний від жовтого, переважно на основі їхньої

видимої яскравості, а не на будь-якій відчутній різниці відтінків. Цим людям зелений колір зазвичай здається світлішим за червоний.

Люди з *дейтеранопією*, тобто втратою чутливості до зеленого, мають багато аналогічних проблем із розрізненням відтінків, що й протанопи, однак їм притаманний нормальний рівень чутливості у видимому спектрі. У результаті розташування зеленого світла в центрі спектра видимого світла та перекривання кривих чутливості колбочкових рецепторів існує певна реакція червоних і синіх фоторецепторів на зелені хвилі.

Тританопія – це відсутність чутливості до синього кольору, що функціонально викликає синьо-жовтий дефект кольорового зору. Фізичні особи з цим недоліком не можуть розрізняти сині та жовті кольори, але реєструють різницю між червоним і зеленим. Захворювання доволі рідкісне і зустрічається приблизно однаково в обох статей. Тританопи зазвичай не мають таких труднощів у виконанні повсякденних завдань, як люди з будь-яким з червоно-зелених варіантів дихроматичності.












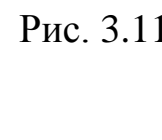
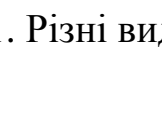
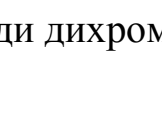
						Нормальний зір
						Протанопія
						Дейтеранопія
						Тританопія

Рис. 3.11. Різні види дихромації

3.6. Маскування та демаскування

Око людини є доволі досконалим зоровим апаратом, але і його можливості мають певні межі, за якими користуватися зором неможливо. У повсякденному житті це проявляється у тому, що один предмет ми бачимо, а інший – ні, один бачимо добре, а інший – значно гірше.

Питання видимості чи невидимості або, інакше кажучи, здатності чи нездатності нашого зору відрізнити той чи той об'єкт за певних умов має велике практичне значення. Наприклад, на залізниці чи шосейній дорозі та в морі безпека руху забезпечується за допомогою спеціальних сигналів та знаків, світлофорів, маяків та інших вказівників: що краще і даліше їх видно, то безпечніший рух транспорту. І навпаки – погана видимість сигналів і знаків, наприклад, у тумані, неодноразово були причиною аварій сухопутного, морського чи повітряного транспорту. Необхідно володіти інформацією, чим визначається добра видимість того чи того знаку, і від чого вона може погіршуватися.

Протилежна задача виникає на війні, у бойовій обстановці. Тут потрібно зберегти людей і техніку, забезпечити маскування при переміщенні військ, тощо. А для цього потрібно вміти “заховати” людей і предмети від стороннього погляду, зробити їх невидимими. Мистецтво, як забезпечити, щоб ті чи ті предмети залишалися нерозпізнаними, називається *маскуванням*. В умовах сучасної війни, з її далекобійними засобами ураження та широким використанням авіації, маскування має величезне значення не тільки на фронті, але й в тилу. Для його здійснення до складу збройних сил залучають фахівців-маскувальників, робота яких значною мірою ґрунтується на перевірених даних про око, зір та світло.

Що перешкоджає роботі зору? Які фактори, погіршуючи видимість, можуть створити умови, щоб око людини не змогло розпізнати певні предмети? Насправді, таких факторів багато.

Повсякденний досвід показує, що об'єкт видно погано (або й не видно взагалі), якщо:

- видимі (кутові) розміри об'єкта занадто малі;
- об'єкт мало виділяється на навколишньому фоні, зливається з ним;
- об'єкт розміщений у темряві і сам не світиться;
- об'єкт з'являється у полі зору спостерігача на дуже короткий час;
- світло навколишніх джерел випромінювання, наприклад, яскравих ламп, ліхтарів, прожекторів, засліплює око, пригнічує світло цього об'єкта.

Кожен з таких факторів, діючи окремо, може знизити видимість до нуля і зробити предмет нерозпізнаним. Зрозуміло, що спільний вплив двох чи декількох таких факторів погіршує видимість ще швидше. Наприклад, якщо предмет малий за кутовими розмірами і погано освітлений, то його буде набагато гірше видно, порівняно з випадками, якщо він тільки малий, або тільки темний.

Для того, щоб той чи той об'єкт став для спостерігача зовсім непомітним, потрібно достатньо погіршити його видимість. При дії кожного з перелічених вище факторів існує певна визначена міра, деяка межа, до якої предмет, хоча й погано, але все ж видимий, а за цією межею його не видно зовсім. Значення означеного фактора, що є межею між видимістю і невидимістю, називають *порогом зорового сприйняття*.

Розглянемо це поняття на прикладі, знайомому для всіх. Нехай темний предмет видимий на світлому фоні. Наприклад, буква на папері, чорна куля на сигнальній мачті, темна будова на фоні ясного неба. Будемо віддалятися від цього предмета. Видимі кутові розміри, які визначаються кутом між прямими, проведеними від нашого ока до країв предмета, будуть із відстанню L зменшуватися (рис. 3.12). Якщо справжній лінійний розмір предмета дорівнює d , то кутовий розмір визначається за формулою:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{d}{L}. \quad (3.19)$$

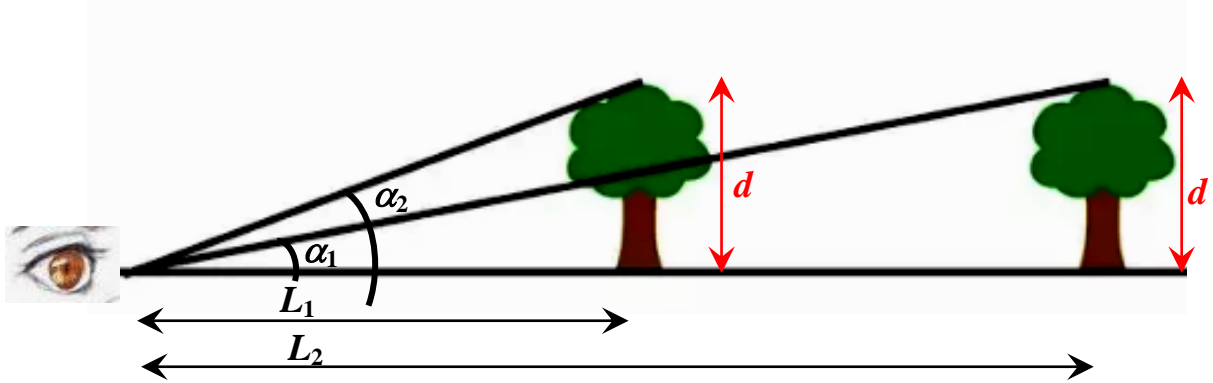


Рис. 3.12. Зміна кутового розміру предмета при зміні відстані до нього

Із зменшенням кутового розміру видимість предмета зменшується: спочатку зникають різні його деталі, потім не розрізняється форма, а далі – предмет перетворюється на точку. Продовжуючи відходити, ми досягнемо такої відстані, на якій зникне і ця точка. Кут α , починаючи з якого чорний предмет на білому фоні зовсім зникне для ока, називається *порогом кутового розміру*. Цей кут приблизно становить $1'$.

Тепер розглянемо протилежну ситуацію: білий предмет на темному фоні. Наприклад, будемо дивитися вночі на вуличний ліхтар у вигляді кулі з лампою всередині. Якщо будемо відходити від ліхтаря, то його кутові розміри зменшуватимуться. Коли кутовий розмір ліхтаря стане меншим, ніж $1'$, ліхтар не зникне, але розпізнати його форму буде неможливо. Такий ефект не пов'язаний ні з розміром ліхтаря, ні з відстанню до нього. Це зумовлено інтенсивністю світла (яскравістю). Наприклад, якщо збільшити потужність ліхтаря, то він видаватиметься більшим (і навпаки). Ці зміни пояснюються властивістю ока, яка називається *іrrадіацією*: світлі предмети здаються більшими, а темні – меншими.

Контрольні питання

1. Поясніть, яка необхідність, поряд із відомими енергетичними величинами, використовувати фотометричні.
2. Що таке сила світла?
3. У яких одиницях вимірюється сила світла?
4. Що таке світловий потік?
5. У яких одиницях вимірюється світловий потік?
6. Яка зі світлових величин сприймається візуально?
7. Яке джерело світла називають точковим та ізотропним?
8. Які фотометричні величини використовують для характеристики протяжних джерел світла?
9. Що таке освітленість?
10. У яких одиницях вимірюється освітленість?
11. Сформулюйте закони Ламберта для освітленості поверхні.
12. Що таке функція видності?
13. До якого кольору наше око є найбільш чутливим?
14. Поясніть механізм кольоросприйняття людським оком.
15. Яка відмінність між чутливістю ока при добрій освітленості та в сутінках?
16. Які є види дальтонізму?
17. Поясніть причини виникнення дальтонізму.
18. Що таке хроматична аберація?

ТЕМА 4. ЗМІШУВАННЯ КОЛЬОРІВ

- 4.1. Закони змішування кольорів.**
- 4.2. Основні характеристики кольору. Яскравість. Насиченість.**
- 4.3. Спектральне круг.**
- 4.4. Система колориметрії на основі змішування трьох кольорів.**
- 4.5. Просторове (субтрактивне) змішування кольорів.**
- 4.6. Кольорова модель змішування Мансела.**

4.1. Закони змішування кольорів

Монохроматичне випромінювання можна побачити лише в окремих випадках, наприклад, коли розглядати спектр у спектроскоп або дивитися на світло, яке випромінює лазер. Зазвичай в око людини потрапляє світловий потік змішаного складу, який містить у собі промені всіх довжин хвиль, всіх кольорів спектра. Однак ця складність спектрального складу, ця різноманітність довжин хвиль зором не констатується. Людина завжди сприймає один певний колір. У цьому і полягає істотна відмінність між зором і слухом: слухаючи складний акорд, складений із декількох нот різної висоти, можна виокремити кожен зі звуків, а досвідчений музикант точно назве всі ноти, які звучать одночасно. Зір на таке не здатний: для нього всі електромагнітні коливання видимої частини спектра завжди зливаються в єдиний колір, в якому окремі складники ніяк не розрізняються.

Суміш декількох кольорів сприймається зором як деякий новий колір. Але як саме? Розв'язок цієї задачі є важливим завданням кольорознавства. Часткова відповідь на це запитання є в Темі 2.

Як відомо, проблему змішування кольорів вирішував ще І. Ньютон. Отримавши вперше спектр і довівши цим, що світло, яке сприймається нами як біле, насправді є сумішшю всіх кольорів спектра,

вчений тим самим встановив, що при змішуванні декількох спектральних кольорів можна отримати нові кольори, такі, яких немає в спектрі. А це означає, що послідовність спектральних кольорів далеко не вичерпує всього різноманіття тих кольорових відчуттів, на які здатен зір людини. Як було наведено вище, окрім білого, в спектрі немає пурпурового, тобто червоно-синього кольору. Очевидно, що такі тони виникають при змішуванні певних спектральних кольорів. Виявляється, що коли змішувати у різних пропорціях червоний і синій колір, то буде отримано новий ряд кольорів, яких у спектрі людина не бачить. Ці проміжні кольори і будуть пурпуровими (рис. 4.1).

Дуже важливим є випадок змішування монохроматичного світла та білого. Воно дає тьмяні й бліді кольори, які ми зазвичай бачимо навколо (рис. 4.2).

Забарвлення навколишніх предметів є дуже різноманітним, але далеко не таким чистим, як у випадку кольорів спектра. Наприклад, трава, освітлена сонячним світлом, – зелена, але це далеко не той зелений колір, який ми бачимо в полі зору спектроскопа: він менш глибокий і ніби трішки сіруватий. Художник назвав би його тьмяним. Чи, наприклад, червоний колір цегли, яку ми бачимо. Це також далеко не той колір, який ми б спостерігали в спектроскоп.

Що більше до даного кольору додавати білого, то більше він буде тьмяним. То чому ж кольори предметів ми, в основному, бачимо тьмяними? Якщо послатися на матеріал Теми 2, що стосувався відбивання світла, то пригадаємо, що предмети бачимо у відбитому світлі. В ідеальному випадку вважається, що певний об'єкт, наприклад, зеленого кольору, відбиває тільки зелене світло, а для інших довжин хвиль коефіцієнт відбивання дорівнює нулю. Однак насправді коефіцієнт відбивання для інших довжин хвиль є відмінним від нуля, хоча дійсно дуже малим. Тому в дійсності зелене світло відбивається дуже добре, а світло інших кольорів – дещо менше.

Таким чином, в око людини потрапляє у незначній кількості суміш всіх кольорів (тобто біле світло) та в більшій кількості – зелене. В результаті ми спостерігаємо тьмяний зелений колір об'єкта.

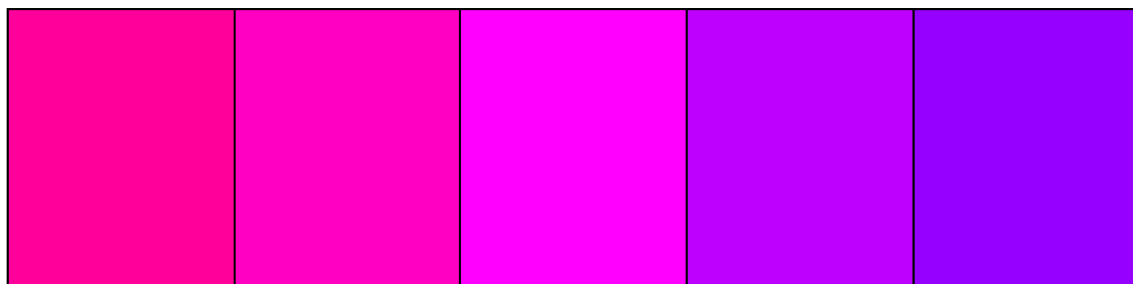


Рис. 4.1. Суміш червоного та синього кольорів у різних пропорціях (відтінки пурпурового кольору)

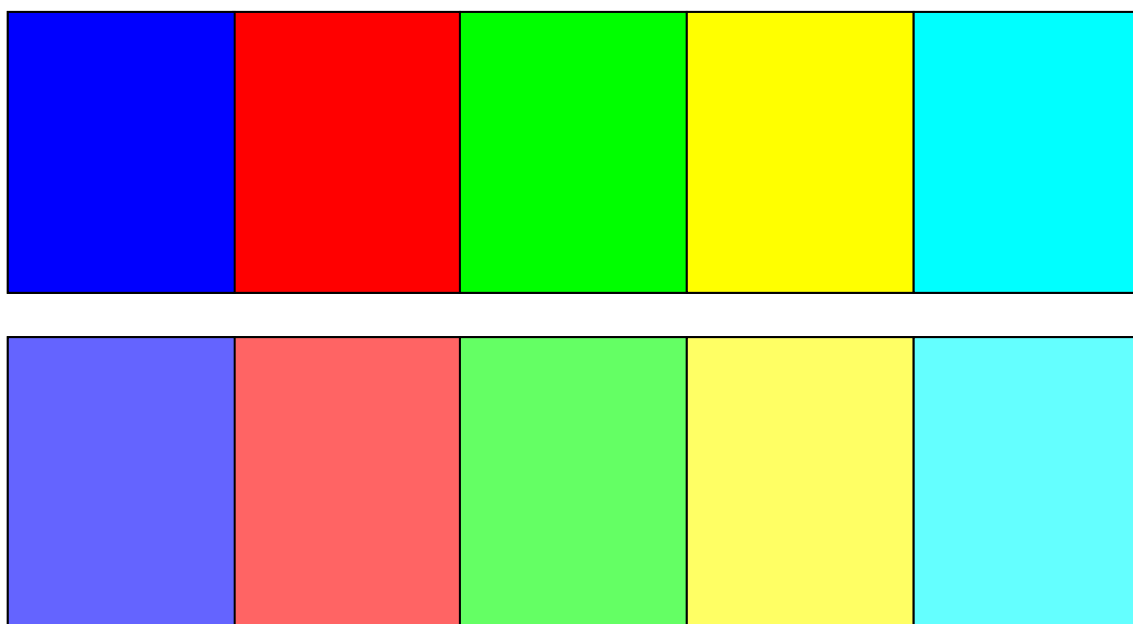


Рис. 4.2. Деякі монохроматичні кольори спектра (верхній ряд) та їх суміш з білим кольором (нижній ряд)

Таким чином, змішуючи біле світло з монохроматичним у різних пропорціях, можна отримати цілу низку його відтінків: від білого, через ледь забарвлений, до чистого спектрального кольору (рис. 4.3). На рис. 4.3 відображено ряд відтінків синього кольору, які отримують у результаті додавання до синього кольору білого. Крайній справа – чистий спектральний колір.

Розглянемо види змішування кольорів та їх особливості.

Оптичне (адитивне) змішування кольорів полягає у змішуванні променів різних кольорів і найчастіше застосовується в області оптичних процесів (для формування кольорового зображення на

моніторі комп'ютера, екрані телевізора, дисплеї гаджета). Це і є змішування, про яке йшла мова до цього часу.

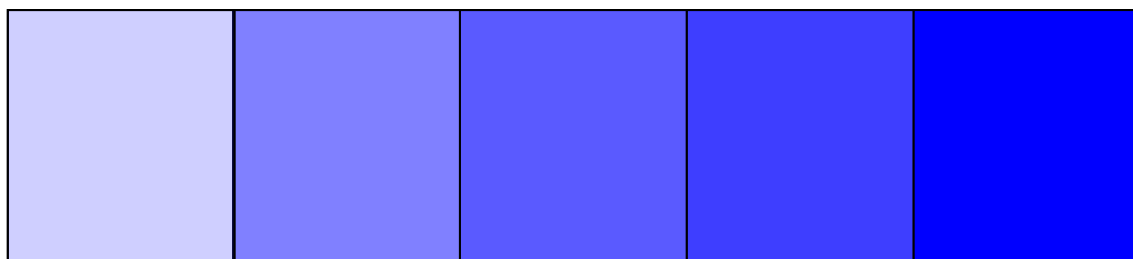


Рис. 4.3. Результат змішування білого та синього кольорів у різних пропорціях

Цей спосіб, як ми вже знаємо, має дещо іншу структуру основних кольорів: **червоний**, **синій**, **зелений**. З їх допомогою можна синтезувати практично всі відтінки видимого спектра. Таке змішування (*оптичне*) відбувається тільки на сітківці нашого ока.

Просторове (субтрактивне) змішування кольорів відбувається за рахунок ефекту, що виникає за дуже близького розміщення фарб, що призводить до їх зливання в один сумарний колір. Суть цього методу ґрунтується на тому, що частина променів світла поглинається, а частина відбивається при потраплянні на поверхню предмета. У результаті різні кольори, які близько розташовуються один до одного, будуть сприйматися людським оком як інший, проміжний між ними, колір.

Механічне змішування – це змішування фарб на папері чи палітрі для утворення потрібного кольору або відтінку. У цьому випадку основними кольорами є **червоний**, **жовтий** та **синій**.

4.2. Основні характеристики кольору. Яскравість. Насиченість. Колірний тон

Місце відтінку в цьому ряду можна визначити кількісною величиною, яку називають *насиченістю* або *чистотою кольору*. *Насиченість* виражає частку чистого спектрального кольору в певному відтінку. Насиченість часто називають *інтенсивністю кольору*.

Нехай видимий світловий потік монохроматичного світла з довжиною хвилі λ дорівнює Φ_λ , а потік білого світла – Φ_σ . Суміш таких променів дасть потік: $\Phi = \Phi_\lambda + \Phi_\sigma$. Тоді *насиченість кольору* p визначається як відношення потоку монохроматичного світла до повного потоку:

$$p = \frac{\Phi_\lambda}{\Phi_\lambda + \Phi_\sigma}. \quad (4.1)$$

Очевидно, що для чистого спектрального кольору насиченість дорівнює одиниці (світло монохроматичне), а для чистого білого світла – нулю. Для природних кольорів насиченість буде правильним дробом. Що більша насиченість кольору, то ближче значення p до одиниці, інтенсивніше, різкіше спостерігається забарвлення. Тому для таких об'єктів, як сигнальні прапорці, вогні світлофора тощо, намагаються вибрати фарби з максимальною насиченістю.

На рис. 4.3 показана різна ступінь насиченості синього кольору: від невеликого значення p до одиниці.

Таким чином, будь-який колір (окрім пурпурового) може бути отриманий шляхом змішування спектрального кольору з білим світлом. Це дає підставу будь-який колір визначати двома числами. Перше з них – це *колірний тон*, який визначається довжиною хвилі λ того спектрального кольору, який потрібно взяти для отримання суміші. Друге – колориметрична чистота (або *насиченість* p).

Наприклад блідо-рожевий колір – це червоний колір з невеликою насиченістю і в числовому вираженні може бути записаний так:

$$\lambda = 650 \text{ нм}; p = 0.1.$$

Ще одна характеристика кольору – *яскравість*. *Яскравість* – це величина, яка визначає відсоток світла, відбитого від поверхні, яка має даний колір, порівняно з білою поверхнею. Яскравість приймає значення від нуля (для чорної поверхні) до 100 (для білої поверхні). Найбільшу яскравість має жовтий колір, а найменшу – синій. Проміжні значення за яскравістю відповідають червоному та зеленому кольорам. Яскравість кольору може змінюватися при зміні джерела світла, яке

освітлює дану кольорову поверхню, при зміні напрямку освітлення чи відстані від джерела світла.

Зменшення яскравості синього кольору призводить до його поступового наближення до чорного (рис. 4.4).

