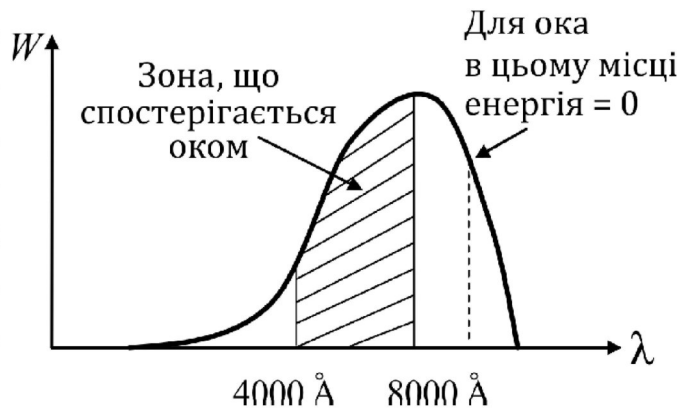


Лекція 2. Світло та його характеристики. Основні енергетичні та світлові величини. Фотометрія

Фотометрія – це розділ оптики, який визначає енергетичні величини, що характеризують світлові явища, а також встановлює засоби їх вимірювання.

Будь-яке тіло за будь-яких умов випромінює енергію. Потужність цього випромінювання, тобто енергія, яка випромінюється за одну секунду, оцінюється потоком її та вимірюється у Вт (ватах). Але не всякий вид променевої енергії викликає світлове відчуття (наприклад: розжарена праска).



Найбільш відчутний для ока діапазон – зона зелених хвиль $\lambda = 5600 \text{ \AA}$. Якщо ми маємо ту саму енергію, але для червоного світла, то вона створить менше зорове відчуття, ніж зелена. Через це поряд з енергетичними величинами вводять ще й світлові.

Потік променевої енергії. Світловий потік Φ являє собою повну енергію, яку опромінює тіло, що світиться, за 1 с, вимірюється у ватах, це фактично потужність.

Сила світла чисельно дорівнює світловому потоку, який припадає на одиничний тілесний кут.

Якщо ми маємо точкове джерело світла S , світло від якого поширюється в усіх напрямках, то за тілесний кут приймаємо кут при вершині конуса, утворююча якого $r = 1 \text{ см}$, а площа основи S . Одиницею тілесного кута є стерadian.

1 стерadian – це тілесний кут, що вирізає на сфері площу, яка дорівнює площі квадрата зі стороною, що дорівнює радіусу сфери.

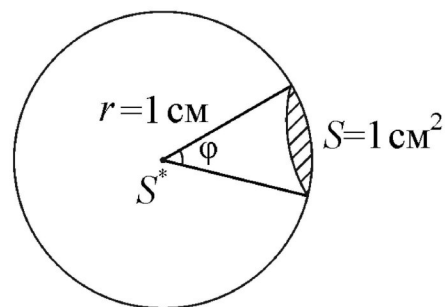


Рис. 1.2

Вважаючи джерело світла ізотропним (тобто його сила світла в усіх напрямках однакова), маємо:

$$I = \frac{\Phi}{\omega}; \quad I = \frac{d\Phi}{d\omega}; \quad I = \frac{\Phi}{4\pi}; \quad \Phi = 4\pi I; \quad (1.1)$$

$$I = \frac{\text{ват}}{\text{стерадіан}} = \frac{\text{Вт}}{\text{ср}},$$

де $d\Phi$ – нескінченно малий світловий потік,
 $d\omega$ – тілесний кут.

Допустимо тепер, що є джерело скінченних розмірів, наприклад, розжарене тверде тіло. Виділимо на ньому елемент поверхні dS . Нехай $d\Phi$ – світловий потік, який випромінюється цією поверхнею dS в усіх напрямках (в межах тілесного кута 2π). Тоді величина R називається світністю поверхні dS .

$$R = \frac{d\Phi}{dS}. \quad (1.2)$$

Світність чисельно дорівнює повному світловому потоку, який випромінюється з одиниці поверхні тіла, яке світиться ($\text{Вт}/\text{м}^2$).