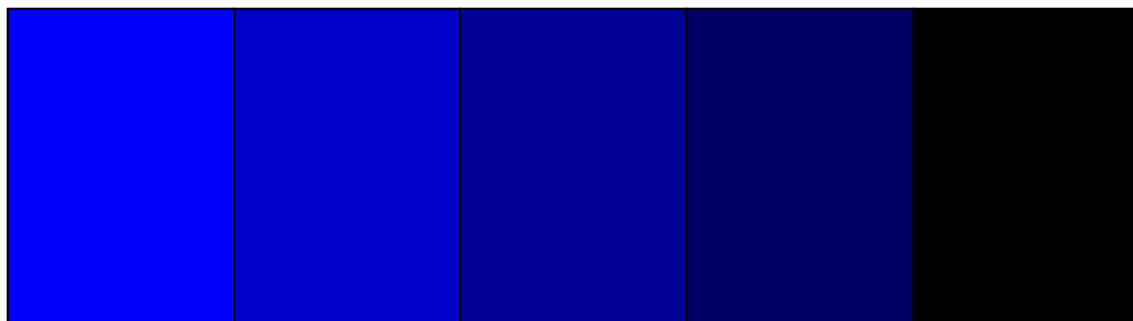


Рис. 4.4. Зменшення яскравості синього кольору

4.3. Спектральний круг

Кольоровий круг Ньютона є зручним способом узагальнення властивостей адитивного змішування кольорів (рис. 4.5). Червоний, зелений та синій вважаються основними, а їхні додаткові кольори (блакитний, пурпуровий та жовтий) розташовані навпроти них у крузі. Спектральні кольори розташовують по колу, відповідно до довжини хвилі (від фіолетового до червоного), проти годинникової стрілки). Пурпуровий не є спектральним кольором, позаяк він не виникає при розкладі білого світла в спектр. Але відомо, пурпуровий колір виникає при синтезі червоного та синього світла, що є на протилежних кінцях спектра. Таким чином, розташувавши по колу кольори спектра, за допомогою пурпурового світла замикають спектральний круг.

Уздовж радіуса круга відкладають насиченість кольору: нуль (біле світло) – в центрі круга, одиниця – монохроматичне світло, колір якого відповідає зовнішньому радіусу. Отже, як бачимо, насиченість збільшується від центру круга.

Таким чином, координати (p, λ) в спектральному крузі приймають вигляд полярних координат з полюсом (початком координат) у центрі.

Величина p дає відстань від центру, а λ – визначає напрям (але не в кутовій мірі, а у вигляді довжини хвилі).

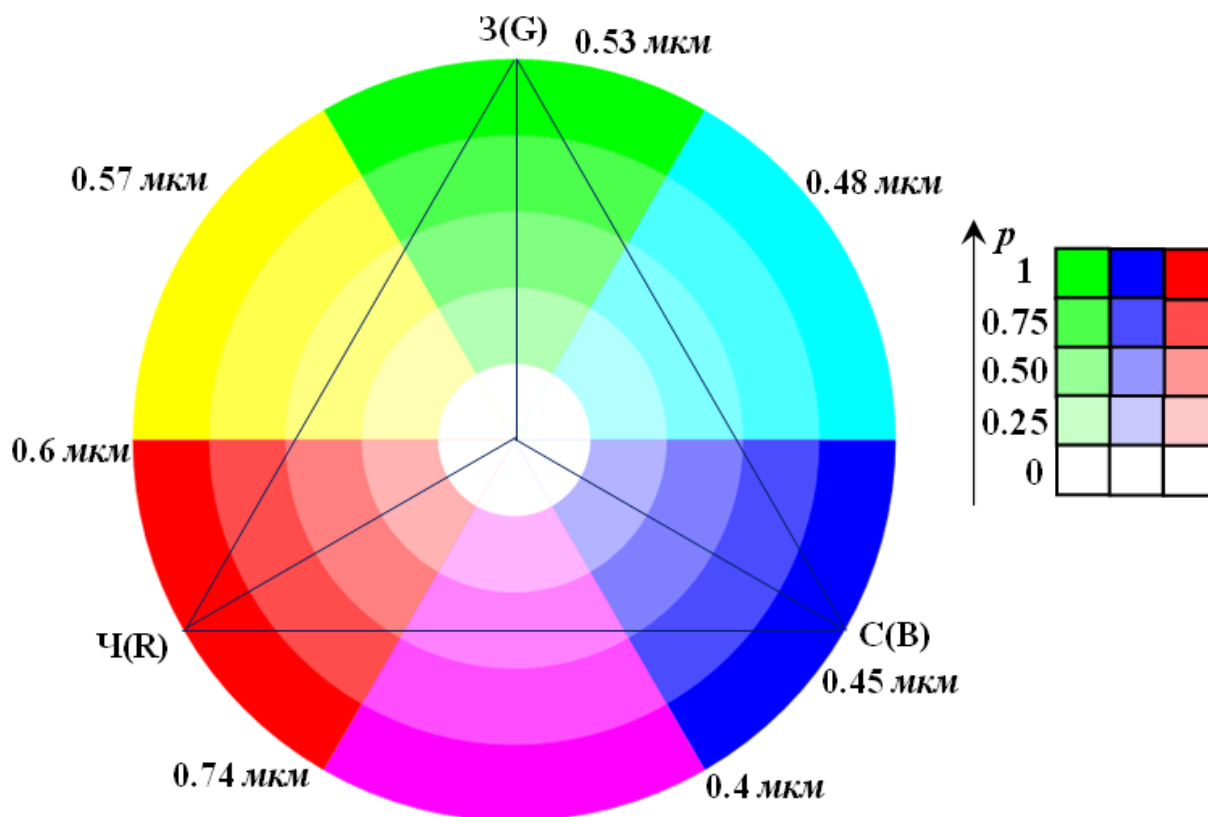


Рис. 4.5. Спектральний круг Ньютона (6 кольорів)

Кольори, які лежать навпроти один одного в крузі, є взаємодоповнювальними і при їх синтезі виникає біле світло. Зрозуміло, що їх потрібно брати у відповідних пропорціях, які визначаються яскравістю того чи того кольору.

Як будують такий круг?

Спочатку будуюмо “велике” коло радіусом 1. Далі – рівносторонній трикутник ЧЗС (RGB), вершини якого відповідають трьом основним кольорам. Після цього будуюмо три сектори від центру кола, які спираються на дугу зовнішнього кола з градусною мірою 60° . Середина дуги повинна збігатися з точками Ч, З, С (R, G, B). Так утворився круг, розділений на шість однакових секторів. Сектори, які

лежать навпроти відповідного сектора головного кольору, є вторинними, доповнювальними до білого.

Тепер ми можемо узагальнити закони змішування кольорів, які розглянули на початку цієї лекції.

Закони змішування кольорів:

- 1. Для кожного спектрального кольору можна підібрати такий колір, у суміші з яким він дає білий. Такі кольори називають взаємодоповнювальними.*
- 2. Суміш двох кольорів, які в спектральному крузі відстають один від одного менше, ніж на 180° , дає новий колір, який лежить в крузі між змішуваними кольорами. Так, суміш червоного і жовтого дає помаранчевий (рис. 4.6).*



Рис. 4.6. Спектральний круг Ньютона (12 кольорів)

4.4. Система колориметрії на основі змішування трьох кольорів

Ми встановили, що будь-який колір можна отримати шляхом змішування певного спектрального кольору з білим, а білий, зі свого боку, – як суміш двох доповнювальних. З цього випливає, що будь-який колір можна отримати, змішуючи три спектральні кольори. Експериментальні дослідження повністю це підтверджують. Тільки потрібно вибирати три кольори так, щоб два з них при змішуванні не могли дати третій. Наприклад, зручну комбінацію складають червоний, зелений та синій. Змішуючи їх у різних пропорціях, можна отримувати найрізноманітніші інші кольори різної насиченості, зокрема й білий.

Прийmemo за основні кольори червоний, синій та зелений з довжинами хвиль, приведеними у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Колір	λ , нм	Умовне позначення	Відносна величина світлового потоку, яка відповідає одиниці кольору
Червоний	700	R	1,00
Зелений	546,1	G	4,59
Синій	435,8	B	0,06

Нехай на одне поле фотометра падає монохроматичне світло із світловим потоком Φ люменів. Спрямуємо на друге поле фотометра три світлових монохроматичних потоки з довжинами хвиль, вказаними в таблиці 4.1. Так ми завжди зможемо підібрати такі величини Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 (також у люменах), щоб яскравість та колір для зору були повністю однаковими. Можна записати формулу:

$$\Phi_1 \equiv \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3, \quad (4.2)$$

де “три лінії” замість “дорівнює” означають рівність не тільки за інтенсивністю, але й за кольором.

Для того, щоб виразити власне колірність світлового потоку, яку ми раніше представляли двома параметрами λ та p , зовсім не потрібно задавати змішувані потоки в люменах чи інших абсолютних одиницях. Колір повністю визначається відносним розподілом енергії по спектру. Тому для того, щоб визначити колір, достатньо вказати, яку частку складає кожен з потоків Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 в їхній загальній сумі, тобто вказати величини:

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3}, \quad \frac{\Phi_2}{\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3}, \quad \frac{\Phi_3}{\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3}. \quad (4.3)$$

Однак такі величини на практиці не дуже зручні. Виявляється, що рівні потоки різного кольору здійснюють зовсім неоднаковий вплив на колір суміші. Наприклад, значна домішка зеленого впливає значно менше, ніж мізерна кількість синього чи фіолетового (див. таблицю 4.1). Тому якщо змішати червоний, зелений і синій потоки у фотометрично рівних кількостях (наприклад по 1 люмену), то суміш буде далеко не білою, а синьою. І взагалі, всі суміші світла, в яких синій потік за інтенсивністю є одного порядку з червоним та зеленим, будуть мати різні відтінки синього кольору. Щоб отримувати інші кольори, потрібно додавати до суміші синій потік у дуже незначних дозах. Наприклад, щоб отримати білий колір, потрібно взяти червоний потік у кількості одного люмена, зелений – 4,6 люмена і додати синього у кількості всього 0,06 люмена.

Для того, щоб уникнути таких незручних співвідношень та визначати кольори арифметично просто й наочно, домовилися виражати змішувані потоки не в люменах, а особливих для кожного кольору одиницях, які називають *одиничними кольорами* або *одиничними стимулами*. Вони обираються такими, щоб при їхньому додаванні в однакових кількостях, отримувався білий колір. Звідси випливає, що коли за одиницю червоного стимулу R прийняти потік 1 люмен червоного світла з довжиною хвилі 700 нм, то за одиницю зеленого стимулу G потрібно прийняти потік 4,6 люмена з довжиною хвилі 546,1 нм, а за одиницю синього стимулу B – потік 0,06 люмена з довжиною хвилі 453,8 нм.

Нехай для отримання кольору F' потрібно взяти r' таких нових одиниць кольору R , g' одиниць кольору G та b' одиниць кольору B . Це можна записати у вигляді рівності:

$$F' = r'R + g'G + b'B.$$

Оскільки колір залежить тільки від відносної кількості компонентів, а не від абсолютних величин, то можна замінити числа r' , g' , b' їх відносними частками в суміші, які позначимо r , g , b :

$$r = \frac{r'}{r' + g' + b'}, \quad g = \frac{g'}{r' + g' + b'}, \quad b = \frac{b'}{r' + g' + b'}. \quad (4.4)$$

Очевидно, що має виконуватися умова:

$$r + g + b = 1. \quad (4.5)$$

Числа r , g , b , які виражають частки червоного, зеленого та синього одиничних кольорів суміші, називаються триколірними коефіцієнтами. Вони використовуються для опису кольору в триколірній системі.

Тоді будь-який колір F , який містить r часток одиничного основного кольору R , g часток кольору G та b часток кольору B , можна записати у вигляді *колірного рівняння*:

$$F = rR + gG + bB. \quad (4.6)$$

Тоді білий колір визначатиметься співвідношенням:

$$F_{\text{б}} = 1/3R + 1/3G + 1/3B. \quad (4.7)$$

Триколірна система може бути наочно продемонстрована у вигляді колірного трикутника (рис. 4.7). У вершинах цього рівностороннього трикутника розташовуються основні кольори R , G , B , а в центрі – білий. Кольори, які отримують в результаті змішування двох кольорів, розташовуються вздовж сторони трикутника. Будь-який колір, який утворюється у результаті поєднання трьох кольорів відображається точкою, розміщеною в середині трикутника. Зображення цієї точки визначається тим, що вона є центром тяжіння трикутника, у вершинах якого розташовані вантажі, вага яких пропорційна числам r , g , b .

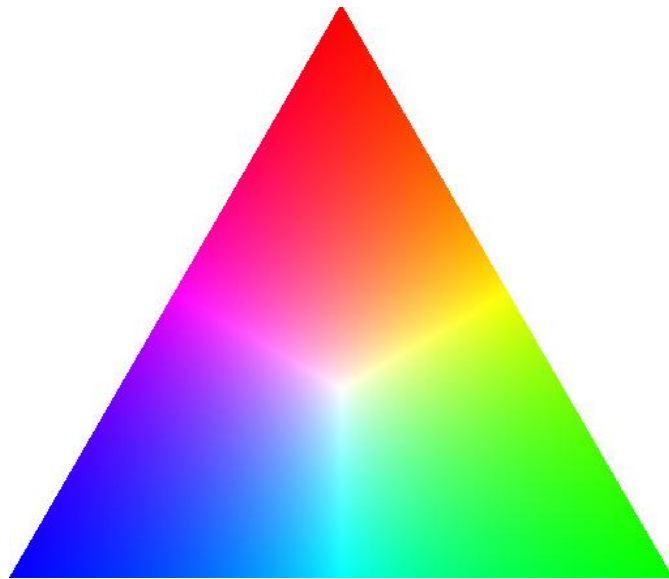
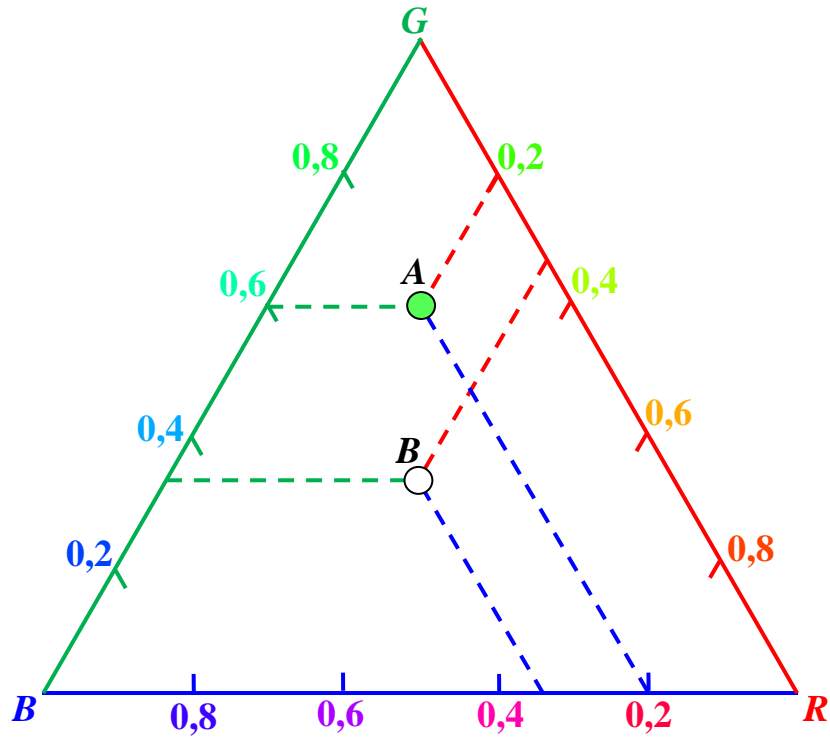


Рис. 4.7. Колірний трикутник

Практичне нанесення точки виконується відповідно до такого правила. Нехай сторони трикутника дорівнюють одиниці. На стороні GR від точки G в бік R відкладаємо відрізок, який дорівнює r , і через його кінець проводимо всередині трикутника пряму, паралельну стороні GB . Аналогічно на стороні RB від R до B відкладаємо відрізок, який

дорівнює b , і через його кінець проводимо всередині трикутника пряму, паралельну до RG . Нарешті, на стороні BG від точки B відкладаємо відрізок завдовжки g , і через його кінець проводимо пряму, паралельну до RB . Всі три прямі перетинаються в точці, яка і визначає місце цього кольору на діаграмі.

Як приклад розглянуто нанесення точок $A(r = 0,2; g = 0,6; b = 0,2)$ та $B(r = 1/3; g = 1/3; b = 1/3)$ (рис. 4.7).

Така модель представлення та змішування кольорів вперше була запропонована Дж. Максвелом. Тому її ще часто називають моделлю Максвела, а відповідний трикутник кольорів – трикутником Максвела.

Але чи всі спектральні кольори розміщуються всередині колірної трикутника?

Для того, щоб відповісти на це запитання, побудуємо поряд з колірним трикутником криву, на якій розташовуються чисті спектральні кольори (рис. 4.8).

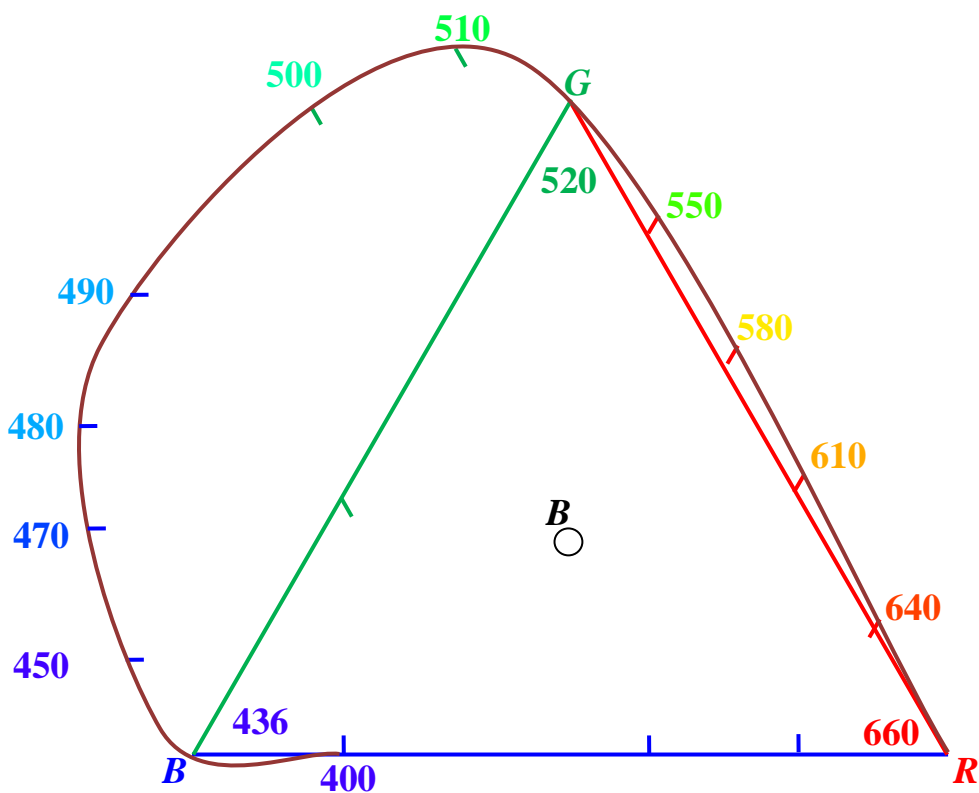


Рис. 4.8. Розташування області реальних кольорів відносно колірної трикутника

Зрозуміло, що ця крива проходить через вершини трикутника, оскільки синій, червоний та зелений кольори також є спектральними.

На ділянці від 700 нм до 520 нм крива практично збігається із стороною *RG*. Звідси випливає, що в довгохвильовій частині спектра змішування кольорів дає проміжний також спектральний колір, а стосовно короткохвильової частини, то спектральні кольори лежать за межами трикутника. Це означає, що їх не можна отримати, змішуючи основні кольори. Але виразити формулою (4.6) їх можна. Для цього доведеться брати деякі з чисел (*r*, *g*, *b*) від'ємними.

Для того, щоб усунути такі недоліки, потрібно замість трикутника *RGB* використати інший трикутник, побудований так, щоб вся область реально наявних кольорів лежала всередині нього. Для цього вершини трикутника доведеться винести за межі реальних кольорів. Інакше кажучи, замість реальних основних кольорів *RGB* потрібно взяти деякі уявні, неіснуючі насправді кольори або “стимули”, які мають значно більшу насиченість, ніж кольори спектра. Може видатися, що система таких уявних кольорів на практиці буде непридатна, однак практика вимагала їхнього введення, оскільки це значно спростило розрахунки кольору.

Такі кольори прийнято позначати буквами *X*, *Y*, *Z*. Колір *X* можна назвати ультрачервоним, *Y* – ультразеленим та *Z* – ультрасинім. Їхні відносні кількості, необхідні для отримання даного кольору *C*, прийнято позначати малими літерами *x*, *y*, *z*.

За таких позначень формулу (4.6) можна переписати у вигляді:

$$C = xX + yY + zZ. \quad (4.8)$$

Звичайно, тут також буде виконуватися співвідношення:

$$x + y + z = 1.$$

На рис. 4.9 зображено колірний трикутник та криву спектральних кольорів у системі уявних кольорів *X*, *Y*, *Z*. Як бачимо, уявний трикутник містить усі спектральні кольори і порівняно з трикутником *RGB* містить значно більше кольорів, особливо в області зеленого та зелено-синього світла.

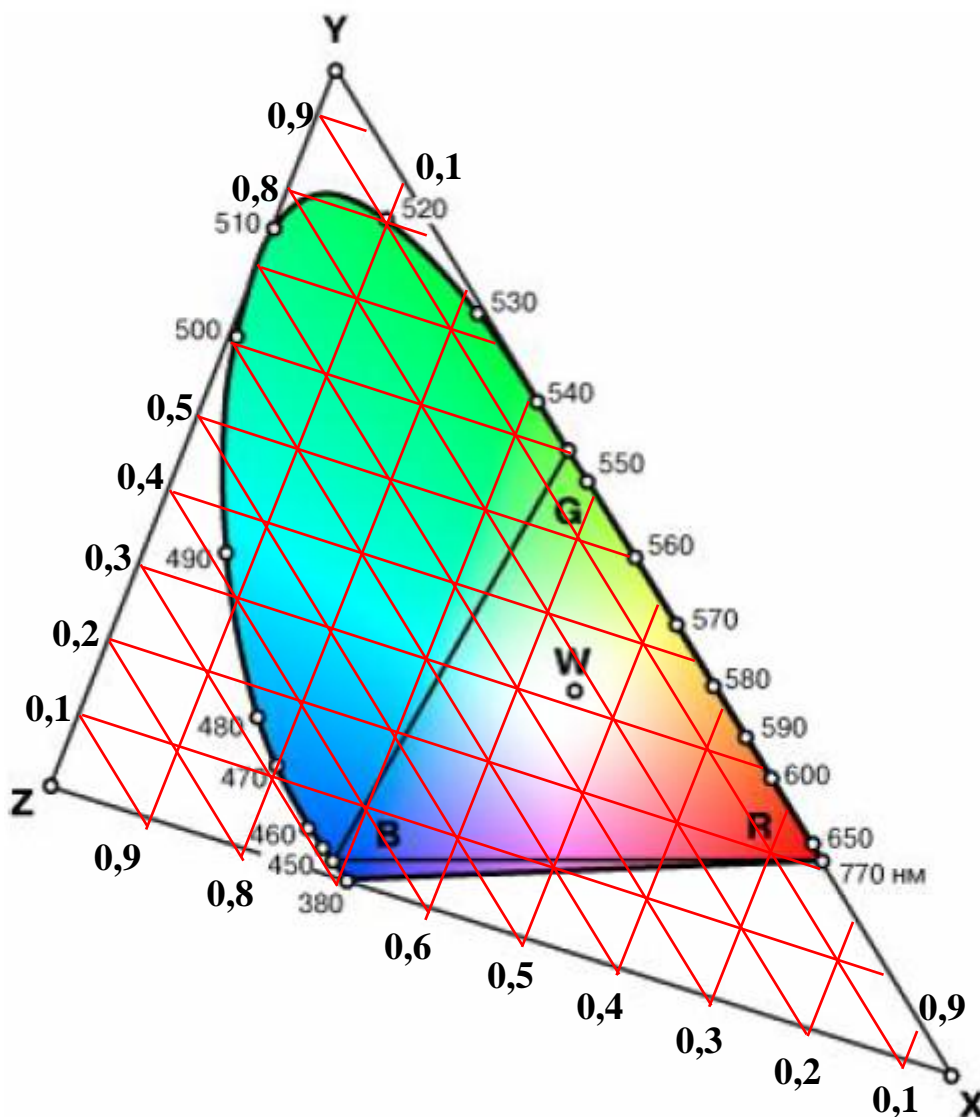


Рис. 4.9. Колірний трикутник та крива спектральних кольорів у системі уявних кольорів X, Y, Z

Координати точки певного кольору визначаються трьома числами (x, y, z) , які відкладаються на відповідних сторонах трикутника XYZ . Положення точки знаходиться аналогічно, як і в трикутнику RGB . Для полегшення роботи на трикутник нанесена сітка. В принципі, для визначення точки достатньо двох координат, оскільки третя визначається із співвідношення:

$$z = 1 - (x + y).$$

4.5. Просторове (субтрактивне) змішування кольорів

Дотепер, коли ми говорили про змішування кольорів, то мова йшла про оптичне змішування (його ще називають *адитивним*). Суть оптичного змішування полягає в тому, що кожна довжина хвилі *додає* певний колір, а змішування відбувається на сітківці ока. Така система змішування використовується в телебаченні, комп'ютерній техніці, різноманітних гаджетах, світловій рекламі і т.д. для отримання кольорового зображення.

Тепер розглянемо детальніше інший спосіб, який полягає у механічному змішуванні кольорів, – *субтрактивне змішування*. Цей спосіб, навпаки, полягає у *відніманні* кольорів. Мова йде про механічне змішування фарб. Та чи та фарба віднімає в білого певний колір.

При такому змішуванні основними кольорами є жовтий, блакитний та пурпуровий (рис. 4.10).

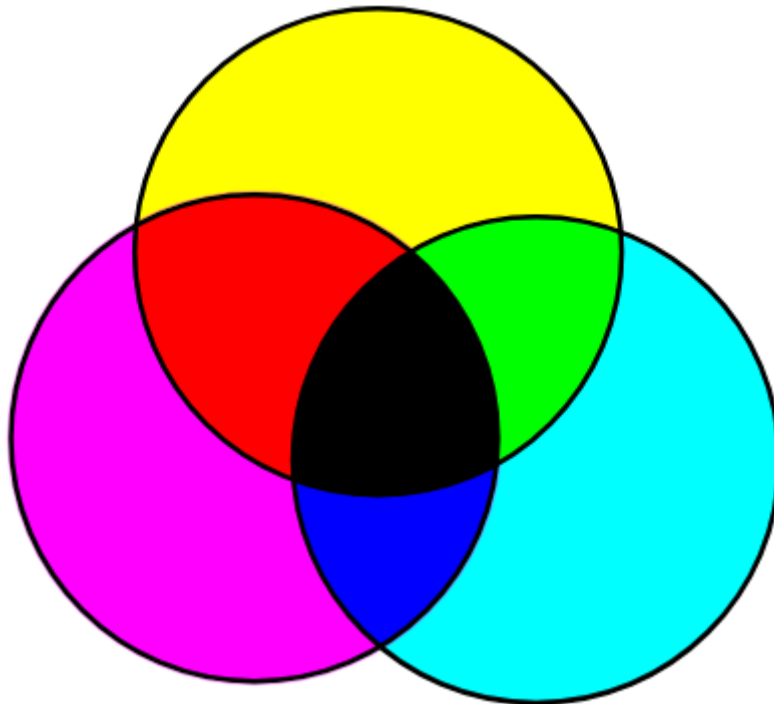


Рис. 4.10. Основні та вторинні кольори при субтрактивному змішуванні

Жовтий колір віднімає в білого синій колір:

$$\text{Жовтий} = \text{Білий} - \text{Синій}$$

Пурпуровий віднімає від білого зелений колір:

$$\text{Пурпуровий} = \text{Білий} - \text{Зелений}$$

Блакитний віднімає від білого червоний колір:

$$\text{Блакитний} = \text{Білий} - \text{Червоний}$$

Накладання двох фарб основного кольору дає вторинний колір (рис. 4.10): червоний, синій та зелений.

Накладання трьох основних кольорів при механічному змішуванні віднімає від білого всі три основні кольори оптичного змішування, тому в результаті отримуємо чорний.

Як зрозуміти суть механічного змішування? Припустимо, що ми наносимо на білу поверхню, яка відбиває всі кольори, фарбу певного кольору. Нехай це буде жовта. Пригадаємо, що жовте світло – це суміш зеленого та червоного, тобто жовта поверхня має здатність відбивати червоне та зелене світло, а синє – повністю поглинає. Тому й говорять, що жовтий колір віднімає від білого синій колір. Якщо ми змішаємо жовту та блакитну фарбу, то в результаті поглинатися буде і синє (поглинає жовтий колір), і червоне світло (поглинає блакитний колір). Тому отримуємо зелений колір. При змішуванні фарб трьох кольорів – жовтого, пурпурового та блакитного, віднімаються, відповідно, синій, зелений та червоний колір. Це означає, що в наше око світло не потраплятиме, і таку поверхню ми будемо бачити чорною.

4.6. Кольорова модель змішування Мансела

У колориметрії колірна система Мансела – це колірний простір, який визначає кольори на основі трьох вимірів кольору: *кольоровий тон, кількість світла (світлота) і насиченість (чистота кольору)*. Вона була створена Альбертом Манселом у першому десятилітті ХХ століття та прийнята Міністерством сільського господарства США як офіційна система кольорів для дослідження ґрунтів у 1930-х роках. Система складається з трьох незалежних вимірів, які можна

представити циліндрично у трьох вимірах у вигляді суцільного тіла неправильного кольору (рис. 4.11): *кольоровий тон* (*Hue* на рис. 4.11), виміряний у градусах навколо горизонтальних кіл; *насиченість* (*Chroma*), виміряна радіально назовні від нейтральної (сірої) вертикальної осі, та *кількість світла* (*світлота*, *Value*), виміряна вздовж вертикалі від 0 (чорний) до 10 (білий).

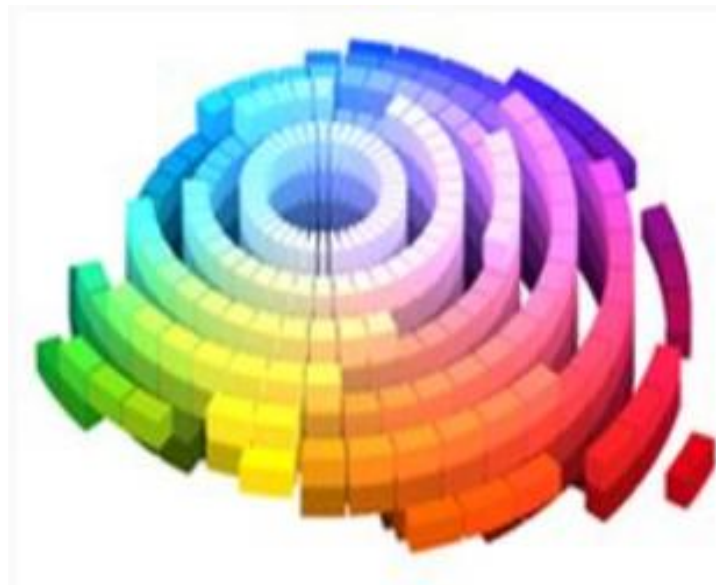
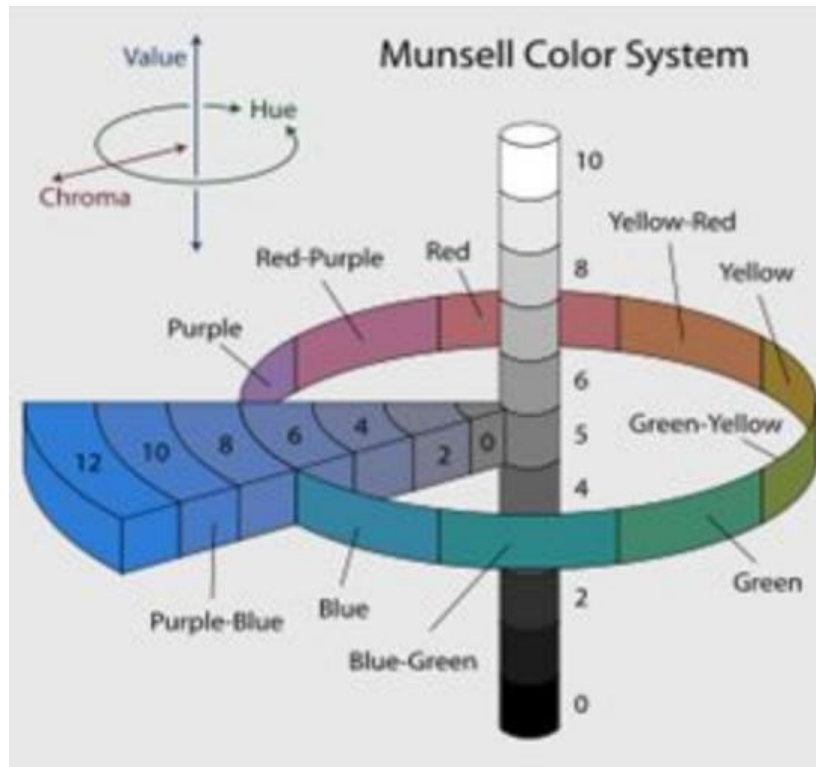


Рис. 4.11. Модель змішування кольорів Мансела

<http://ecoursesonline.iasri.res.in/mod/page/view.php?id=1022>

Кожне горизонтальне коло поділене на п'ять основних тонів: червоний, жовтий, зелений, синій і фіолетовий, разом із п'ятьма проміжними відтінками, розташованими посередині між сусідніми основними тонами. Коло розбивають на 100 відтінків, кожному з яких присвоюється ціле значення. На практиці кольорові діаграми зазвичай визначають 40 відтінків з кроком 2,5, прогресуючи, наприклад, від 10R до 2,5YR. Два кольори однакової кількості світла та насиченості, які розташовані на протилежних сторонах кола тонів, є доповнювальними один одного та при змішуванні утворюють нейтральний сірий колір тієї ж світлоти.

Кількість світла або *світлота* змінюється уздовж прямої: від значення 0 внизу, якому відповідає чорний колір, до значення 10 вгорі, якому відповідає білий колір. Нейтральні сірі розташовуються по цій лінії між чорним та білим кольорами.

Якщо виміряти радіально від центру кожного зрізу *насиченості* (*колірності*), то так можна представити “чистоту” кольорів. При цьому менш чистою буде менша кольоровість. Різним областям колірного простору відповідають різні максимальні координати кольоровості. Зокрема, світло-жовті кольори мають значно більший потенціал кольоровості, ніж світло-фіолетові, що пов'язано з природою ока та фізикою колірних подразників.

Контрольні питання

1. Назвіть основні види змішування кольорів.
2. Що таке адитивне змішування?
3. Що таке субтрактивне змішування кольорів?
4. Дайте фізичне пояснення відніманню кольорів при механічному змішуванні.
5. Чим оптичне змішування відрізняється від змішування барвників?
6. Де використовують оптичне змішування кольорів?
7. Де використовують субтрактивне змішування кольорів?
8. Які кольори є основними при механічному змішуванні?
9. Які кольори є вторинними при механічному змішуванні?

-
10. Який колір отримують при змішуванні жовтого та блакитного барвників?
 11. Який колір отримують при змішуванні пурпурового та блакитного барвників?
 12. Який колір отримують при змішуванні жовтого та пурпурового барвників?
 13. Який колір отримують при змішуванні жовтого, блакитного та пурпурового барвників?
 14. Назвіть основні характеристики кольору.
 15. Що таке насиченість кольору?
 16. Що таке яскравість кольору?
 17. Поясніть, як будують колірний круг.
 18. Що таке колірний трикутник?
 19. Як визначається положення кольору в колірному трикутнику?
 20. Які недоліки колірного трикутника?
 21. У чому полягає суть моделі Мансела?
 22. Запишіть колірне рівняння в загальному вигляді.
 23. Запишіть колірне рівняння для жовтого кольору.
 24. Запишіть колірне рівняння для білого кольору.
 25. Запишіть колірне рівняння для червоного кольору.
 26. Чи однаковий ефект кольору викликають світлові потоки 5 люменів червоного та синього світла?

ТЕМА 5. ЯСКРАВІСТЬ І КОЛІР РОЗЖАРЕНИХ ПРЕДМЕТІВ

- 5.1. Теплове випромінювання.**
- 5.2. Закони випромінювання чорного тіла.**
- 5.3. Яскравість світіння за різної температури.**
- 5.4. Температура і колір.**
- 5.5. Пірометри.**
- 5.6. Спектральний склад світла різних джерел.**

5.1. Теплове випромінювання

Дотепер ми вивчали теорію світлових променів і їх впливу на орган зору око. Розглянемо проблему виникнення променистої енергії в природі та її штучного отримання в техніці.

Виникнення електромагнітних хвиль у будь-якому середовищі завжди є наслідком коливань чи переміщень електричних зарядів. Якщо будь-яке тіло випромінює промені, то це означає, що в ньому відбуваються коливання, прискорення чи гальмування електронів або йонів. Наприклад, радіохвилі випромінюються антеною передавальної радіостанції, тому що через її провідник (контур) пропускається змінний електричний струм з певним періодом коливань, що й створює коливання електронів саме з таким періодом.

Електромагнітне випромінювання, переміщуючись у просторі, переміщує і енергію, яку випромінює тіло. Для забезпечення стійкості в часі випромінювання, потрібно забезпечувати поповнення втраченої енергії. Природа електромагнітного випромінювання визначається видом джерел енергії, які створюють випромінювання.

Теплове випромінювання є електромагнітним. Воно спричинене тепловим рухом молекул речовин, у якому енергія теплового руху перетворюється на енергію електромагнітного випромінювання.

Здатність світитися набувається тілами, нагрітими до високої температури. Наприклад, розжарені до білого жару рідкі або тверді тіла випромінюватимуть біле світло із суцільним спектром частот. Зі зменшенням температури тіла зменшуватиметься інтенсивність випромінювання та змінюватиметься його спектральний склад. У ньому дедалі більше переважатимуть довгі хвилі. Якщо і далі понижувати температуру тіла, воно взагалі не випромінюватиме видимого світла, а буде випромінювати тільки інфрачервоні промені, що є невидимими для людського ока.

Теплове випромінювання виникає при будь якій температурі, відмінній від абсолютного нуля. Якщо температура тіла не дуже висока, наприклад, відповідає звичайній кімнатній температурі, то випромінювання різноманітних предметів буде обмежене далекою інфрачервоною областю спектра. І стіл, і олівець в руці, і навіть сніг взимку, і наше власне тіло, – все це випромінює промені, невидимі для нашого ока: для того, щоб їх виявити, потрібно взяти прилад, який здатний реагувати на електромагнітні хвилі з великою довжиною хвилі, наприклад, термоелемент. І тільки за достатньо високої температури, приблизно 1000°C , до невидимих теплових (інфрачервоних) променів долучаються також промені видимої частини спектра, за рахунок яких і світиться розігріте тіло.

Явище випромінювання світла за рахунок тепла відоме людству з давніх часів, оскільки з життєвого досвіду ми знаємо, що будь-яка речовина, нагріта до достатньо високої температури, починає світитися.

За рахунок високої температури світяться Сонце і зорі. Висока температура була першим штучним джерелом світла, яким є вогонь. Навіть в нашу еру розвинутої і високо досконалої техніки освітлення, сильне розжарення залишається одним із видів отримання світла, оскільки на ньому ґрунтується дія ще досить поширеного джерела світла – лампи розжарення. Хоча треба визнати, що такі лампи дуже активно виходять з нашого побуту.

Деякі закономірності теплового випромінювання відомі давно. Найважливішими серед них є:

- інтенсивність випромінювання, а отже, і видима яскравість будь-якого розжареного тіла збільшується зі збільшенням температури;
- за однакової температури розжарення різні речовини світяться по-різному: одні сильніше, інші слабше;
- з підвищенням температури, паралельно з яскравістю, змінюється і колір розжареного тіла: починаючи з червоного кольору (при незначному розжаренні), через помаранчевий і жовтий колір, тіло набуває білого, а далі блакитного кольору.

Окрім теплового випромінювання, коли енергія теплового руху молекул речовини перетворюватиметься на енергію електромагнітного випромінювання, є й інше випромінювання. Його називають *люмінесценцією*. Існує декілька видів люмінесцентного випромінювання, відповідно до виду джерела енергії, за рахунок якого воно може існувати:

- *катодолюмінесценція* – електромагнітне випромінювання, яке виникає при бомбардуванні електронами твердих тіл;
- *електролюмінесценція* – це електромагнітне випромінювання, яке виникає в результаті перетворення енергії електричного поля в світлову (свічення газових чи світлодіодних ламп);
- *біололюмінесценція* – це випромінювання, яке виникає в результаті перетворення біологічної енергії на світлову, наприклад, світіння світлячків;
- *хемілюмінесценція* – світіння тіл, спричинене екзотермічними хімічними процесами у речовині, тобто процесами, що супроводжуються виділенням енергії (світіння фосфору, світіння гнилого дерева);
- *фотолюмінесценція* – світіння, що створюється під впливом електромагнітного випромінювання видимого або ультрафіолетового діапазону.

На відміну від теплового випромінювання, яке є рівноважним, люмінесцентне не має рівноважного характеру. Воно зумовлене переходом атомів, молекул або йонів у збуджений стан під дією певного джерела з подальшим поверненням у менш збуджений стан, що супроводжується випромінюванням. Люмінесценція з часом затухання $\sim (10^{-9} - 10^{-8}) \text{ c}$ називається *флуоресценцією*. Люмінесценція, яка ще триває значний проміжок часу, коли дія збудника світіння припинилася, називається *фосфоресценцією*.

Люмінесценція створює можливості отримання джерел світла, які мають переваги над лампами розжарення, оскільки випромінюють у видимому діапазоні лише 3–5 % затраченої енергії і тому мають малу світловіддачу ($12\text{--}20 \text{ лм/Вт}$). Люмінесцентні джерела світла не потребують нагрівання і випромінюють у вузькій спектральній області. Так, натрієві лампи, в яких пара натрію світиться під дією електричного розряду, мають світловіддачу порядку 60 лм/Вт . Їхнє випромінювання майже повністю зосереджене в області жовтої лінії натрію з довжиною хвилі 589 нм , що майже відповідає максимуму чутливості людського ока.

Люмінесцентними джерелами є ртутні лампи високого тиску, випромінювання яких частково розміщується і в ультрафіолетовій частині спектра. Це дає можливість використовувати їх як бактерицидні джерела.

5.2. Закони випромінювання чорного тіла

Розглянемо закономірності випромінювання ідеалізованого об'єкта – *абсолютно чорного тіла*.

Абсолютно чорною будемо називати поверхню, яка повністю поглинає всі промені, що падають на неї, нічого не відбиваючи в навколишній простір. Зрозуміло, що коефіцієнт відбивання такої поверхні дорівнює нулю для променів будь-якої довжини хвилі (будь-якого кольору).

Закон Стефана-Больцмана

Повна промениста енергія, яку абсолютно чорне тіло випромінює за одну секунду площею своєї поверхні, рівною одиниці, є прямо пропорційною абсолютній температурі його поверхні, піднесеної до четвертого степеня:

$$R_e^* = \sigma T^4, \quad (5.1)$$

де $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – стала величина; $T = t + 273^\circ\text{C}$ – термодинамічна температура.

Закон Стефана-Больцмана дає розуміння температурної залежності випромінювання повної енергії, тобто у всьому спектральному діапазоні. Однак з цього закону незрозуміло, які довжини хвиль випромінюються більше, а які менше.

Відповідь на це питання дає формула Планка, яка описує залежність спектральної густини випромінювання абсолютно чорного тіла від довжини хвилі за різних температур (рис. 5.1).