Світловий потік може випромінюватися тілами також у результаті розсіювання чи відбивання від них побічного світла. Через це при розгляді багатьох задач необхідно знати, яка кількість світлового потоку падає на ту чи іншу частину освітленого тіла, тому вводиться величина, яка називається освітленістю.

Освітленість

$$E = \frac{d\Phi}{dS}, \quad (1.3)$$

де $d\Phi$ – потік, який падає на площу dS .

Освітленість чисельно дорівнює повному світловому потоку, що падає на одиницю поверхні тіла, яке освітлене ($\text{Вт}/\text{м}^2$).

Зрозуміло, що світність тіла, яке є самостійним джерелом світлових коливань, не пов'язана з його освітленістю. Навпаки, світність тіла, яке випускає світло за рахунок розсіювання або відбивання ним падаючих променів, визначається його освітленістю. Чим більше E , тим більше й R .

$$R = kE, \quad (1.4)$$

де k – коефіцієнт розсіювання (відбивання).

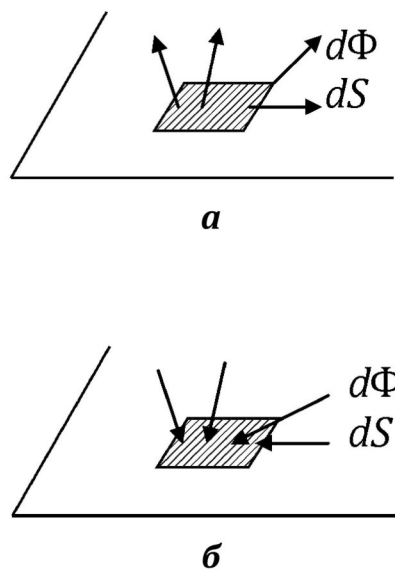


Рис. 1.3

Для всіх реальних тіл $k < 1$. Більшість тіл селективно розсіюють світло, тобто k для них різне для різних довжин хвиль. Такі тіла здаються нам «пофарбованими». Якщо на такі тіла падає біле світло, то розсіяне світло відрізняється за своїм складом від білого і викликає певне кольорове відчуття. Білим називається тіло, у якого коефіцієнт k досить близький до одиниці та постійний для всіх довжин хвиль у межах видимого світла. Чорним називається тіло, яке має для всіх довжин хвиль однаковий набагато менший за одиницю коефіцієнт k . Для поверхні, яка вкрита шаром магnezії, або для поверхні снігу, який щойно випав, k може досягати значення 0,9 і більше. Для чорних матових поверхонь $k \approx 0,01$.

Тіла, які мають різні коефіцієнти розсіювання k , при одній і тій же освітленості мають різну світність.

Розглянемо, яку освітленість створює точкове джерело силою світла I на поверхні, яка знаходиться від нього на відстані r . Нехай S – точкове джерело світла, dS – освітлена ним площа. Допустимо, що радіус-вектор r , проведений від джерела світла до середини площі dS , складає з нормаллю до площі кут i .

Тілесний кут, під яким видно площу з місця розташування джерела – $d\Omega$, тоді потік, який падає від джерела світла на поверхню dS , дорівнює: $d\Phi = Id\Omega$, але $d\Omega = \frac{dS}{r^2} \cos i$, звідки $d\Phi = dS \frac{I}{r^2} \cos i$, звідси

$$E = \frac{I}{r^2} \cos(r, n). \quad (1.5)$$

Тобто E пропорційна I та обернено пропорційна квадрату відстані від джерела до освітленої поверхні. Чим більше похило падають промені, тим меншу освітленість вони створюють.

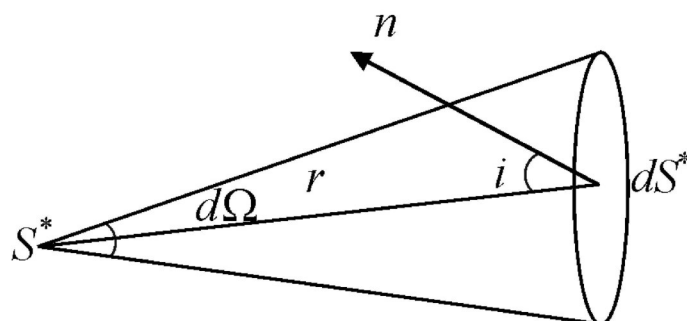


Рис. 1.4

Поняття про яскравість джерела можна застосувати тільки для джерел зі скінченною випромінювальною поверхнею. Для точкових джерел такого поняття не існує.