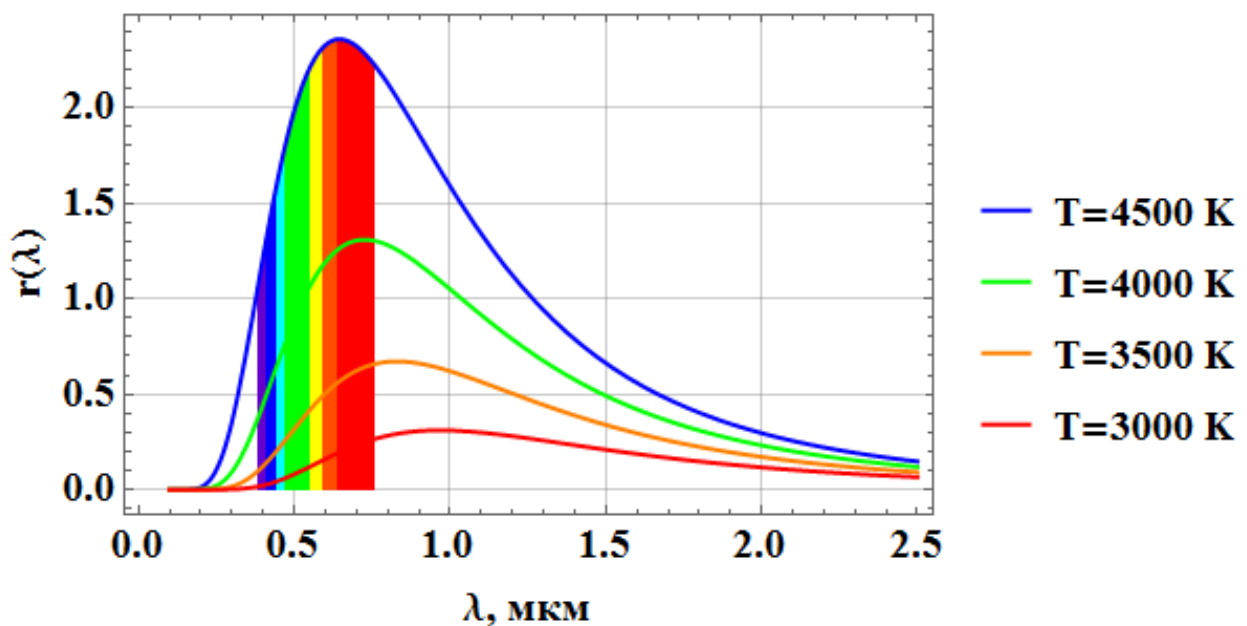


Рис. 5.1. Залежність спектральної густини випромінювання абсолютно чорного тіла від довжини хвилі за різних температур

Як бачимо, кожна крива спочатку різко росте, досягає максимуму, а потім повільно зменшується до нуля в бік інфрачервоної області.

Вивчаючи ці криві, можна зробити висновки щодо закономірностей випромінювання абсолютно чорного тіла.

1. Інтенсивність випромінюваної енергії збільшується зі збільшенням температури для будь-якої довжини хвилі. Тому крива, яка відповідає вищій температурі, повністю лежить над кривою, що відповідає меншій температурі.
2. Ріст випромінювання зі збільшенням температури для різних довжин хвиль є різним.
3. Значення r_{max} збільшується пропорційно температурі в п'ятому степені.
4. При підвищенні температури спостерігається зсув довжини хвилі λ_{max} , що відповідає максимуму випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла, в короткохвильову область спектра (в бік його ультрафіолетової ділянки).

Закон зміщення Віна

Довжина хвилі, яка відповідає максимуму спектральної випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла, зміщується в бік менших довжин хвиль із збільшенням температури тіла:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}, \quad (5.2)$$

$$b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}.$$

5.3. Яскравість світіння за різної температури

Оскільки збільшення температури приводить до збільшення як повної променистої енергії, яку випромінює абсолютно чорне тіло, так і до збільшення світіння в кожній окремій точці спектра, тобто на кожній довжині хвилі, то очевидно, що й яскравість світіння, яка сприймається оком, з температурою також буде швидко зростати. Як відомо, видиме світло пов'язане з енергією складним зв'язком. Це призводить до того, що візуальна яскравість чорного тіла буде збільшуватися не так, як це

впливає із закону Стефана-Больцмана для повного потоку, і по-іншому, ніж це відбувається для окремих точок спектра.

У таблиці 5.1 представлено значення *яскравості* V та *світності* R , а також *коефіцієнт світловіддачі* (величина світлового потоку з розрахунку на 1 Вт потужності випромінювання) чорного тіла залежно від температури. Як видно, візуальна яскравість збільшується значно швидше, ніж повне випромінювання, величина якого пропорційна температурі в четвертому степені.

Таблиця 5.1. Світлові характеристики випромінювання чорного тіла

T, K	$V, \text{кд/см}^2$	$R, \text{лм/см}^2$	$\eta, \text{лм/Вт}$
1000	$2,7 \cdot 10^{-4}$	$8,5 \cdot 10^{-4}$	0,0001
1 500	$7,5 \cdot 10^{-1}$	2,4	0,17
2000	4,4	$1,39 \cdot 10^2$	1,52
2500	$5,3 \cdot 10^2$	$1,66 \cdot 10^3$	7,4
3000	$2,8 \cdot 10^3$	$8,9 \cdot 10^3$	19,2
3500	$9,4 \cdot 10^3$	$3,0 \cdot 10^4$	34,5
4000	$2,3 \cdot 10^4$	$7,4 \cdot 10^4$	50,2
4500	$4,8 \cdot 10^4$	$1,50 \cdot 10^5$	63,9
5000	$8,4 \cdot 10^4$	$2,6 \cdot 10^5$	74,2
5500	$1,35 \cdot 10^5$	$4,2 \cdot 10^5$	84,3
6000	$2,0 \cdot 10^5$	$6,3 \cdot 10^5$	85,2
6500	$2,8 \cdot 10^5$	$8,8 \cdot 10^5$	86,6
7000	$3,8 \cdot 10^5$	$1,18 \cdot 10^6$	86,1
7500	$4,8 \cdot 10^5$	$1,52 \cdot 10^6$	84,2
8000	$6,1 \cdot 10^5$	$1,90 \cdot 10^6$	81,3
8500	$7,4 \cdot 10^5$	$2,3 \cdot 10^6$	77,9
9000	$8,9 \cdot 10^5$	$2,8 \cdot 10^6$	74,2
9500	$1,04 \cdot 10^6$	$3,3 \cdot 10^6$	70,3
10000	$1,21 \cdot 10^6$	$3,8 \cdot 10^6$	66,3
12000	$1,95 \cdot 10^6$	$6,1 \cdot 10^6$	51,6

14000	$2,79 \cdot 10^6$	$8,8 \cdot 10^6$	39,9
16000	$3,7 \cdot 10^6$	$1,6 \cdot 10^7$	31,0
18000	$4,7 \cdot 10^6$	$1,46 \cdot 10^7$	24,4
20000	$5,7 \cdot 10^6$	$1,78 \cdot 10^7$	19,5
25000	$8,3 \cdot 10^6$	$2,6 \cdot 10^7$	11,7
30000	$1,1 \cdot 10^7$	$3,5 \cdot 10^7$	7,4

Велику зацікавленість викликає зіставлення світла та енергії, що випромінюються поверхнею чорного тіла (числа, які наведені в останній колонці таблиці 5.1). Як бачимо, значення розпочинаються з температури 1000°C . При нижчих температурах, наприклад, менших, ніж 800°C , випромінювання розжареного тіла практично повністю лежить в інфрачервоному діапазоні спектра і тому ніяк не впливає на наше око (коефіцієнт світловіддачі дорівнює нулю). Але при 800°C світіння вже доволі відчутне, а за температури 1000°C стає добре помітним.

При збільшенні температури максимум випромінювальної здатності чорного тіла наближається до видимої області, що й приводить до росту величини η . При наближенні до температури 6000°C цей ріст сповільнюється, а при температурі 6600°C зовсім припиняється і далі, при ще вищих температурах, коефіцієнт світловіддачі зменшуватиметься. Це пояснюється тим, що в інтервалі температур від 3500°C до 7500°C максимум інтенсивності лежить у видимій частині спектра. При збільшенні температури максимум інтенсивності випромінювання зсуватиметься в ультрафіолетову частину спектра, а тому частка енергії, яка перетворюється на світловий потік, знову зменшуватиметься.

З вищевикладеного випливає, що найбільш економічно вигідним було б таке джерело світла (вогонь чи нитка розжарення), температура якого становила б $(6000\text{--}7000)^\circ\text{C}$. Створити його неможливо, позаяк така температура перевищує температуру плавлення будь-якого матеріалу. Але в природі таке джерело існує: це Сонце, яке є розжареною кулею, саме з такою температурою.

Але чому так сталося? Чи є це звичайним випадковим фактом, що світлова віддача досягає максимуму саме при температурі Сонця? Звичайно ж, ні! Тут ми спостерігаємо, як організм людини пристосовується до умов, в яких вона живе і розвивається. Зокрема, крива спектральної чутливості ока сформувалась саме такою, що забезпечує найбільш ефективну роботу органу зору людини при сонячному денному світлі, у той час доби, коли вона веде активний спосіб життя з моменту її народження.

5.4. Температура і колір

Оскільки розподіл енергії в спектрі абсолютно чорного тіла зі зміною температури змінюється також, то змінюватися повинен і колір розжареного тіла. Це підтверджує і повсякденний досвід, який, щоправда, стосується нечорних тіл, прикладом яких може бути вугілля, метал, каміння.

Кожна людина неодноразово помічала, що навіть при незначному розжаренні світіння має насичено-червоний, вишневий колір. З підвищенням температури спостерігаємо забарвлення в помаранчевий (чи його відтінки, наприклад, жовто-рожеві вуглики вглибині пічки), який при подальшому збільшенні розжарення переходить у жовтий, а потім жовто-білий тон, прикладом якого може бути світло вогню чи електричної лампи розжарення. При ще вищих температурах спостерігається яскраво білий, а потім блакитний колір.

Ця послідовна зміна кольорів, яку прийнято називати шкалою розжарення, повністю відповідає даним, отриманим з аналізу спектральних кривих (рис. 5.1).

За низьких температур, близьких до 1000°C , максимум випромінювання лежить далеко в інфрачервоній частині спектра, і тому на видиму ділянку припадає тільки крайня ліва частина кривої. Тільки в червоному кінці спектра, за таких умов, випромінювання досягає певних помітних значень, в іншій частині спектра воно дуже незначне,

практично відсутнє. Звідси й насичений червоний колір випромінювання, близький до спектрального червоного кольору.

З підвищенням температури максимум випромінювання наближається до червоної межі спектра і в такому випромінюванні з'являються спершу помаранчеві, потім жовті та зелені промені. Відповідно до цього, колір загального випромінювання переходить в помаранчевий і жовтий.

За температури 3000°C світиться вже весь спектр, включно з фіолетовою ділянкою. Біля значення температури 3500°C максимум випромінювання вже потрапляє у видиму частину спектра, і повне випромінювання має такий спектральний склад, який при тривалому розгляданні складає враження білого. За температури 5200°C максимум випромінювання припадає на середину ділянки видимого спектра (555 нм). При подальшому підвищенні температури максимум випромінювання переміщується в синю та фіолетову ділянки спектра, а вище від 7000°C – заходить в ультрафіолетову область. В цих умовах колір змінюється дуже мало, проходячи лише незначну градацію блакитних відтінків, які й зберігає до надвисоких значень -температури.

При відносно невеликих температурах ($2000\text{--}3000^{\circ}\text{C}$), навіть невелика різниця у розжаренні, наприклад, 100°C , супроводжується різко помітною зміною кольору для нашого зору (рис. 5.2). Тоді як за високих температур, порядку ($50000\text{--}100000^{\circ}\text{C}$), зміна температури навіть на 1000°C жодним чином на колір не впливає.

На рис. 5.2 наведено кольоровий графік залежності кольору випромінювання від температури. Як видно, крива розпочинається від лінії спектральних кольорів біля довжини хвилі 605 нм і спрямована в бік білого кольору. За температури 5620°C ця крива найближче розміщена до точки, яка відповідає білому світлу. Після цього заходить в область синіх кольорів з усе більшою насиченістю. Але досягнути високої насиченості синього кольору навіть при дуже великих температурах не вдається.

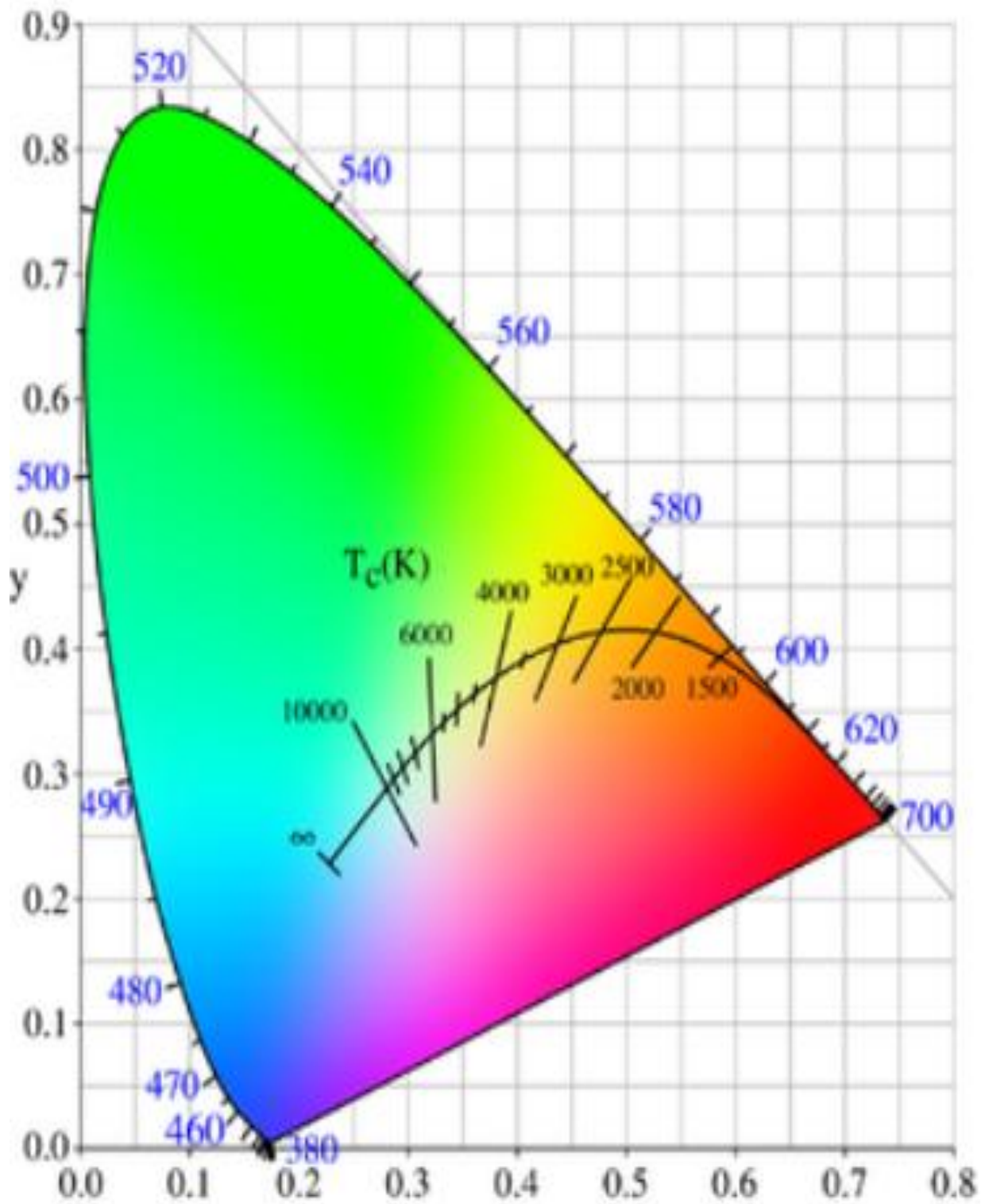


Рис. 5.2. Послідовність випромінювання кольорів абсолютно чорним тілом при збільшенні температури (рисунок взято із сайту “Українська Вікіпедія”, розділ “Колірна температура”)

Колірна температура випромінювання джерела світла – це температура випромінювання чорного тіла, при якій воно має той самий колір, що й випромінювання, яке розглядається. Оскільки випромінювання реальних тіл, що світяться, відрізняється від випромінювання чорного тіла, то воно характеризується так званою *корельованою колірною температурою*. При цьому спектральний склад випромінювання і фізична температура зазвичай відрізняються, що впливає з відмінності фізичних властивостей реального й ідеального випромінювачів.

5.5. Пірометри

Для того, щоб вимірювати температуру тіла, яке дуже сильно нагрівається, а також самосвітного об'єкта, віддаленого від спостерігача (наприклад, зорі на небосхилі), не можна користуватися звичайними методами, які ґрунтуються на застосуванні термометрів розширення, електричних термометрів опору і термопар. У таких випадках про температуру тіл можна робити висновок тільки за його випромінюванням. Комплекс методів, що дають змогу вимірювати високі температури і в яких за основу взято, як випромінювальна здатність розжареного об'єкта змінюється з температурою, називається *оптичною пірометрією*. *Пірометри* є приладами, які за таким принципом визначають значення температури об'єктів дослідження (беручи до уваги їхнє теплове випромінювання). Основною перевагою пірометрів є те, що вимірювання температур відбувається безконтактно з досліджуваним зразком. Отже, так можемо визначати температуру сталі в доменних печах, зірки чи іншого небесного світила, лампи розжарювання тощо.

Класифікацію оптичних пірометрів проводять за тією властивістю теплового випромінювання, яка у них використовується. Відповідно, називають їх *радіаційними, колірними та яскравісними оптичними пірометрами*.

В основі роботи радіаційних пірометрів лежить закон Стефана-Больцмана. Здійснюється вимірювання повної потужності випромінювання зразка та визначення його інтегральної випромінювальної здатності.

Вимірюючи температуру абсолютно чорного тіла, проводять градування радіаційних пірометрів. Однак закономірності випромінювання досліджуваного зразка погано описуються законом Стефана-Больцмана.

Якщо розглянути сіре тіло, то $R_e = \alpha \sigma T^4 = \sigma T_p^4$, тому $T = \frac{T_p}{\sqrt[4]{\alpha}}$. Тут

T та T_p – точне значення температури та виміряне радіаційним пірометром (T_p ще називають *радіаційною температурою*), відповідно; α – ступінь чорноти.

Робота кольорового пірометра ґрунтується на законі Віна. Встановлено, що його наслідком є те, що ріст температури призводить до зміни кольору світіння розжареного тіла. За відносно низької температури тіло є червоного кольору, а при нагріванні набуває жовтого та білого. Тоді, скориставшись оптичними фільтрами відповідного кольору, легко шукається довжина хвилі, якій відповідатиме максимум спектральної густини. Таким чином, за законом Віна, що справедливий також для сірих тіл, можна розрахувати *кольорну температуру*.

На практиці доволі часто використовують яскравісні оптичні пірометри. Їхня робота ґрунтується на порівнянні яскравості еталону та досліджуваного тіла. Градування температури еталону здійснюють за випромінюванням абсолютно чорного тіла. За припущенням, при однаковій випромінювальній здатності температура досліджуваного тіла дорівнює температурі еталонного зразка. Однак реальне тіло, відповідно до закону Кірхгофа, при деякій температурі поглинає та випромінює менші енергії, порівняно з абсолютно чорним. Температуру T_R , яку визначають за допомогою яскравісного пірометра, має назву *яскравісної*. Це значення температури є меншим за значення

температури досліджуваного зразка. Яскравісним пірометром можна скористатися, наприклад, щоб визначити температуру печі, в якій випромінювання через невеликий отвір є співмірним із випромінюванням чорного тіла, щоб визначити температуру матеріалів, використовуваних при куванні, температуру розплавленої сталі. Для різних речовин встановлені виправні коефіцієнти, значеннями яких користуються у таких розрахунках. Наприклад, розглянемо вольфрам W. У діапазоні $T = (1 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^3) \text{ K}$ значення такого коефіцієнта складає 1,259, а це означає, що точне значення температури досліджуваного об'єкта $T = kT_r$ ($k = 1,259$ для W).

Розглянемо будову яскравісного пірометра (рис. 5.3).

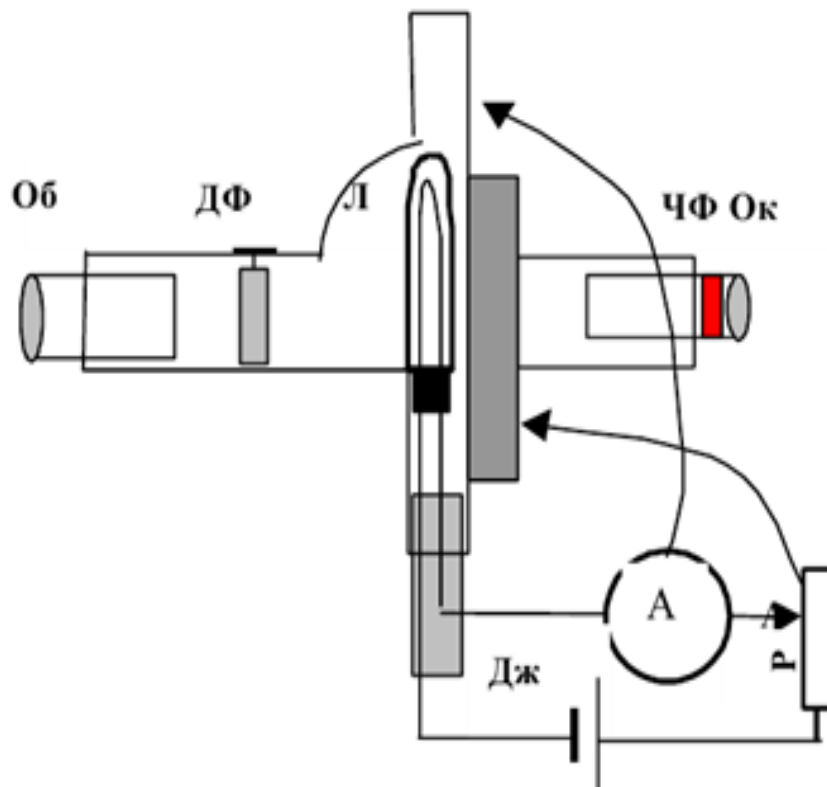


Рис. 5.3. Яскравісний пірометр

В його основі бачимо еталонну лампу Л з профільованою ниткою розжарювання, джерелом живлення для якої є джерело постійної напруги Дж (наприклад, акумулятор). За допомогою реостата Р регулюють силу струму живлення, значення якої фіксують за показами амперметра А (шкалу проградуєвано в °С за випромінюванням

абсолютно чорного тіла). При вимірюваннях струм у колі нитки підбирають так, щоб нитки розжарення не було видно на фоні поверхні досліджуваного зразка, тобто, щоб їхні випромінювальні здатності були однакові для монохроматичного світла (рис. 5.4).



Рис. 5.4. Яскравість нитки розжарення

Зорова труба дозволяє чітко розглянути еталонну лампу з ниткою розжарювання та поверхню зразка, що і є предметом дослідження. Об'єктив **Об** та окуляр **Ок**, які утворюють зорову трубу, можна потрібним чином переміщувати. Зорова труба забезпечена двома фільтрами: червоним **ЧФ**, щоб порівнювати яскравість для вузького діапазону довжин хвиль, та димчастим **ДФ**, що надає можливість змінювати відношення яскравостей, а також, не перегріваючи еталонну лампу, виміряти вищі температури досліджуваного зразка. Верхню шкалу амперметра використовують у вимірюваннях, коли димчастий фільтр відсутній (рис. 5.3); нижня шкала використовується при його застосуванні.

5.6. Спектральний склад світла різних джерел

Кожне джерело світла має власний спектр випромінювання, який відрізняється від інших джерел. *Спектр випромінювання* – це графічне зображення інтенсивності випромінювання світла залежно від довжини хвиль, які випромінює джерело світла.

Сонце не тільки забезпечує світлом всіх живих істот, але і є основним джерелом енергії, завдяки якому існує життя на планеті.

Сонце – це головне джерело світла на Землі. Його спектр випромінювання відрізняється від спектрів штучних джерел світла, таких як лампи розжарення і світлодіодні лампи.

З можливістю генерування штучного електричного світла життєвий простір людей все більше переміщується у будівлі. Відповідно до досліджень, середньостатистичний європеєць проводить в середньому 90 % дня в приміщенні. Лампа розжарювання була першим широкомасштабним промисловим джерелом світла. Сьогодні, в основному, використовуються такі джерела світла, як люмінесцентні лампи, енергозберезувальні та все частіше світлодіодні. Це зробило штучне світло максимально енергоефективним і довговічним.

Спектр випромінювання Сонця має дуже широкий діапазон довжин хвиль, який охоплює випромінювання від інфрачервоного до ультрафіолетового (рис. 5.5). Але варто зазначити, що спектр випромінювання Сонця також містить лінії поглинання, які є наслідком поглинання різних елементів у його зовнішніх шарах.

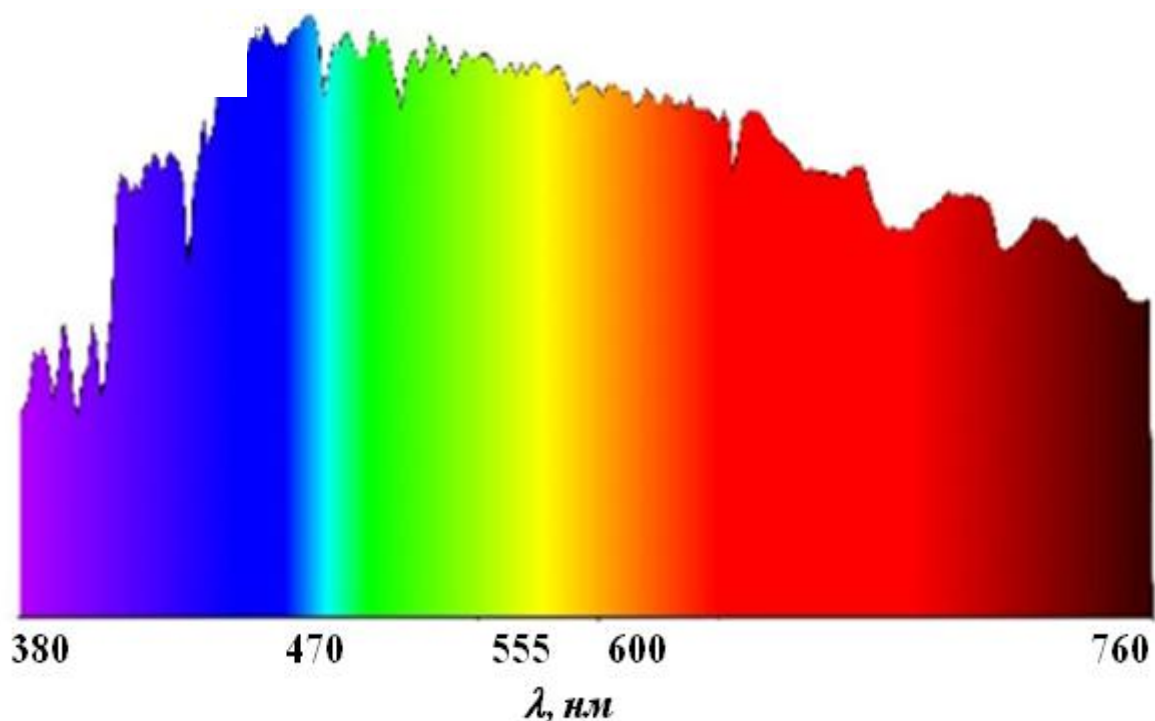


Рис. 5.5. Колірний спектр сонячного світла

Візуальний комфорт і кольорове бачення також є істотно кращими при природному сонячному світлі, порівняно зі штучними джерелами.

Лампи розжарення – це штучні джерела світла, які мають спектр випромінювання, що включає в себе в основному інфрачервоне та видиме світло. Спектр випромінювання ламп розжарення не має ліній поглинання, які є в Сонця. Як і Сонце, лампа розжарювання є температурним випромінювачем. Світло генерується в результаті теплового руху атомів, тому лампа має суцільний спектр випромінювання (рис. 5.6). Порівняно із сонячним світлом (рис. 5.5), кольоровий спектр лампи розжарення (рис. 5.6) має набагато нижчий вміст синьої компоненти, а розподіл інтенсивності світла різко та неперервно зростає до червоної та інфрачервоної частини спектра. Ці властивості роблять її ідеальним джерелом світла. Однак проблема з ними полягає у тому, що вони випромінюють понад 90 % енергії у вигляді теплового випромінювання в невидимому інфрачервоному діапазоні. Тому в них малі значення світлової віддачі (приблизно від 9 до 15 $лм/Вт$), значно менші порівняно з іншими джерелами світла.

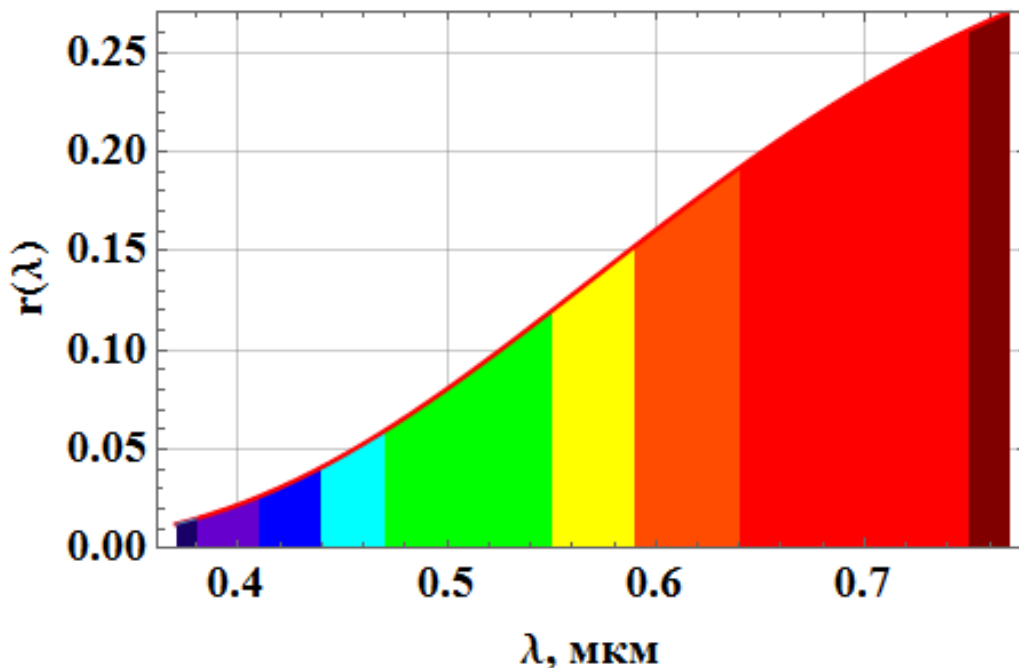


Рис. 5.6. Колірний спектр лампи розжарення

Окрім того, спектр випромінювання залежить від температури джерела світла. Зокрема, лампи розжарювання мають спектр, який залежить від температури нитки розжарювання: що вона вища, то більше видимого світла випромінюватиметься. При збільшенні температури спектр випромінювання зсувається у бік коротких довжин хвиль, тому лампи розжарювання з високою температурою нитки розжарювання мають спектр випромінювання з більшою часткою видимого світла відносно інфрачервоного.

Однак інші сьгоднішні джерела світла, побудовані на принципі генерації світла газового розряду та електролюмінесценції, випромінюють світловий спектр, який суттєво відрізняється від ідеального спектра світла: при високих колірних температурах від сонячної, а при низьких колірних температурах від спектра світла лампочки.

Широко використовувані люмінесцентні трубки та енергозберезувальні лампи мають великі розриви в колірному спектрі, порівняно з ідеальним спектром сонячного світла, оскільки вони випромінюють світло лише з довжинами хвиль збудженого газу (рис. 5.7).

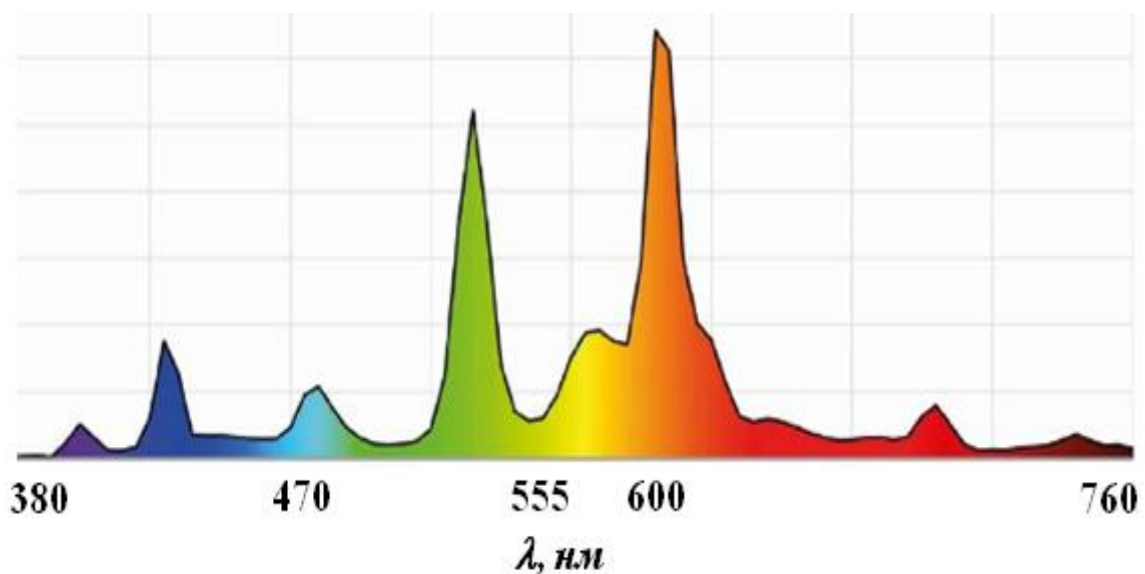


Рис. 5.7. Колірний спектр люмінесцентної лампи

На рисунку 5.7 зображено типовий спектр світла люмінесцентної лампи, який в основному показує три чіткі смуги в синій (при 440 *нм*), зеленій (при 545 *нм*) і червоній (при 610 *нм*) ділянках спектра. У цих газорозрядних лампах також є проблема мерехтіння. Незважаючи на те, що воно зазвичай непомітне візуально, ці світлові імпульси можуть бути виявлені в мозку, підсвідомо викликаючи стрес у людини.

Сьогодні світлодіоди (LED-лампи) встановлюють практично у всіх джерелах світла. Завдяки своїм невеликим розмірам, їхньою перевагою є можливість використання практично без обмежень щодо дизайну світильників, порівняно зі звичайними лампами розжарювання та люмінесцентними. Окрім того, світлодіоди дозволяють генерувати значно більший світловий потік на дуже малій площі та досягати світлової ефективності понад 200 *лм/Вт*.

Світлодіодні лампи – це більш енергоефективні джерела світла, які генерують світло, коли електричний струм проходить через напівпровідниковий матеріал. Спектр випромінювання світлодіодних ламп залежить від напівпровідникового матеріалу, тому такий спектр може бути модифікований при зміні складу матеріалу. У більшості випадків матеріалом для світлодіода є напівпровідникові сполуки галію Ga та індію In (арсенід галію GaAs, арсенід-фосфід галію GaAsP, AlGaAs, нітрид галію GaN, фосфід індію InP).

Порівняно з лампами розжарювання, світлодіодні мають більше значення відношення видимого світла до інфрачервоного, що робить їх більш енергоефективними. Однак деякі види світлодіодних ламп можуть мати вузькосмуговий спектр випромінювання, а це означає, що можуть бути непридатними для деяких застосувань, які вимагають широкого спектра світла.

У звичайного світлодіода спостерігається пік у синій частині спектра біля 450 *нм* (рис. 5.8).

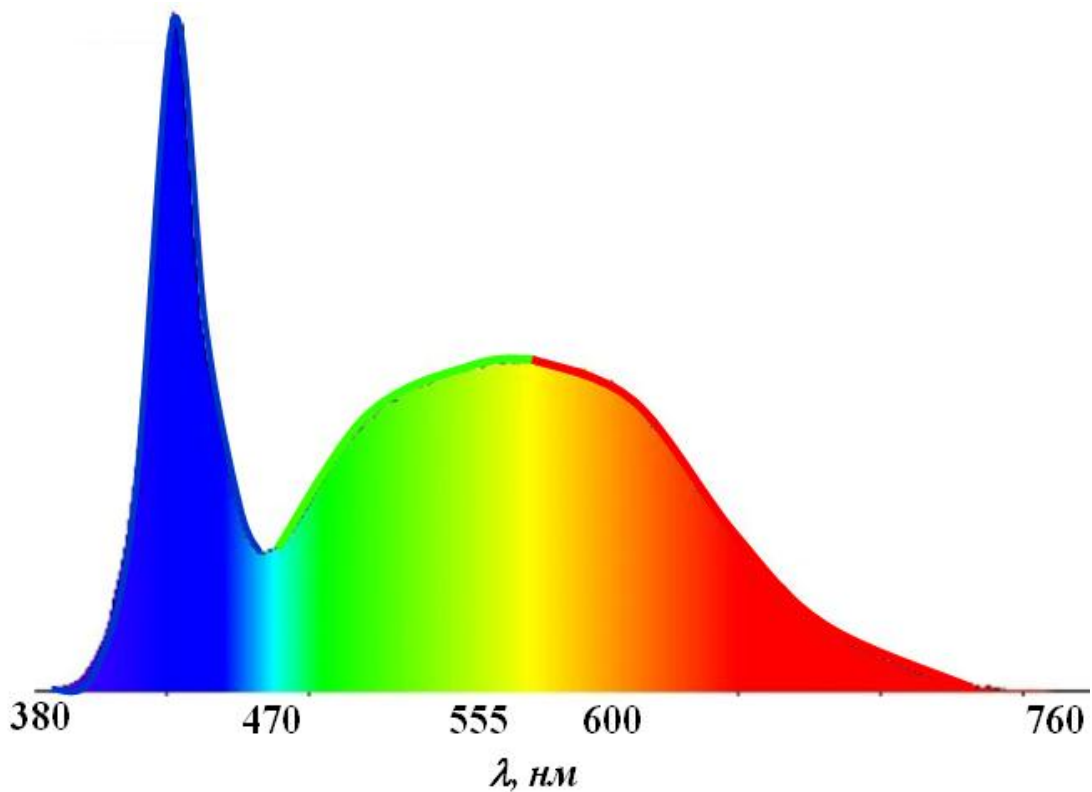


Рис. 5.8. Колірний спектр світлодіодної лампи

Тут практично неprisутні блакитна зона, яка передовсім забезпечує оптимальний контрастний зір, і червона, яка відповідає за енергопостачання та регенерацію через клітини шкіри. Хоча штучне освітлення, яке зараз використовується у вигляді газорозрядних ламп і звичайних світлодіодних ламп, задовольняє візуальні потреби людей, йому бракує важливих частин спектра, порівняно з природним світлом суцільного спектра. У результаті це незбалансоване штучне освітлення поступово спричиняє проблеми зі здоров'ям людей, які можуть варіюватися від проблем зі сном до короткозорості та серйозних захворювань. У цих умовах важко врахувати як фізіологічні, так і психологічні потреби людей.

Сучасна світлодіодна продукція, використовує спеціальні люмінофори як випромінювальні елементи, та відповідає фізіологічним і візуальним потребам людини, таким як природне кольорове бачення і розрізнення контрастів.

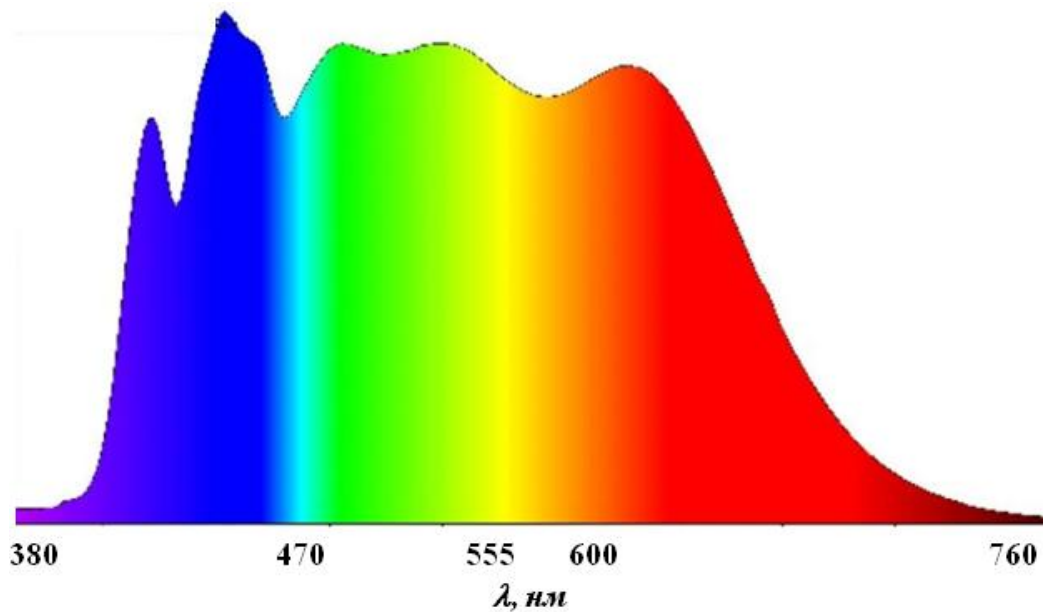


Рис. 5.9. Спектр світлодіода зі спектром, близьким до сонячного світла (колірна температура, більша, ніж 5000 K)

Контрольні питання

1. Що таке абсолютно чорне тіло?
2. Як максимум випромінювальної здатності чорного тіла залежить від температури?
3. Чому при нагріванні тіла спочатку світяться червоним кольором, а пізніше жовтим чи білим?
4. Сформулюйте закон Стефана-Больцмана.
5. Як яскравість залежить від температури?
6. Що таке колірна температура?
7. Що таке пірометр?
8. Які види пірометрів ви знаєте?
9. Порівняйте спектри випромінювання сонячного світла, лампи розжарювання та світлодіодних ламп.

ТЕМА 6. ОПТИЧНІ ІЛЮЗІЇ

6.1. Обман зору. Ілюзія сприйняття кольору. Ілюзія сприйняття глибини. Рухомі ілюзії.

6.2. Міражі.

6.3. Контраст.

6.4. Кольорові асоціації. Емоційний та фізіологічний вплив кольору на людину. Специфіка сприйняття кольору дитиною.

6.1. Обман зору. Ілюзія сприйняття кольору. Ілюзія сприйняття глибини. Рухомі ілюзії

Як вже зазначалося у першій темі, сприйняття кольору є не тільки результатом фізичних та фізіологічних процесів, але й психологічного сприйняття. Особливо це яскраво проявляється, коли ми маємо справу з оптичними ілюзіями, обманом зору.

Обман зору – це явище, коли мозок сприймає зображення не таким, яким воно є насправді. Іноді це може бути пов'язане з ілюзією сприйняття кольору, коли кольори об'єктів сприймаються інакше через контраст або спеціальні ефекти. В основному, обман зору пов'язаний з тим, як мозок сприймає світло і робить припущення про колір.

Ілюзія кольору – це феномен, коли кольори, які людина сприймає, відрізняються від кольорів, які насправді присутні в об'єктах, що спостерігаються. Цей ефект може бути спричинений різними факторами.

1. *Спостереження на фоні.* Колір об'єкта, який ми спостерігаємо, може змінюватися залежно від фонового кольору. Це може бути пов'язано з тим, які фотони поглинаються або відбиваються об'єктом та фоном, а також з тим, як наш мозок сприймає ці кольори.