Під яскравістю джерела розуміють силу світла, яку випромінює це джерело з одиниці поверхні в певному напрямку.

$$B = \frac{I}{dS \cos(n, r)}. \quad (1.6)$$

$$B_{max} = \frac{I}{dS}, \text{ при } \varphi=0 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{ср} \cdot \text{м}^2} \right).$$

Одиниці виміру випромінювання фотометричних величин. За основну фотометричну одиницю приймають одиницю сили світла, ця величина еталонна. Історія розвитку еталонної величини сили світла: спочатку це була свічка, потім гнотова лампа, а потім електрична лампа певних розмірів, конструкції і т.д. Конструкція, розміри та режим її живлення електроенергією були чітко стандартизовані. Встановлена таким чином одиниця сили світла має назву міжнародної свічки. В системі СІ одиниця сили світла називається – 1 кандела (кд). Зараз замість лампочки використовують повний випромінювач. Одиниці вимірювання інших фотометричних величин встановлюються на основі закономірного зв'язку цих величин із силою світла.

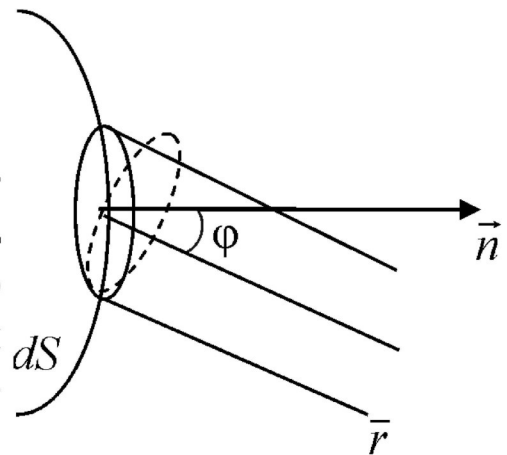


Рис. 1.5

1. $d\Phi = IdW = 1 \text{ кд} \times 1 \text{ ср} = 1 \text{ лм}.$

Люмен дорівнює світловому потоку в межах тілесного кута в 1 стерadian від ізотропного джерела з силою світла в 1 кд.

2. 1 – кандела (кд) – це сила світла еталонного джерела.

3. $E = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{1 \text{ лм}}{1 \text{ м}^2} = 1 \text{ люкс}.$

За одиницю освітленості приймається люкс, який дорівнює освітленості, яку створює потік в 1 лм, та який рівномірно розповсюджується на площу в 1 м².

4. Світність $R = \frac{d\Phi}{dS}$ вимірюється також у лм/м² (люкс).

5. $B = \frac{I}{dS \cdot \cos i} = \frac{1 \text{ кд}}{1 \text{ м}^2} = 1 \text{ ніт} = 1 \text{ нт}$.

1 ніт дорівнює яскравості рівномірної плоскої поверхні, яка рівномірно світиться та дає в нормальному до неї напрямку ($i=0$) силу світла в 1 канделу з площі в 1 м².

Існує зв'язок між R та B , це закон Ламберта: $R = \pi B$.

Порівняльна таблиця

Величина	Фотометрична одиниця виміру	Енергетична одиниця виміру
Світловий потік Φ	люмен	Вт
Сила світла I	кандела	Вт/ср
Освітленість E	люкс	Вт/м ²
Світність R	люкс	Вт/м ²
Яскравість B	ніт	кд/м ² = Вт/ср м ²

Яскравість

Джерело	Яскравість
Нічне небо	10 ⁻⁸ кд/м ²
Місяць	0,25 кд/м ²
Стеаринова свічка	0,5 кд/м ²
Гасова лампа	1,5 кд/м ²
Газосвітні лампи	5 кд/м ²
Вугільна лампочка	50–100 кд/м ² (вже болісно діє на очі)
Вакуумна вольфрамова лампочка	150–200 кд/м ²
Газонаповнена лампочка	500 кд/м ²
Сонце	500000 кд/м ²

Сприйняття світла можливо за допомогою:

- ока;
- фотоелемента;
термоелемента;
- фотографічного методу та інше.