2. *Оптичні ілюзії.* Іноді наш мозок може сприймати образи як ілюзії, що може призвести до зміни кольорів. Оптичні ілюзії можуть

бути спричинені різними факторами, такими як розмір, форма, зміна концентрації кольорів тощо.

3. *Конвергенція та адаптація ока.* Конвергенція – це процес, коли два ока зосереджуються на одній точці, а адаптація – це здатність очей змінювати свою чутливість до світла залежно від умов освітлення. Ці фактори можуть впливати на сприйняття кольору об'єктів.

4. *Психологічні фактори.* Психологічні фактори, такі як емоції, сприйняття, уявлення, тощо, також можуть впливати на сприйняття кольору об'єктів.

Рухомі ілюзії – це також поширена форма обману зору, коли образ сприймається як рухомий, хоча насправді він нерухомий. Це може бути пов'язано зі зміною розміру об'єктів, колірних ефектів та інших факторів.

Ілюзія сприйняття глибини – це феномен, який полягає у сприйнятті простору більш вимірним, ніж він є насправді. Це можуть спричинити різні фактори, серед яких можна виділити наступні:

- *Розміщення об'єктів.* Об'єкти, що розташовані далі від нас, здаються меншими, а ті, що ближче, – більшими. Це може допомогти нашому мозку оцінити відстань між об'єктами і створити ілюзію глибини.
- *Лінії перспективи.* Лінії, що збігаються у далекому горизонті, можуть створювати враження глибини. Це називається перспективою. Вона може бути використана, щоб надати об'єктам відчуття глибини.
- *Тіні та освітлення.* Тіні можуть надавати об'єктам об'ємність і створювати враження глибини. Освітлення також може допомогти зі створенням враження глибини, оскільки об'єкти, що знаходяться далі від нас, можуть мати інший колір чи світловідбивання.
- *Рух.* Рух може допомогти створити враження глибини, оскільки ми можемо бачити об'єкти, що знаходяться далі, якщо інші об'єкти наближаються до нас чи віддаляються.

Усі ці ілюзії є прикладами того, як можна обманути наш мозок за допомогою візуальних ефектів. Вони цікаві з точки зору психології та нейробіології і можуть допомогти зрозуміти, як працює наш мозок не тільки відносно сприйняття певного кольору чи певного розміру.

Розглянемо деякі відомі оптичні ілюзії. Потрібно порахувати кількість чорних точок, зображених на рис. 6.1. Коли намагатися це зробити, то спостерігатиметься швидке мерехтіння цих точок та зміна кольору з білого на чорний, і навпаки. Хоча насправді чорних точок на малюнку взагалі немає. Ці точки здаються чорними через оптичний ефект, який відбувається в нашому зоровому сприйнятті. Оскільки між білими смугами та чорними квадратами є значний контраст, наш мозок сприймає цей контраст як відтінки сірого. Коли білі точки, які розташовані на перетині смуг та квадратів, мерехтять, то наш мозок сприймає зміну контрасту між цими точками та фоном, який складається із сірих відтінків. Це може викликати відчуття, що точки змінюють свій колір на чорний, хоча фактично цього не відбувається.

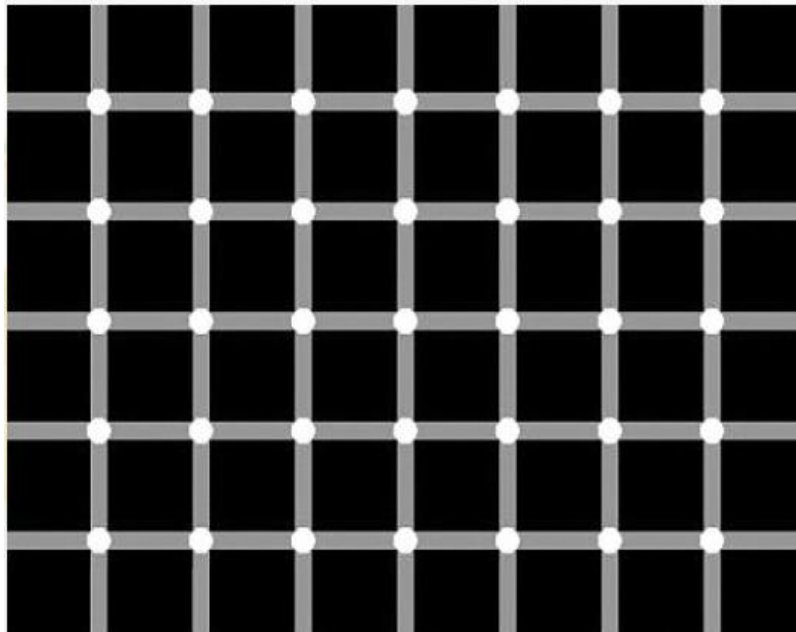


Рис. 6.1. Ілюзія появи чорних точок на малюнку

На рис. 6.2 зображено концентричні кільця та квадрат, повернутий на 45° . Сторони квадрата здаються увігнутими. Насправді вони прямі. Це відбувається через здатність нашого мозку виявляти форми та

відношення між об'єктами на основі контексту, який оточує їх. У цій ілюзії, контекст створює враження викривлення квадрата та нерівномірності кілець.

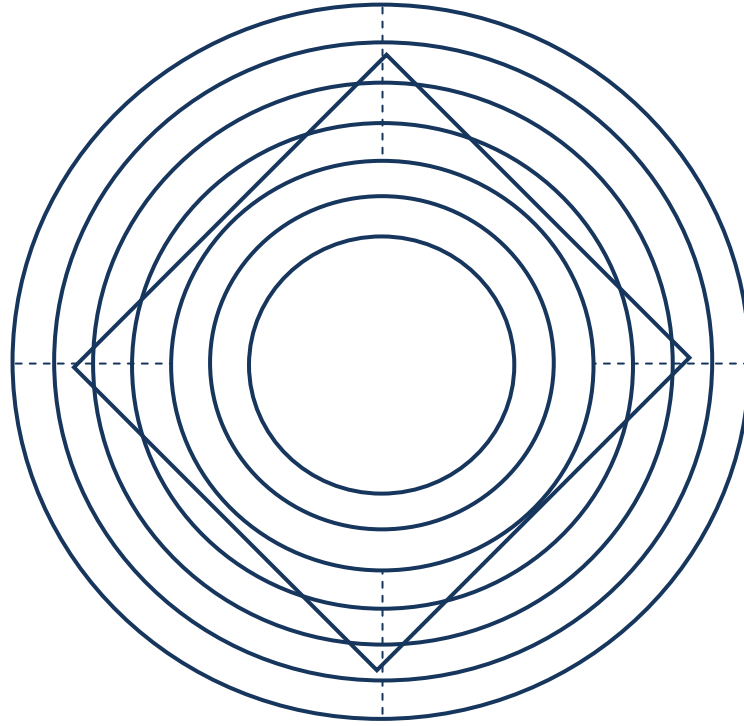


Рис. 6.2. Ілюзія У. Еренштейна (W. Ehrenstein, 1921)

На рис. 6.3 зображено ілюзії руху. Ми спостерігаємо кольорові об'єкти, які обертаються, хоча зрозуміло, що ці об'єкти знаходяться в стані спокою.

Ці ілюзії створені за допомогою градієнтів кольорів і геометричних форм. Розміщення кольорових блоків та використання градієнтів відтворює ефект руху та зміни форми, що зумовлено візуальною взаємодією різних частин малюнка.

Ілюзії Акіюші Кітаока базуються на тому, що наші очі та мозок не тільки реагують на зовнішній світ, але й активно взаємодіють з ним. Очі сприймають світло, яке потім обробляється в мозку. Акіюші Кітаока використовує цю взаємодію, щоб створювати ілюзії, які здатні викликати різноманітні візуальні ефекти, хоча насправді нічого не рухається або не змінює форму (рис. 6.4).

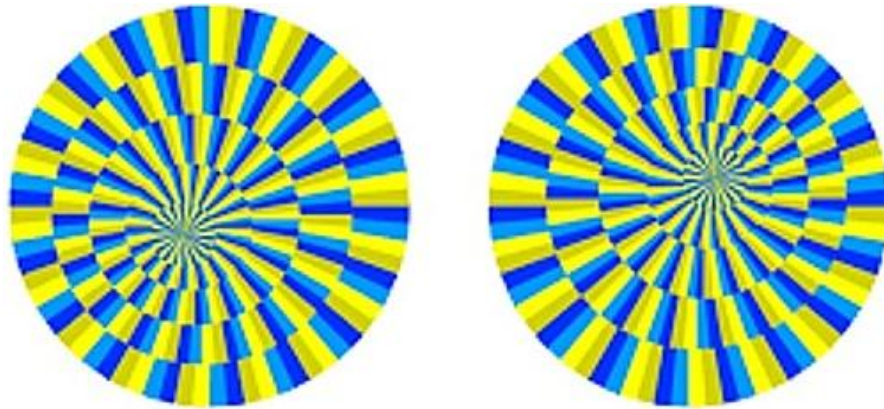
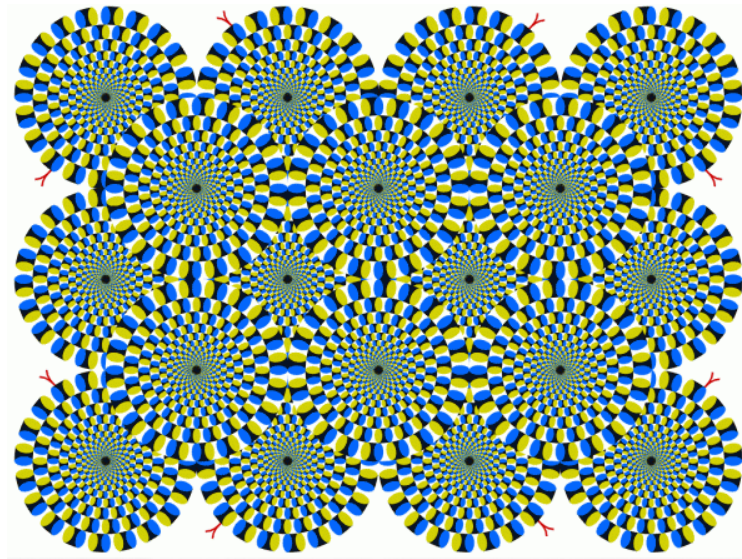


Рис. 6.3. Ілюзія Акіyoshi Кітаока, 2004

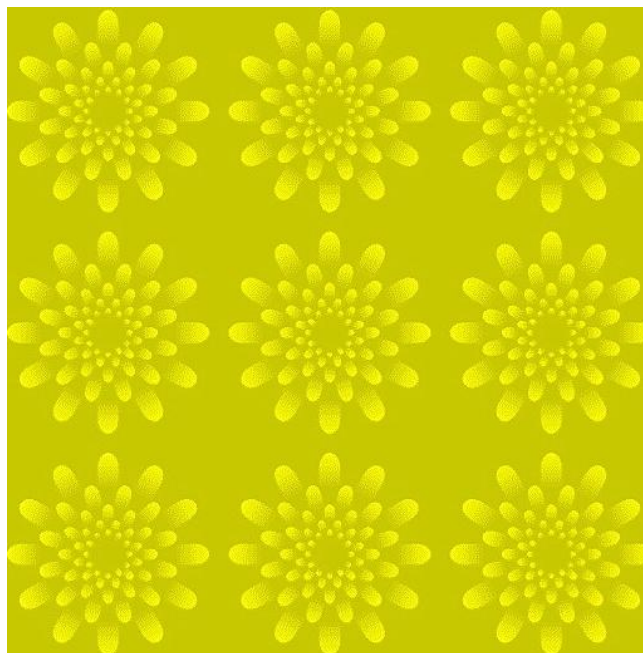


Рис. 6.4. Ілюзія Акіyoshi Кітаока, 2003 (розширення хризантеми)

Ілюзія Akiyoshi Kitaoka “Розширення хризантеми” є прикладом оптичної ілюзії, яка створює враження, що фігури на зображенні змінюють свій розмір (розширюються).

Ця ілюзія ґрунтується на взаємодії кольорів та форм. Круглі фігури складаються з рядів прямокутних фігур різних кольорів, які взаємодіють із сусідніми рядами, що створює враження розширення або зменшення кругів. Оскільки кольори на зображенні розташовані специфічним чином, ця взаємодія кольорів і форм створює враження руху і зміни розміру.

Ілюзія розширення хризантеми пояснюється тим, що наш мозок використовує візуальну інформацію, щоб розрізнити об’єкти та їх розміри.

На рис. 6.5 представлено один з видів ілюзії кольору. Це явище називається кольоровим контрастом і спостерігається тому, що сприйняття кольору залежить від його фону. Колір сприймається на основі того, які сусідні кольори впливають на нього. Коли кольори помістити на різному фоні, то фон впливатиме на сприйняття кольору. Це призводить до зміни яскравості, насиченості і тону кольору, що сприймається.

Наприклад, якщо малювати круги різних кольорів на білому фоні, колір кругів здається стійким і чистим. Якщо ж робити те саме на чорному фоні, колір кругів може здаватися тьмяним. Отже, коли ми сприймаємо колір на фоні, наші очі також сприймають контрастні кольори, які впливають на сприйняття кольору. Це може призводити до змін в сприйнятті кольору.

На рис. 6.6 *а* зображено куб, окремі грані якого зафарбовані в червоний та блакитний кольори. Дивлячись на цей куб, одного разу ми бачитимемо попереду червону грань, а іншого разу – блакитну (куб начебто повернувся).

На рис. 6.6 *б* зображено дві непаралельні прямі, які створюють ілюзію глибини. Це пов’язано з тим, що ми знаємо, що при віддаленні об’єктів ми бачимо їх меншими. Тому зменшення відстані між прямими наш мозок інтерпретує, як їх віддалення.

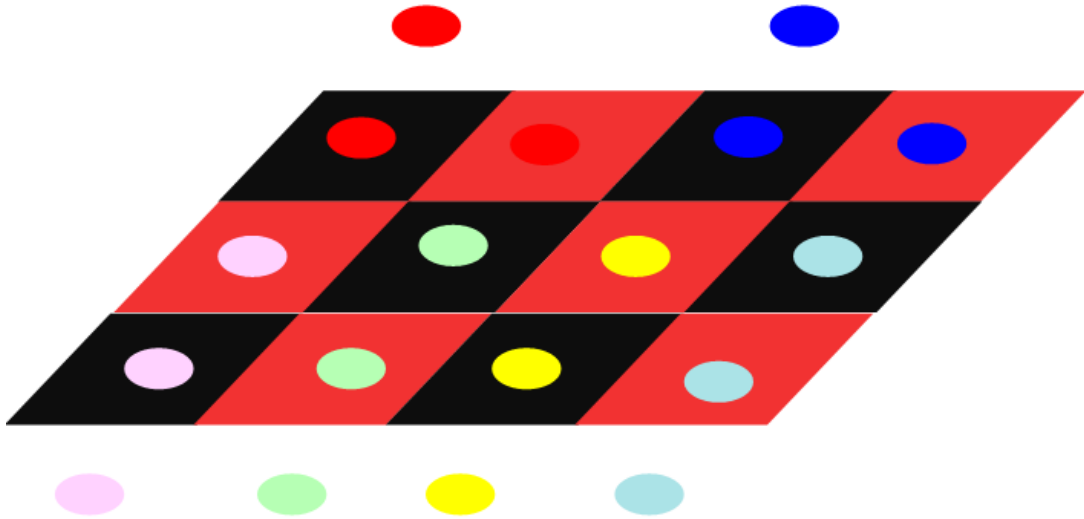
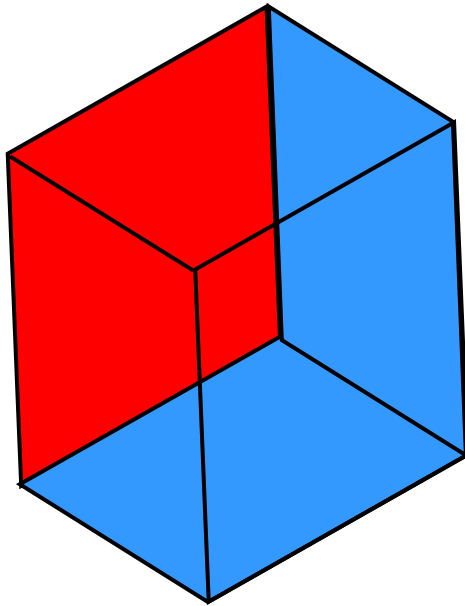


Рис. 6.5. Ілюзія кольору та контрасту

a)



б)

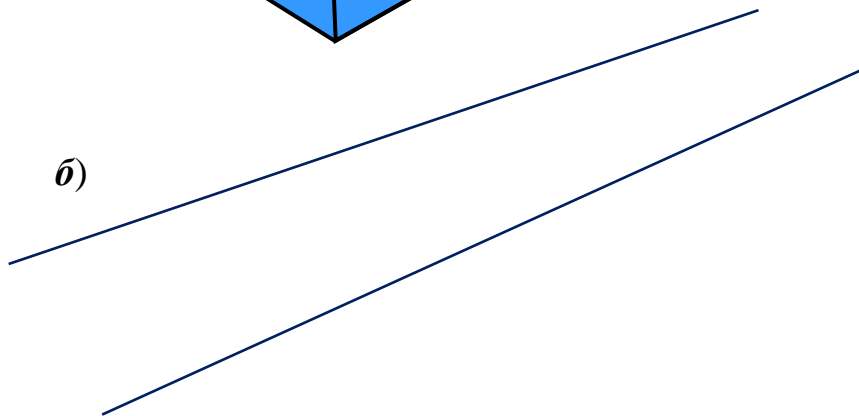


Рис. 6.6. Ілюзія глибини

6.2. Міражі

Атмосферна рефракція зумовлена заломленням світлових променів в атмосфері. За нормальних умов показник заломлення світлових променів зменшується із віддаленням від Землі. Внаслідок цього об'єкт спостерігається вище над горизонтом, ніж є насправді.

Міражі поділяють наступним чином:

- 1) *Нижні міражі (озерні)* – пояснюються значним нагріванням нижніх шарів і, відповідно, зменшенням показника заломлення біля поверхні (рис. 6.7 а). В результаті цього ми бачимо начебто предмети відбиті від горизонтальної (дзеркальної) поверхні. Тому літом асфальт вдалині здається мокрим чи в пустелі бачимо озеро.
- 2) *Верхні міражі* спостерігаються, коли верхні шари атмосфери розріджені. Найчастіше спостерігаються на березі Середземного моря (рис. 6.7 б). Спостерігаються вони при інверсному розподілі температури: із збільшенням висоти температура зростає (показник заломлення зменшується). У цьому випадку можна бачити предмети, розташовані за горизонтом. А також може спостерігатися і пряме, і обернене зображення.
- 3) *Міражі наддалекого бачення.* Є декілька гіпотез щодо їх виникнення: 1) в результаті неоднорідного прогріву повітря в атмосфері виникають гігантські повітряні лінзи; 2) міражі утворюються іншими міражами.

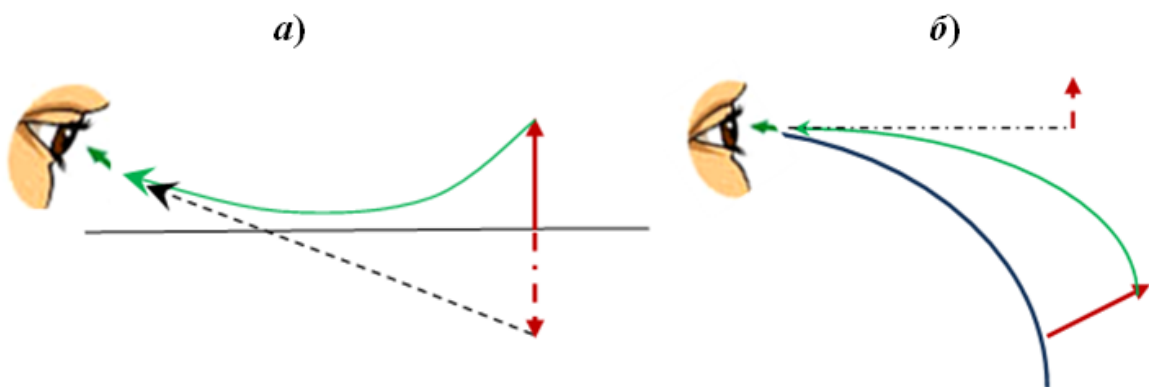


Рис. 6.7. Нижні (а) та верхні (б) міражі

6.3. Контраст

Людська зорова система повинна не лише розпізнавати світло та колір, але і як оптична система бути здатною розрізняти об'єкти або об'єкт та його фон. Відомий як *фізіологічний контраст* або *розрізнення контрасту*, зв'язок між видимою яскравістю двох об'єктів, які видно одночасно (*одночасний контраст*) або послідовно (*послідовний контраст*) на тлі, може бути однаковим або не бути однаковим. У зоровій системі людини контрастність знижується в темряві навколишнього середовища та в осіб, які страждають від дефектів кольорового зору, таких як червоно-зелена кольорова сліпота. Контрастність залежить від біокулярного зору, гостроти зору та обробки зображення зоровою корою головного мозку. Об'єкт з низьким контрастом неможливо відрізнити від фону, якщо він не рухається. Такий об'єкт вважається закамуюфльованим. Однак, люди з дальтонізмом часто здатні виявляти замасковані об'єкти через покращений зоровий зір і втрату оманливих ознак кольору. Збільшення контрасту означає збільшення видимості, а кількісне числове значення контрасту зазвичай виражається у відсотках або співвідношеннях. За оптимальних умов людське око ледь може виявити наявність двовідсоткового контрасту.

За допомогою людського зору очевидне збільшення контрасту сприймається у вузькій зоні з кожного боку межі між двома областями різної яскравості та/або кольоровості. Наприкінці дев'ятнадцятого століття французький фізик Мішель Ежен Шеврель відкрив *симультанний контраст*. Завдяки особливій функції людського зорового сприйняття, краї або контури об'єкта виділяються, відділяючи об'єкт від фону та полегшуючи просторову орієнтацію. При розміщенні на яскравому фоні область на краю темного об'єкта виглядає світлішою від решти фону (по суті, контраст посилюється). За допомогою цього явища сприйняття кольору відбувається з найсильнішим контрастом: ми бачимо додатковий колір, який створюється мозком.

Цей ефект можна продемонструвати наступним прикладом (рис. 6.8).

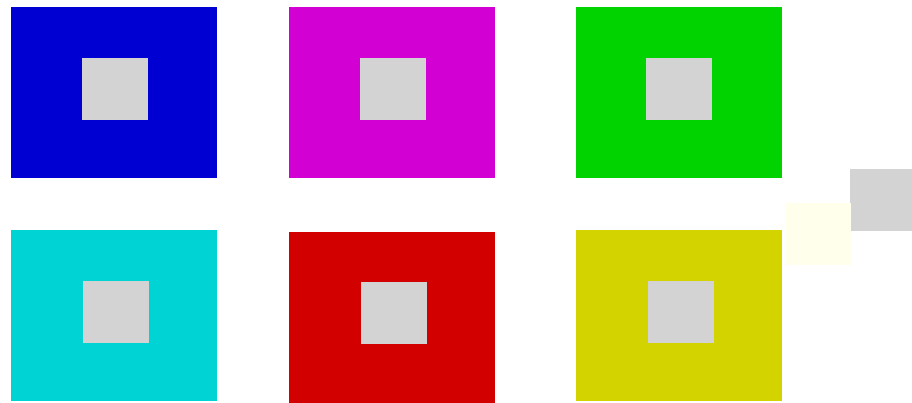


Рис. 6.8. Візуальне сприйняття сірого квадрата на різних кольорових фонах

У квадратах різного кольору зображено однаковий (сірий) квадрат такої ж світлоти (яскравості), як і колірне зображення. Зображення малого квадрата на кожному малюнку для нас виглядає по-іншому. І у всіх випадках є світлішим, ніж він є насправді (сірий квадрат справа на білому фоні).

Подібний ефект спостерігається і на рис. 6.9. У цьому випадку зображено темний квадрат різної світлості на однаковому блідо-рожевому фоні. За рахунок контрасту однаковий фон у різних випадках спостерігається по-різному. У випадку чорного квадрата рожевий фон є світлішим, ніж у випадку сірих (більш світлих) малих квадратів.

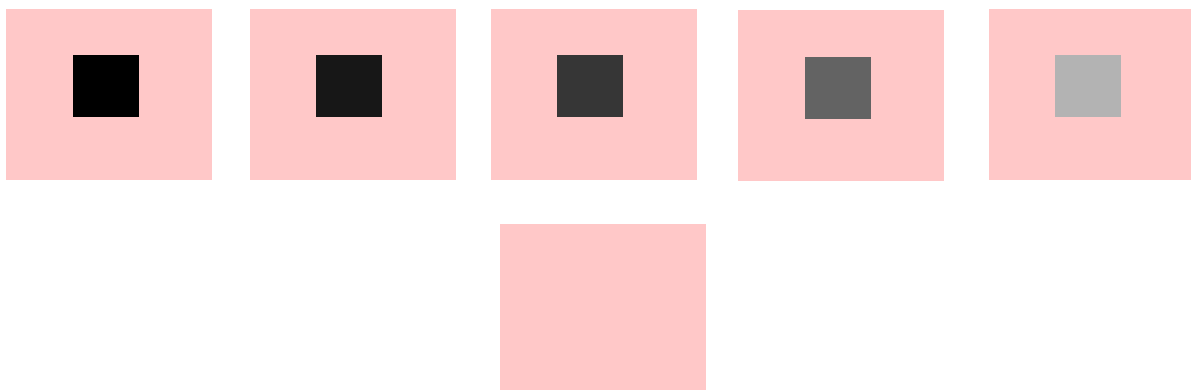


Рис. 6.9. Візуальне сприйняття кольорового фону за наявності різних темних квадратів

6.4. Кольорові асоціації. Емоційний та фізіологічний вплив кольору на людину. Специфіка сприйняття кольору дитиною

Дана тема стосується психологічного сприйняття кольору, а не фізичних та фізіологічних процесів сприйняття світла та кольору. Для майбутнього вчителя важливим є не тільки розуміння природи та закономірностей виникнення, поширення світла, його фізичної та біологічної взаємодії з нашим оком, але й розуміння емоційного впливу світла та кольорів на психофізичний стан людини. У тому числі, звичайно, дуже важливим залишається психофізичне сприйняття кольору дитиною. Причому, це важливо, як для загального фізіологічного здоров'я дитини, так і для засвоєння нею знань. Як було викладено вище, у попередніх темах, власне фізичні закономірності сприйняття світла та кольору є нерозривними із фізіологічним та психологічним сприйняттям. Тому, в принципі, будь-які методики вивчення різних дисциплін для підвищення ефективності навчання повинні враховувати особливості фізики кольору та світла в комплексі з психологічним сприйняттям кольору.

Що таке психологія кольору?

Психологія кольору базується на психічному та емоційному впливі кольорів на зрячих людей у всіх сферах життя. Є кілька дуже суб'єктивних елементів психології кольорів, а також деякі більш прийнятні та перевірені елементи. Слід мати на увазі, що між різними культурами також є значні відмінності в тлумаченні, значенні та сприйнятті кольору.

Застосування психології кольорів у повсякденному житті

Як відомо, оточення може впливати на емоції та настрої людини. Кожна людина зауважувала, що певні місця її особливо дратують, а інші місця по-особливому її заспокоюють. Ймовірно, кольори в цих просторах відіграють не останню роль.

В арт-терапії колір часто асоціюється з емоціями людини. Колір також може впливати на психічний чи фізичний стан людини. Наприклад, дослідження показали, що деякі люди, дивлячись на

червоний колір, в результаті відчувають збільшення частоти серцевих скорочень, що потім призводить до додаткового надходження адреналіну в кров.

Існує також загальноприйнятий психологічний вплив кольору, оскільки він належить до двох основних категорій: теплого і холодного. Теплі кольори, такі як червоний, жовтий і помаранчевий, можуть викликати різноманітні емоції, починаючи від затишку та тепла до ворожості та гніву. Холодні кольори, такі як зелений, синій і фіолетовий, часто викликають відчуття спокою, а також смутку.

Поняття психології кольору також можна застосовувати в повсякденному житті.

Загальні психологічні ефекти кольорів (емоції та асоціації)

Нижче наведено деякі поширені психологічні ефекти кольорів у країнах Європи та Північної Америки.

Білий колір: чистота, невинність, відчуття простору, нейтралітет, у деяких культурах/суспільствах – навпаки, траур.

Чорний колір: авторитет, потужність, сила, зло, інтелект, схуднення, смерть, траур.

Сірий колір: нейтральний, позачасовий, практичний.

Червоний колір: романтика, ніжність, тепло, комфорт, енергія, хвилювання, інтенсивність, життя, кров.

Помаранчевий колір: радість, енергійність, хвилювання, ентузіазм, тепло, багатство, процвітання, витонченість.

Жовтий колір: щастя, сміх, веселощі, тепло, оптимізм, голод, інтенсивність, розчарування, гнів, привертання уваги.

Зелений колір: природність, зростання, гроші, здоров'я, заздрість, спокій, гармонія, плодovitість.

Синій колір: спокій, безтурботність, холод, байдужість, мудрість, лояльність, правда, зосередженість, неапетитність вигляду.

Фіолетовий колір: багатство, витонченість, мудрість, екзотика, духовність, процвітання, повага, таємниця.

Коричневий колір: надійність, стабільність, дружба, смуток, тепло, комфорт, безпека, природність.

Контрольні питання

1. Що таке оптичні ілюзії?
2. Які є оптичні ілюзії?
3. Які кольорні ефекти спостерігаються у випадку різних контрастів?
4. Що таке ілюзія кольору?
5. Які фізичні закономірності лежать в основі можливих оптичних ілюзій?
6. Назвіть основні види міражів.
7. Поясніть причини виникнення нижніх міражів.
8. Яка причина виникнення верхніх міражів?
9. Опишіть, які емоції може викликати той, чи інший колір.
10. Що таке холодні та теплі кольори?
11. Чи узгоджується поняття холодних і теплих кольорів з поняттям колірної температури?

ТЕМА 7. КОЛІРНІ МОДЕЛІ

7.1. Визначення характеристик кольору засобами комп'ютерних технологій. Режими зображення

7.2. Колірні моделі HSV, HSB та HSL.

7.3. Колірна модель CMYK.

7.1. Визначення характеристик кольору засобами комп'ютерних технологій. Режими зображення

Режим зображення визначає кількість кольорів, які можна відобразити на зображенні, а також може впливати на розмір файлу зображення. Наприклад, Photoshop Elements пропонує чотири режими зображення: RGB, растровий, градації сірого та індексований колір. У Word передбачено дві колірні моделі: RGB та HSL.

Растровий режим

Використовується одне з двох значень кольору (чорний або білий) для представлення пікселів у зображенні. Зображення в растровому режимі називаються однобітовими зображеннями, оскільки вони мають бітову глибину 1. У цифрових зображеннях піксель – це найменший елемент у растровому зображенні або найменший адресний елемент у матричному дисплеї. У більшості цифрових пристроїв відображення пікселя є найменшим елементом, яким можна керувати за допомогою програмного забезпечення.

Режим відтінків сірого

Використовує до 256 відтінків сірого. Зображення у відтінках сірого є 8-бітними. Кожен піксель у зображенні у відтінках сірого має значення яскравості в діапазоні від 0 (чорний) до 255 (білий). Значення відтінків сірого також можна виміряти у відсотках покриття чорного чорнила (0% дорівнює білому, 100% – чорному).

Режим індексованих кольорів

Використовує до 256 кольорів. Зображення з індексованими кольорами є 8-бітними. Під час перетворення в індексований колір Photoshop Elements створює таблицю пошуку кольорів (CLUT), яка зберігає та індексує кольори зображення. Якщо колір вихідного зображення не відображається в таблиці, програма вибирає найближчий або моделює колір за допомогою доступних кольорів. Обмежуючи панель кольорів, індексований колір може зменшити розмір файлу, зберігаючи візуальну якість, наприклад, для веб-сторінки. У цьому режимі доступне обмежене редагування.

Колірний режим RGB

У режимі RGB червоній, зеленій та синій компонентам призначається значення інтенсивності для кожного пікселя: від 0 (чорний) до 255 (білий), тобто 256 можливих значень. Наприклад, червоному кольору відповідає значення $R = 255$, $G = 0$, $B = 0$ (рис. 7.1). Для отримання насиченого вторинного кольору (жовтого, блакитного чи пурпурового), потрібно двом основним кольорам присвоїти максимальне значення, а третьому 0 (рис 7.1, жовтий та блакитний колір). У випадку, коли всі три значення (R , G , B) будуть однаковими, отримаємо ахроматичний колір від чорного (всі значення рівні нулю) до білого (всі значення рівні 255). У випадку проміжних значень отримаємо сірий колір різної світлоти (рис. 7.1, сірий колір).

Таким чином, кількість можливих кольорів та їх відтінків різної насиченості та яскравості в RGB-режимі становить:

$$256 \cdot 256 \cdot 256 = 16\,777\,216.$$

Таким чином, змінюючи вищезгадані три параметри, можна отримати величезний спектр кольорів. Наприклад, яскраво-червоний колір може мати значення $R = 246$, значення $G = 20$ і значення $B = 50$ (рис. 7.2).

Колірні моделі

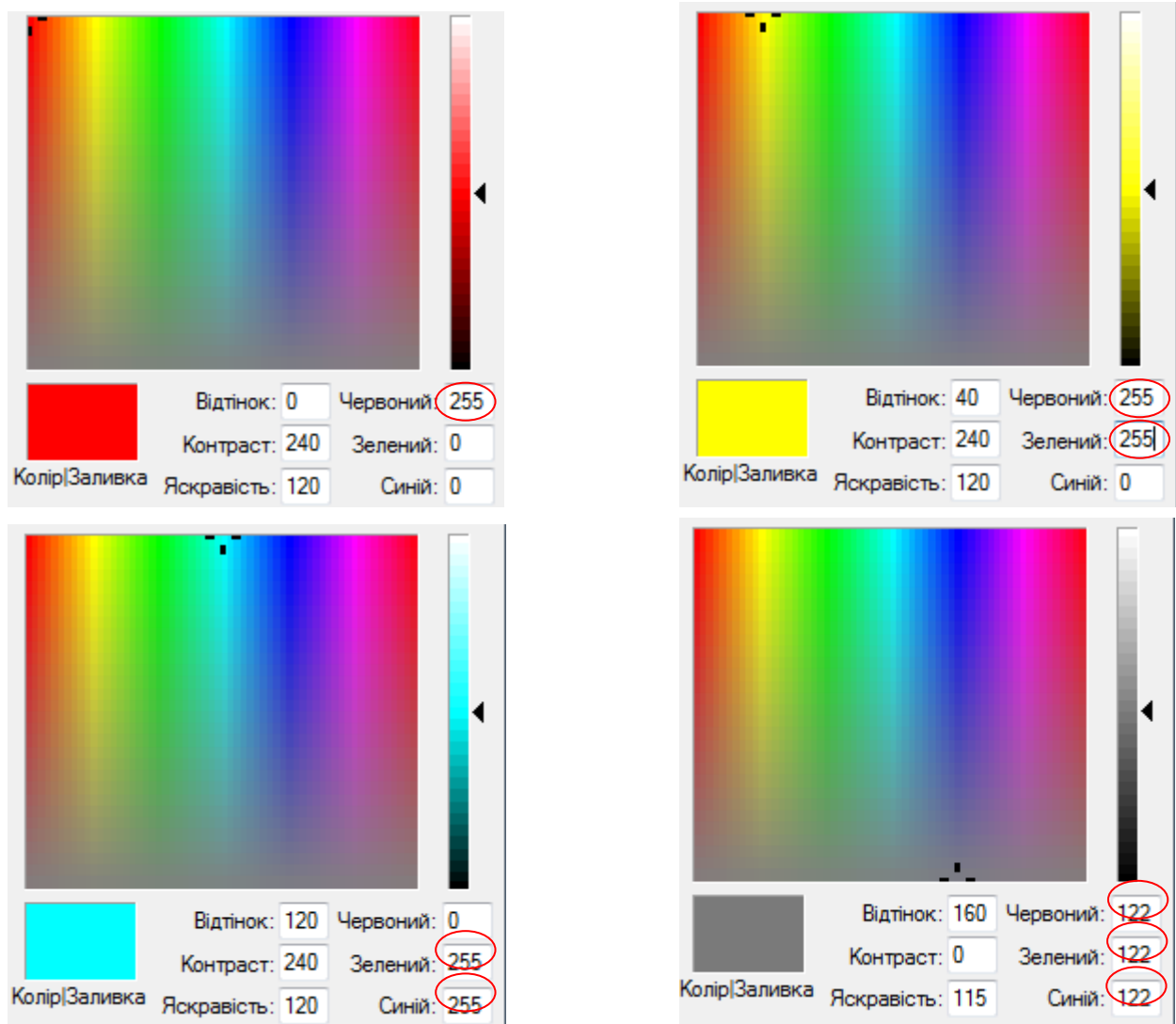


Рис. 7.1. Використання колірної RGB-моделі в Paint

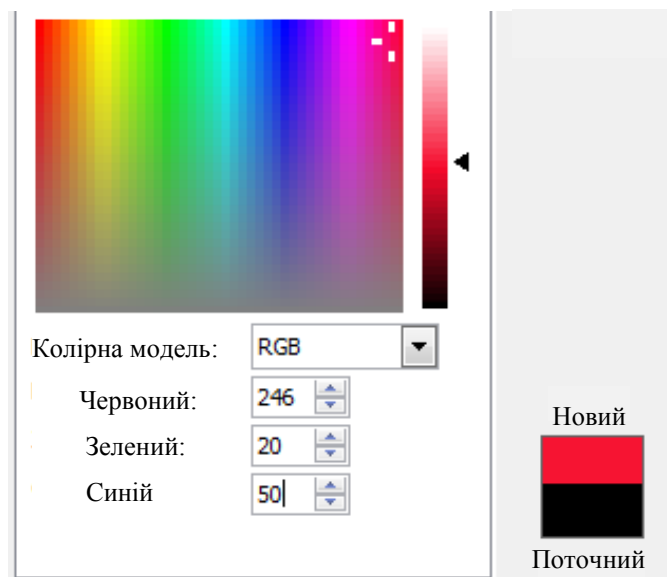


Рис. 7.2. Використання колірної RGB-моделі в WORD

7.2. Колірні моделі HSV, HSB та HSL

Модель **HSV** (абревіатура англійських слів *Hue, Saturation, Value*, що означають, відповідно, колірний тон, насиченість кольору та значення, або модель **HSB** (абревіатура англійських слів *Hue, Saturation, Brightness* (яскравість)) – це колірні моделі, в яких координатами кольору є такі параметри:

- *Колірний тон* – один із спектральних кольорів (або їх суміш);
- *Насиченість кольору* – визначає ступінь присутності білого кольору. Максимальна насиченість відповідає чистому кольору. Мінімальна насиченість – це сірий або, в граничних випадках, чорний чи білий колір;
- *Значення або Яскравість* (для моделі HSB): найбільше значення відповідає найбільш світлому яскравому кольору, а зменшення призводить до потемніння кольору з плавним переходом до чорного.

Дані моделі є нелінійними перетвореннями моделі RGB. Колір, який задається у HSV, визначається пристроєм. Представлені моделі переважно використовують в графічних редакторах. Наприклад, в Paint (рис. 7.1). Параметр *відтінок* приймає значення від 0 до 239, а *контраст* та *яскравість* від 0 до 240.

Вважається, що моделі HSV та HSB є кращими для сприйняття кольору людиною, ніж відомі вже нам RGB і CMYK, які задають кольори як комбінацію трьох кольорів.

Дуже подібною до цих моделей є колірна модель HSL (абревіатура англійських слів *Hue, Saturation, Lightness*). Тут колірними координатами є колірний тон, насиченість і світлота (хоча в українській термінології досить часто використовують термін *яскравість*).

З такою моделлю можемо зустрітися у WORD. Всі три параметри, аналогічно, як і у випадку RGB-моделі, приймають значення від 0 до 255. Можливо, ця модель для початківців є зрозумілішою, оскільки очевидно, – для того, щоб змінити колір, потрібно змінювати *тон*. Щоб

змінити яскравість (світлість), змінюємо значення потрібним чином цього параметра. Очевидною перевагою є те, що не потрібно визначати, які кольори потрібно змішати для отримання заданого тону.

7.3. Колірна модель СМҮК

Модель кольору СМҮК (Cyan, Magenta, Yellow, Key або Black) використовується в поліграфії, графічних програмах, які призначені для професійного друку, таких як Adobe Photoshop, Adobe Illustrator, Adobe InDesign, CorelDRAW та багатьох інших.

СМҮК-модель є стандартом для друку, оскільки вона дозволяє точніше відтворити кольори у друкованих матеріалах. Канали СМҮК-моделі відповідають за відтінки блакитного (Cyan), пурпурового (Magenta), жовтого (Yellow) та чорного (Key), який зазвичай відповідає за додаткову глибину та деталізацію в зображенні.

При створенні дизайну для друку важливо використовувати СМҮК модель, оскільки кольори, створені в RGB або інших моделях, можуть виглядати інакше в надрукованих матеріалах.

Для чого потрібен чорний колір, якщо ми знаємо, що в результаті змішування пурпурової, блакитної та жовтої фарб, отримують чорний колір? Насправді досить важко досягти потрібної пропорції цих кольорів, щоб забезпечити якісний друк.

Величини С, М, Y, К вимірюються у відсотках, і, відповідно, приймають значення від 0 до 100 (рис. 7.3). На рис. 7.3 зображено синій колір, який в СМҮК-моделі є вторинним та комбінуванням блакитного та пурпурового кольорів, а також темно-зелений, який містить 33% чорного кольору. На цьому ж рисунку приведено відповідні значення даних кольорів в RGB-моделі та СМҮК-моделі.