Вимірювання фотометричних величин. Вимірювання фотометричних величин проводяться або за допомогою візуальних спостережень (візуальна фотометрія), або за допомогою тієї чи іншої сприймаючої апаратури (об'єктивна фотометрія). Тому перш за все необхідно ознайомитися з оком як сприймаючим світло апаратом, а також з іншими об'єктивними апаратами, що служать для сприйняття світла. Сітчаста оболонка, що має дуже складну будову, є розгалуженням волокон зорового нерва. Оптична система ока дає на сітчастій оболонці дійсне зображення предметів, які розглядаються. Інтенсивність відчуття визначається освітленістю, яку створює на сітчастій оболонці світловий потік, що потрапляє в око. Світлочутливими елементами є так звані палички і колбочки.

Палички і колбочки відіграють різну роль при виникненні зорового відчуття. Палички мають набагато більшу чутливість, ніж колбочки, але не дають можливості розрізняти кольори. Колірні відчуття викликаються лише при роздратуванні колбочок. Крім того, області сітківки, заповнені колбочками, дозволяють розрізняти значно більше деталей, ніж області, заповнені паличками. Відповідно до цього людина володіє двома різними видами зору. Один із них, пов'язаний із роздратуванням колбочок, діє при достатньо великих освітленостях, дозволяє розрізняти кольори і сприймати велике число деталей. Цей зір називається денним зором. Другий пов'язаний із роздратуванням паличок і називається смерковим зором. Оскільки палички розташовані переважно по периферії сітчастої оболонки, то його називають також периферичним зором. Зазвичай одночасно діють тією чи іншою мірою обидва види зору, але при дуже малих освітленостях діє лише смерковий зір.

Око дозволяє з великим ступенем точності встановити однаковість освітленостей двох сусідніх полів при однокольоровому світлі. Тому всі методи візуальної фотометрії зводяться до порівняння освітленостей.

1. *Фотометр із тригранною призмою.* Прозора тригранна призма ABC поміщена всередині зачорненої труби. Її дві симетричні грані AB і AC освітлюються двома джерелами S_1 і S_2 . При розгляді оком обох граней AB і AC легко встановити умову, при якій їх освітленості рівні. Вказаний фотометр дозволяє порівнювати сили світла джерел. Якщо розміри джерел малі і вони розташовані достатньо далеко від призми, то їх можна вважати точковими. В цьому випадку освітленості граней AB і AC рівні:

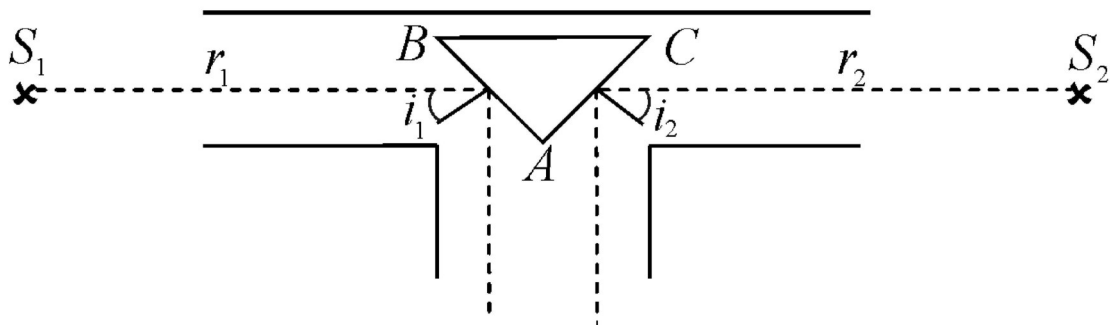


Рис. 1.6

$$E_1 = \frac{I_1}{r_1^2} \cos i_1; \quad E_2 = \frac{I_2}{r_2^2} \cos i_2; \quad \cos i_1 = \cos i_2.$$

Якщо освітленості рівні, тобто $E_1 = E_2$, то $\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2$, звідси:

$$I_2 = \frac{I_1 r_2^2}{r_1^2}. \quad (1.7)$$

Таким чином, можна виміряти відношення сил світла двох джерел по відношенню відстаней r_1 і r_2 . Якщо сила світла одного з джерел відома, то тим самим виявляється зміряною сила світла іншого.