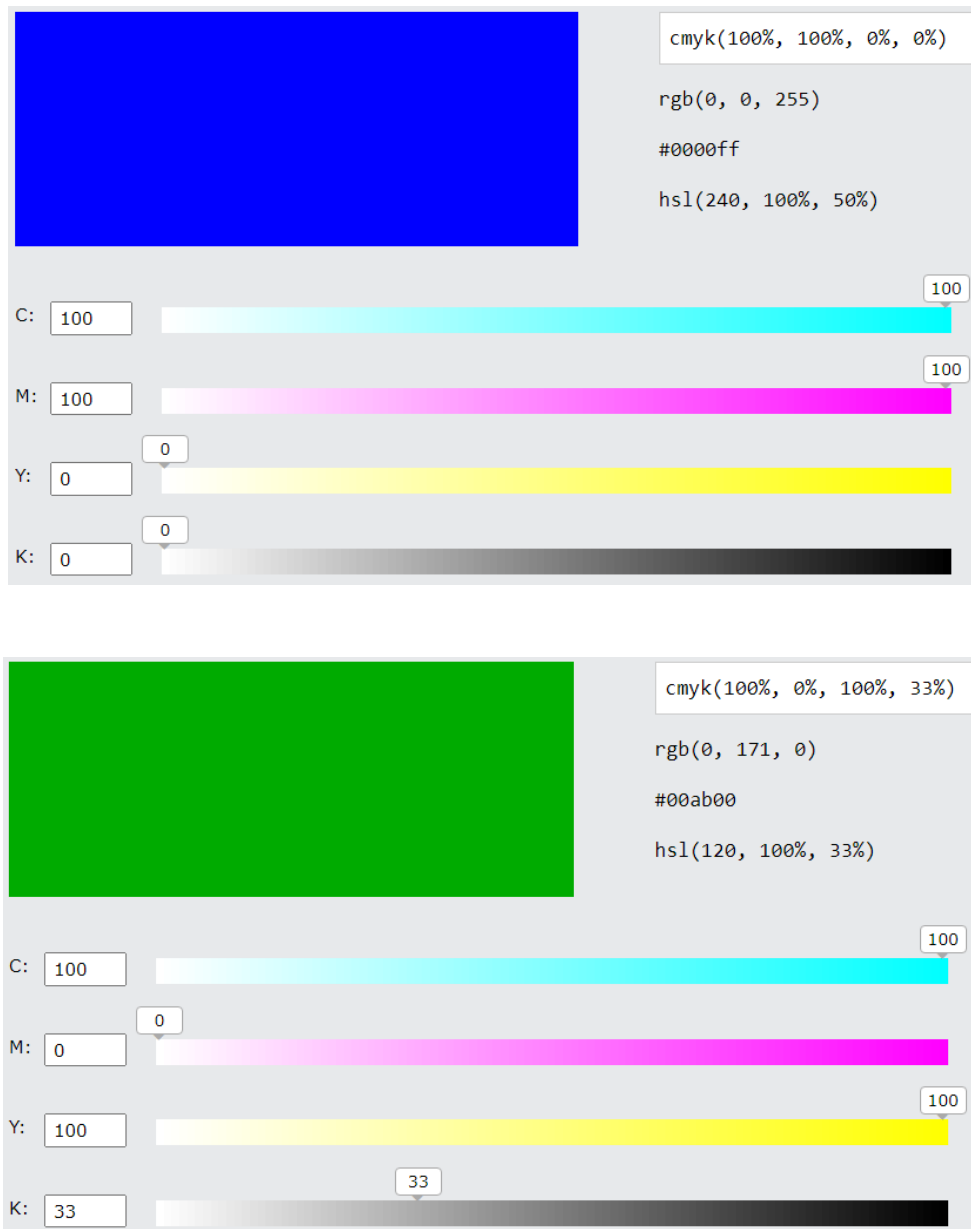


Рис. 7.3. Відображення кольорів в СМУК-моделі

Контрольні питання

1. Які є режими зображення?
2. Що таке растровий режим?
3. Які існують колірні моделі?
4. Назвіть недоліки та переваги основних колірних моделей.
5. Де використовують відповідні колірні моделі?

ВПРАВИ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

1. Фотони та електромагнітні хвилі

1. Помаранчеве чи червоне світло має більшу частоту?
2. Фіолетове чи зелене світло має більшу довжину хвилі?
3. Квант фіолетового чи червоного світла має більшу енергію?
4. Імпульс фотона зеленого світла більший чи менший, ніж імпульс фотона жовтого світла?
5. Розташуйте в порядку зростання енергії кванта світло-жовтого, червоного, фіолетового та зеленого світла.
6. Розташуйте в порядку спадання імпульсу фотона: х-випромінювання, інфрачервоне випромінювання, ультрафіолетове випромінювання, синє світло, зелене світло.
7. Для видимого випромінювання з довжиною хвилі 555 нм розрахуйте частоту, енергію кванта, імпульс фотона.
8. Оцініть, у скільки разів відрізняється енергія кванта зеленого та ультрафіолетового випромінювання.
9. Визначте, в якому інтервалі знаходиться енергія кванта червоного світла, синього світла.
10. У скільки разів відрізняється маса фотона червоного світла та фіолетового світла від маси електрона?
11. Порівняйте масу фотона х-випромінювання з масою фотона червоного світла.
12. Визначте колір світла, якщо відомо, що енергія фотона є в 200000 разів меншою, ніж енергія спокою електрона.
13. Через який час радіосигнал, надісланий із Землі на Місяць, повернеться назад, якщо відстань від Землі до Місяця 384400 км ?

2. Дисперсія світла. Поглинання та відбивання світла

1. Побудуйте хід променів білого світла через плоскопаралельну пластину. Чому на виході світло не розкладається в спектр, як при проходженні через трикутну призму?
2. Побудуйте хід променів через трикутну скляну призму для монохроматичного світла.
3. Побудуйте хід променів через трикутну скляну призму для білого світла з урахуванням залежності показника заломлення від довжини хвилі.
4. Поясніть виникнення кольорів райдуги.
5. Білий і чорний – це кольори світла?
6. Назвіть три основні кольори світла:
 - а) білий, чорний, сірий;
 - б) синій, зелений, жовтий;
 - в) червоний, синій, зелений;
 - г) червоний, синій, жовтий;
 - д) існує більше, ніж три, основних кольорів світла.
7. Назвіть три вторинні кольори світла:
 - а) блакитний, пурпуровий, зелений;
 - б) блакитний, пурпуровий і жовтий;
 - в) помаранчевий, жовтий, фіолетовий;
 - г) червоний, синій, жовтий;
 - д) існує більше трьох вторинних кольорів світла.
8. Поєднання червоного та зеленого світла (рівної інтенсивності) дає _____ світло.
9. Поєднання червоного та синього світла (рівної інтенсивності) дає _____ світло.
10. Поєднання синього та зеленого світла (рівної інтенсивності) дає _____ світло.
11. Поєднання червоного, синього та зеленого світла (рівної інтенсивності) дає _____ світло.

12. Поєднання синього та жовтого світла (рівної інтенсивності) дає _____ світло.
13. Продемонструйте розуміння віднімання кольорів, виконавши наведені нижче кольорові рівняння:
- а) Білий – Синій =
 - б) Білий – Червоний =
 - в) Білий – Зелений =
 - г) Білий – Синій – Зелений =
 - д) Білий – Жовтий =
 - е) Червоний + Зелений – Зелений =
 - є) Жовтий – Зелений =
 - ж) Жовтий – Червоний =
 - з) Білий – Пурпуровий =
 - и) Білий – Блакитний =
 - і) Жовтий + Синій - Блакитний =
 - й) Жовтий + Блакитний + Пурпуровий =
 - к) Жовтий + Блакитний – Пурпуровий =
14. Світлофільтр виконує функцію:
- а) віднімання кольору(ів) від світла, яке падає на нього;
 - б) додавання кольору(ів) до світла, яке падає на нього;
 - в) видалення нікотину зі світла, щоб ми могли жити довше;
 - г) збільшення розмірів об'єктів, які ми бачимо через світлофільтр.
15. Який колір ви побачите, дивлячись крізь червоний фільтр на жовте світло?
16. Який колір ви побачите, дивлячись крізь синій фільтр на жовте світло?
17. Який колір ви побачите, дивлячись крізь жовтий фільтр на пурпурове світло?
18. Жовтий фільтр поглинає _____ світло.
19. Пурпуровий фільтр поглинає _____ світло.
20. Білий об'єкт освітлюється білим світлом і розглядається через зелений фільтр. Об'єкт буде _____ кольору.

-
21. Білий предмет освітлюється білим світлом і розглядається через блакитний фільтр. Об'єкт буде _____ кольору.
 22. Синій об'єкт освітлюється білим світлом і розглядається через зелений фільтр. Об'єкт буде _____ кольору.
 23. Блакитний об'єкт освітлюється білим світлом і розглядається через синій фільтр. Об'єкт буде _____ кольору.
 24. Блакитний об'єкт освітлюється білим світлом і розглядається через зелений фільтр. Об'єкт буде _____ кольору.
 25. Жовтий об'єкт освітлюється білим світлом і розглядається через зелений фільтр. Об'єкт буде _____ кольору.
 26. Жовтий об'єкт освітлюється білим світлом і розглядається через пурпуровий фільтр. Об'єкт буде _____ кольору.
 27. Жовтий об'єкт освітлюється білим світлом і розглядається через пурпуровий фільтр. Об'єкт буде _____ кольору.
 28. Жовтий об'єкт освітлюється жовтим світлом і розглядається через синій фільтр. Об'єкт буде _____ кольору.
 29. Жовтий об'єкт освітлюється синім світлом і розглядається через жовтий фільтр. Об'єкт буде _____ кольору.
 30. Синій об'єкт освітлюється синім світлом і розглядається через жовтий фільтр. Об'єкт буде _____ кольору.
 31. Жовтий об'єкт освітлюється жовтим світлом і розглядається через червоний фільтр. Об'єкт буде _____ кольору.
 32. Жовтий об'єкт освітлюється жовтим світлом і розглядається через зелений фільтр. Об'єкт буде _____ кольору.
 33. Жовтий об'єкт освітлюється зеленим світлом і розглядається через жовтий фільтр. Об'єкт буде _____ кольору.
 34. Жовтий об'єкт освітлюється зеленим світлом і розглядається через зелений фільтр. Об'єкт буде _____ кольору.
 35. Жовтий об'єкт освітлюється зеленим світлом і розглядається через червоний фільтр. Об'єкт буде _____ кольору.
 36. Жовтий об'єкт освітлюється зеленим світлом і розглядається через блакитний фільтр. Об'єкт буде _____ кольору.

37. Червоний об'єкт освітлюється жовтим світлом і розглядається через блакитний фільтр. Об'єкт буде _____ кольору.
38. Поясніть, чому небо синє.
39. Поясніть, чому сонце червоне, коли заходить.
40. Точка A знаходиться на $1,5 \text{ мкм}$ ближче до одного когерентного джерела світла, ніж до іншого. Визначте, для яких кольорів світла в точці A може спостерігатися максимум інтерференції. Скористайтеся даними таблиці 1.
41. Світло падає нормально на тонку плівку товщиною $0,5 \text{ мкм}$ з показником заломлення $1,4$. Плівка знаходиться на скляній поверхні з показником заломлення $1,5$. Якого кольору буде пластинка у відбитому світлі?
42. Визначте найменшу товщину мильної плівки, якщо при спостереженні у відбитому світлі вона виглядає синьо-зеленого кольору ($\lambda = 475 \text{ нм}$), коли кут між нормаллю до плівки і променем зору складає 0° ? Показник заломлення мильної води $n = 1,33$.
43. Визначте період дифракційної ґратки, щоб у напрямку $\varphi = 41^\circ$ співпадали максимуми двох ліній: $656,3 \text{ нм}$ (червоне світло) і $410,3 \text{ нм}$ (фіолетове світло).
44. На дифракційну ґратку, яка має період $0,002 \text{ мм}$, нормально падає світло, яке пропустили через світлофільтр, що здатен пропускати тільки хвилі довжиною від 500 нм до 600 нм . Встановіть, чи накладуться один на одного спектральні лінії різних порядків.
45. На дифракційну ґратку з періодом $0,002 \text{ мм}$ перпендикулярно падає світло, яке пропустили через світлофільтр, що здатен пропускати тільки хвилі довжиною від $0,5 \text{ мкм}$ до $0,6 \text{ мкм}$. Встановіть, чи накладатимуться один на одного спектральні смуги різних порядків.
46. У скільки разів інтенсивність молекулярного розсіювання синього світла ($\lambda_1 = 460 \text{ нм}$) переважає інтенсивність розсіювання червоного світла ($\lambda_2 = 650 \text{ нм}$)?




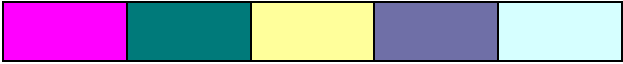
3. Основи фотометрії

1. У скільки разів у Дрогобичі освітленість поверхні Землі 22 грудня менша, ніж 22 червня? Висота Сонця над горизонтом опівдні 22 червня дорівнює 64° , а 22 грудня – 17° .
2. На одному кінці метрової лінійки знаходиться лампочка силою світла 16 кд , а на другому кінці – лампочка силою світла 9 кд . Де потрібно розташувати екран між лампочками, щоб він був однаково освітлений з обох сторін?
3. На одному кінці метрової лінійки розміщене точкове джерело силою світла 1 кд , а на другому кінці лінійки знаходиться лампочка з невідомою силою світла. Екран однаково освітлений з обох сторін, коли він знаходиться на відстані 10 см від джерела з відомою силою світла. Обчислити силу світла лампочки.
4. Діаметр матової сферичної колби електричної лампочки 6 см . Знайти світність і яскравість цієї лампи, якщо вона дає силу світла 100 кд .
5. Обчисліть і порівняйте між собою сили світла розжареної до білого кольору металеві кульки яскравістю $3 \cdot 10^6 \text{ кд/м}^2$ і світильника у вигляді кулі яскравістю $3 \cdot 10^3 \text{ кд/м}^2$, якщо радіуси кульки і світильника відповідно дорівнюють 1 мм та 10 см .






4. Змішування кольорів

1. Чим оптичне змішування відрізняється від змішування барвників?
2. Які кольори є основними при механічному змішуванні?
3. Які кольори є вторинним при механічному змішуванні?
4. Який колір отримують при змішуванні жовтого та блакитного барвника?
5. Який колір отримують при змішуванні пурпурового та блакитного барвника?






6. Який колір отримують при змішуванні жовтого та пурпурового барвника?
7. Який колір отримують при змішуванні жовтого, блакитного та пурпурового барвника?
8. На білу поверхню наносять жовтий та блакитний барвник. Після цього поверхню розглядають через зелений світлофільтр. Якого кольору буде поверхня?
9. На білу поверхню наносять жовтий та блакитний барвник. Після цього поверхню розглядають через синій світлофільтр. Якого кольору буде поверхня?
10. На білу поверхню наносять жовтий та зелений барвник. Після цього поверхню розглядають через пурпуровий світлофільтр. Якого кольору буде поверхня?
11. На білу поверхню наносять жовтий та зелений барвник. Після цього поверхню розглядають через блакитний світлофільтр. Якого кольору буде поверхня?
12. На блакитну поверхню наносять зелений барвник. Якого кольору буде поверхня в білому світлі?
13. На блакитну поверхню наносять зелений барвник. Якого кольору буде поверхня в зеленому світлі?
14. На блакитну поверхню наносять зелений барвник. Якого кольору буде поверхня в жовтому світлі?
15. Запишіть колірне рівняння для жовтого кольору.
16. Запишіть колірне рівняння для пурпурового кольору.
17. Запишіть колірне рівняння для жовто-зеленого кольору.
18. Встановіть відповідність між характеристиками кольору та малюнком, який відображає дану величину:

1. Колірний тон	А	
2. Насиченість	Б	
3. Яскравість	В	
	Г	

19. Встановіть відповідність між коефіцієнтами колірної рівняння (RGB-модель) та кольором:

- | | | |
|----------------------|---|--|
| 1. $(1; 0; 0)$ | А |  |
| 2. $(0,5; 0; 0,5)$ | Б |  |
| 3. $(0,5; 0,5; 0)$ | В |  |
| 4. $(0,2; 0,2; 0,6)$ | Г |  |
| | Д |  |

20. Встановіть відповідність між коефіцієнтами колірної рівняння (RGB-модель) та кольором:

- | | | |
|--------------------|---|--|
| 1. $(r; 0; 1)$ | А |  |
| 2. $(0; g; 0,5)$ | Б |  |
| 3. $(0,4; 0,1; b)$ | В |  |
| 4. $(0,3; 0,3; b)$ | Г |  |
| | Д |  |

21. Менша насиченість природних кольорів порівняно із спектральними обумовлена:

А – коефіцієнт відбивання світла для більшості довжин хвиль видимого діапазону є більшим за нуль;

Б – коефіцієнт відбивання світла для всіх спектральних кольорів, окрім одного, дорівнює нулю;

В – всі спектральні кольори, окрім одного, поглинаються;

Г – коефіцієнт поглинання світла для більшості довжин хвиль видимого діапазону дорівнює нулю.

22. Яскравість кольору визначається:

А – часткою світла даного кольору, яка поглинається поверхнею;

Б – часткою світла відбитого від поверхні, яка має даний колір, порівняно з білою поверхнею;

В – часткою білого світла в даному кольорі;

Г – довжиною електромагнітної хвилі, яка відповідає даному кольору.

5. Температура і колір

1. Істинне чи хибне твердження: чорне тіло є ідеальним поглиначем і випромінювачем випромінювання.
2. Як називають температуру випромінювання чорного тіла, при якій воно має той самий колір, що й випромінювання, яке розглядається?
3. Який колір матиме чорне тіло при температурі 5000 K?
4. Істинне чи хибне твердження: колір світіння чорного тіла залежить від його хімічного складу.
5. Істинне чи хибне твердження: світіння чорного тіла неперервне й охоплює всі довжини хвиль.
6. Якщо об'єкт не випромінює на певній довжині хвилі, то що можна сказати про поглинання цим тілом в цій же ділянці спектра?
7. Істинне чи хибне твердження: чорне тіло однаково випромінює випромінювання на всіх довжинах хвиль.
8. Яке тіло яскравіше світиться за однакових параметрів: біле чи чорне?
9. Яке тіло більше випромінює енергії за одиницю часу з одиниці площі поверхні за однакової температури: чорне чи нечорне?
10. Яка поглинальна здатність абсолютно чорного тіла?
11. Знайдіть довжину хвилі, яка відповідає максимуму випромінювальної здатності, якщо його температура дорівнює 4500 K.
12. Розрахуйте кількість енергії, яка випромінюється поверхнею, площею 2 м^2 за 5 с, якщо температура поверхні 300 K. Тіло вважайте абсолютно чорним.
13. Оцініть, якого кольору буде тіло, з поверхні якого площею 2 см^2 випромінюється енергія 8 кДж за 4 с.
14. Встановіть, як зміниться колір розжареного тіла, максимум випромінювальної здатності якого припадає на довжину хвилі 650 нм, після його нагрівання на 1000 K.

-
15. Яке тіло швидше нагрівається під дією світла: прозоре чи непрозоре?
 16. При збільшенні температури вдвічі, максимум випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла змістився на 500 *нм*. Як змінився колір випромінювання?

6. Моделювання змішування кольорів за допомогою RGB та HSL-палітри

1. Використовуючи RGB-палітру, у Word побудуйте три геометричні фігури (прямокутники чи коло) та зафарбуйте їх основними кольорами.
2. Використовуючи RGB-палітру, у Word побудуйте три геометричні фігури (прямокутники чи коло) та зафарбуйте їх додатковими кольорами.
3. Використовуючи RGB-палітру, у Word побудуйте п'ять однакових квадратів. Один із них зафарбуйте спектральним зеленим кольором, а інші – з меншою насиченістю (в порядку спадання насиченості до нуля). Яке фізичне явище пояснює наявність різної насиченості одного й того ж кольору?
4. Використовуючи RGB-палітру, у Word побудуйте п'ять однакових квадратів. Один з них зафарбуйте спектральним зеленим кольором, а інші – з меншою яскравістю (світлотою). Яке фізичне явище пояснює наявність різної яскравості (світлоти) одного й того ж кольору?
5. Використовуючи RGB-палітру, у Word побудуйте п'ять однакових квадратів. Зафарбуйте їх сірим кольором з різною яскравістю (світлотою). Поясніть існування сірого кольору з точки зору фізики.
6. Використовуючи RGB-палітру, у Word побудуйте п'ять однакових квадратів. Зафарбуйте їх пурпуровим кольором із максимальною яскравістю та різними відтінками.

7. Використовуючи HSL-палітру, у Word побудуйте три геометричні фігури (прямокутники чи коло) та зафарбуйте їх основними кольорами.
8. Використовуючи HSL-палітру, у Word побудуйте три геометричні фігури (прямокутники чи коло) та зафарбуйте їх додатковими кольорами.
9. Використовуючи HSL-палітру, у Word побудуйте п'ять однакових квадратів. Один з них зафарбуйте спектральним синім кольором, а інші – з меншою насиченістю (в порядку спадання насиченості до нуля). Яке фізичне явище пояснює наявність різної насиченості одного й того ж кольору?
10. Використовуючи HSL-палітру, у Word побудуйте п'ять однакових квадратів. Один з них зафарбуйте спектральним зеленим кольором, а інші – з меншою світлотою. Яке фізичне явище пояснює наявність різної яскравості (світлоти) одного й того ж кольору?
11. Використовуючи HSL-палітру, у Word побудуйте п'ять однакових квадратів. Зафарбуйте їх сірим кольором з різною яскравістю (світлотою). Поясніть існування сірого кольору з точки зору фізики.
12. Використовуючи HSL-палітру, у Word побудуйте п'ять однакових квадратів. Зафарбуйте їх пурпуровим кольором з максимальною яскравістю та різними відтінками.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бушок Г.Ф., Венгер Є.Ф. Курс фізики. Книга 2. Оптика. Фізика атома і атомного ядра. – К. : Либідь, 2001. – 421 с.
2. Гаркуша І.П., Горбачук І.Т., Курінний В.П. Загальний курс фізики : збірник задач. – К. : Техніка, 2003. – 560 с.
3. Дудяк В.О., Занько Н.В., Сельменська З. М. Природа кольору та його характеристики. – Львів : Українська академія друкарства, 2013. – 208 с.
4. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики. Т. 3. Оптика. Квантова фізика. – К. : Техніка, 2005. – 518 с.
5. Татарчук Т.Р., Сіренко Г.О., Старко І.Ю. Математичний апарат системи колірному простору CIE L*a*b* // Математичні методи в хімії і біології. – 2014. – Т. 2. – № 1. – С. 127–136.
6. Печенюк Т. Кольорознавство. – К. : Грані-Т, 2009. – 192 с.
7. Gunther L. The Physics of Music and Color. – Springer, 2012. – 548 p.
8. Kinoshita S. Physics of structural colors // Report Progress in Physics. – 2008. – V. 71. – P. 076401: 1–9.
9. Nassau K. The fifteen causes of color: The physics and chemistry of color // Color Research and Application. – 1987. – V. 12 (1). – P. 4–27.
10. Sharma G. Digital Color Imaging Handbook. – New York : CRC Press, 2003. – 764 p.

Електронне навчально-методичне видання

**Олег Кузик,
Олеся Даньків**

ФІЗИКА КОЛЬОРУ ТА СВІТЛА

**Дрогобицький державний педагогічний університет
імені Івана Франка**

Редактор
Ірина Невмержицька
Технічний редактор
Лужецька Ольга
Коректор
Артимко Ірина

Здано до набору 25.05.2023 р. Формат 60x90/16. Гарнітура Times. Ум. друк.
арк. 9,125. Зам. 39.

Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка.
(Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру
видавців, виготівників та розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5140
від 01.07.2016 р.). 82100, Дрогобич, вул. Івана Франка, 24, к. 31.