2. Кубик Луммера – Бротхуна. У точніших візуальних фотометрах призма ABC замінюється так званим кубиком Луммера – Бротхуна. Цей кубик складається з двох прямокутних скляних призм A і B , у однієї з яких (A) грань, відповідна гіпотенузі, залишена плоскою тільки в центрі; краї у неї відшліфовані. Призми притиснуті одна до одної так, що в місці зіткнення вони поведуться як однорідне прозоре тіло («оптичний контакт»). Хай на кубик падають світлові потоки 1 і 2. Потік 1 пройде в місці контакту через кубик і вийде направо. У тих місцях, де грань призми A відшліфована, промені потоку 1 розсіюються у сторони. Потік 2 в місцях контакту пройде через кубик вгору. В решті місць він випробує повне внутрішнє відбивання і вийде направо. Завдяки цьому направо виходять промені з обох потоків, що дозволяє одночасно спостерігати два освітлених поля.

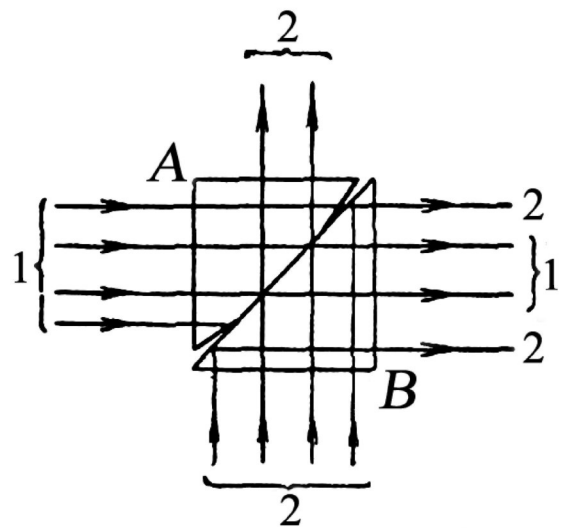


Рис. 1.7

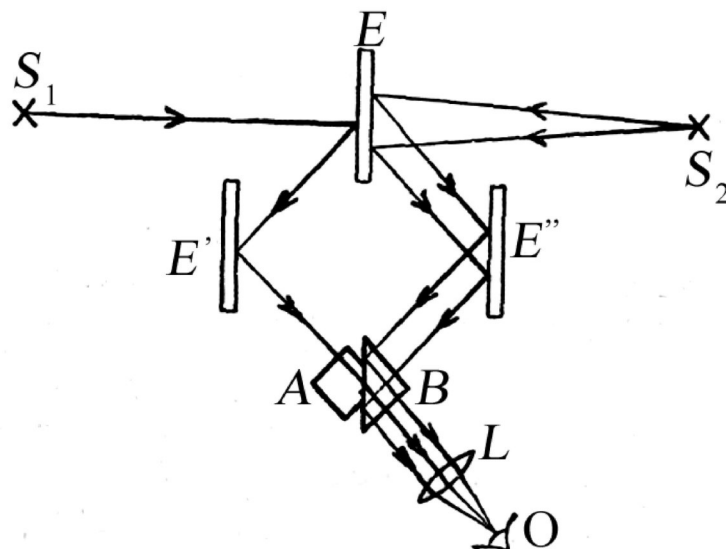


Рис. 1.8. Більш детальна схема кубика Луммера – Бротхуна:
 S_1 і S_2 – вимірювані джерела; E – білий екран, цілком однаковий з обох боків; E' і E'' – два інших білих екрани, AB – кубик Луммера – Бротхуна;
 L – лупа, O – око спостерігача

При спостереженні центр кубика освітлений променями, що йдуть від джерела S_1 , а зовнішня частина кубика – променями від джерела S_2 . Таким чином, поле, освітлене одним джерелом, оточує поле, освітлене іншим, і при нерівності освітленості межа між ними різко виступає. При рівності освітленості межа пропадає.

Існують більш складні схеми з фотоелементами (рис. 1.9).

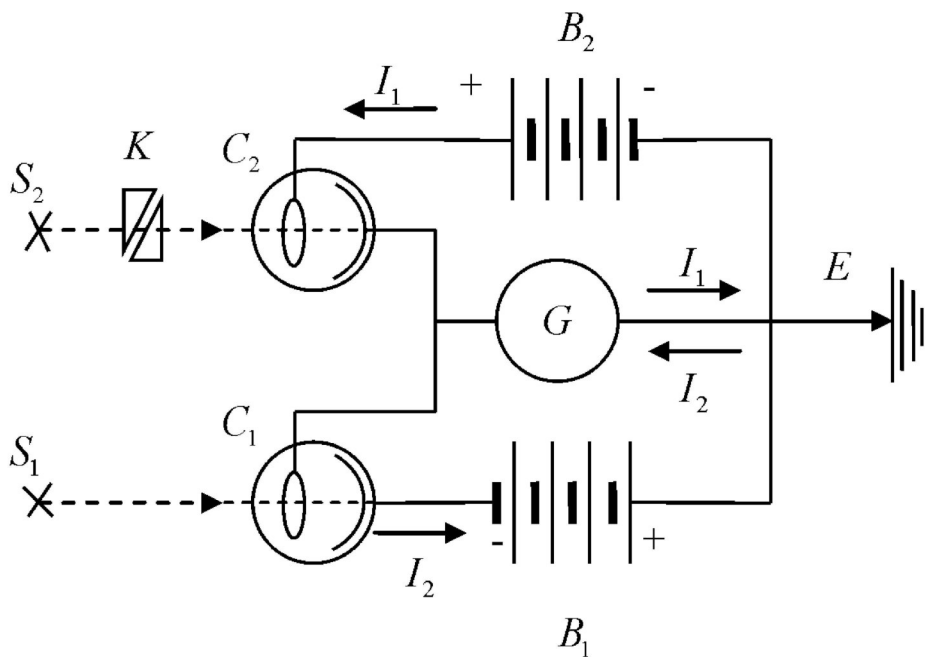


Рис. 1.9

У методах об'єктивної фотометрії око замінюється одним з апаратів, що сприймають світло. Апарат може знову вживатися лише для встановлення рівності двох потоків. Такого роду методи мають назву диференціальних і не вимагають пропорційності між потоком світлової енергії, що падає на апарат, і його показами.

Проста схема диференціального фотометра з двома фотоелементами представлена на рисунку, де S_1 і S_2 – порівнювані джерела світла, C_1 і C_2 – два однакових фотоелементи, B_1 і B_2 – батареї і G – гальванометр. Точка кола E заземлена. При освітленні фотоелементів через них ідуть струми I_1 і I_2 у напрямі стрілок.

Як видно, через гальванометр проходить струм, рівний різниці струмів $I_1 - I_2$. Нехай джерело S_2 інтенсивніше за джерело S_1 , тоді, вводячи на шляху пучка світла від джерела S_2 клин K , можна вирівняти потоки, що падають на обидва фотоелементи, внаслідок чого різниця струмів $I_1 - I_2$ стане рівною нулю і стрілка гальванометра G перестане відхилятися. Якщо для цього доведеться ослабити світловий потік Φ_2 від джерела S_2 в k разів, то

$$\frac{1}{k} \Phi_2 = \Phi_1,$$

де Φ_1 – світловий потік від джерела S_1 . Звідси отримуємо відношення потоків від обох джерел:

$$\frac{\Phi_2}{\Phi_1} = k.$$

Вакуумний фотоелемент, для якого сила виникаючого електричного струму пропорційна падаючому на нього світловому потоку, може безпосередньо вживатися для вимірювання потоків.