



§ 27. ЛІНЗИ. ПОБУДОВА ЗОБРАЖЕНЬ У ЛІНЗАХ. ФОРМУЛА ТОНКОЇ ЛІНЗИ



Ви вже знаєте, що заломлення світла використовують у лінзах. Правила побудови зображень, отримуваних за допомогою лінз, відомі ще із Середньовіччя. Так, використовуючи лінзи, голландський оптик *Захарій Янсен* (1585–1635) у 1590 р. сконструював мікроскоп, а *Галілео Галілей* у 1609 р. винайшов телескоп. Отже, згадаємо основні характеристики лінз.

1

Що таке лінза

Лінза (сферична) — прозоре тіло, обмежене з двох боків сферичними поверхнями*.

За формою лінзи поділяють на *опуклі* й *увігнуті* (рис. 27.1).

Якщо товщина d лінзи у багато разів менша, ніж радіуси R_1 і R_2 сферичних поверхонь, що обмежують лінзу, то таку лінзу називають *тонкою* (рис. 27.2). Далі йтиметься саме про тонку лінзу.

Пряму, яка проходить через центри сферичних поверхонь, що обмежують лінзу, називають **головною оптичною віссю лінзи**. Точку лінзи, яка розташована на головній оптичній осі і через яку промені світла проходять не змінюючи свого напрямку, називають **оптичним центром лінзи**.

Дія лінзи ґрунтується на явищі заломлення світла: світловий промінь, який падає на лінзу, заломлюється на одній із її сферичних поверхонь, поширюється прямолінійно всередині лінзи і знову заломлюється на другій поверхні лінзи (рис. 27.3).

Якщо промені, що падають на лінзу, виходять із однієї точки, то після проходження через лінзу вони теж збираються (перетинаються) в одній точці, тобто лінза дає зображення точки, а отже, і предмета як сукупності точок.

* Одна з поверхонь може бути *площиною* (площину можна вважати сферою нескінченного радіуса).

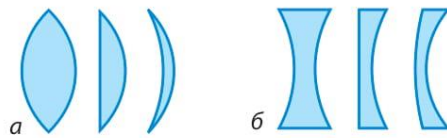


Рис. 27.1. Різні види лінз у розрізі:
a — опуклі лінзи (двоопукла, плоско-опукла, увігнуто-опукла); *б* — увігнуті лінзи (двоввігнута, плоско-ввігнута, опукло-ввігнута)

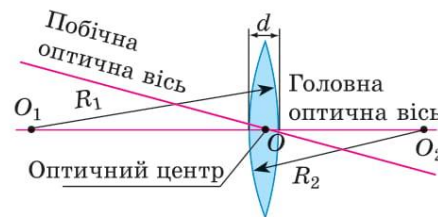


Рис. 27.2. Тонка сферична лінза:
 $d \ll R_1$, $d \ll R_2$

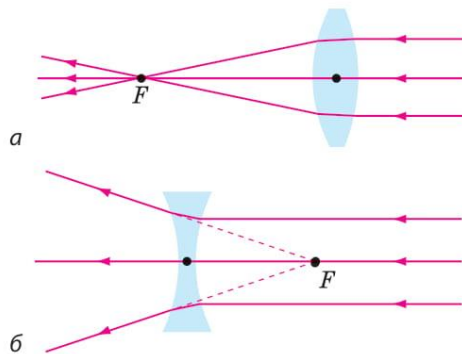


Рис. 27.3. Хід променів у лінзах:
a — збиральна лінза, точка F — головний дійсний фокус лінзи;
б — розсіювальна лінза, точка F — головний уявний фокус лінзи

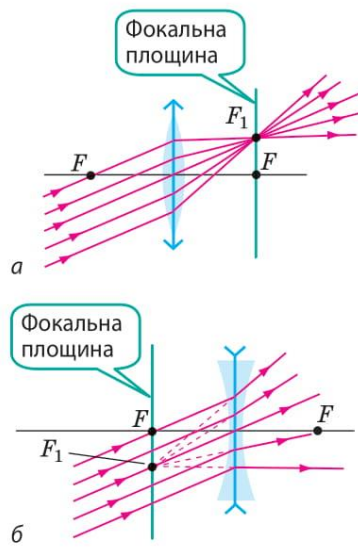


Рис. 27.4. Хід паралельного пучка променів після заломлення в збиральній лінзі (а); в розсіювальній лінзі (б)

Оптична сила лінзи

Оптична сила лінзи пов'язана з радіусами сферичних поверхонь, що її обмежують, формулою:

$$D = \left(\frac{n_{\text{л}}}{n_{\text{сер}}} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

де $n_{\text{л}}$, $n_{\text{сер}}$ — абсолютні показники заломлення матеріалу, з якого виготовлено лінзу, та середовища, в якому перебуває лінза; R_1 і R_2 — радіуси сферичних поверхонь, що обмежують лінзу. Для опуклої поверхні R беруть зі знаком «+», для увігнутої — зі знаком «-», для плоскої — $R = \infty$. Аналіз формули свідчить: якщо $n_{\text{л}} > n_{\text{сер}}$, то опукла лінза є збиральною, а увігнута — розсіювальною; якщо $n_{\text{л}} < n_{\text{сер}}$, то опукла лінза є розсіювальною, а увігнута — збиральною.

Однією з головних властивостей лінзи є те, що паралельні промені після заломлення в лінзі перетинаються в одній точці або в одній точці перетинаються продовження заломлених променів. Якщо паралельні промені, пройшовши крізь лінзу, збираються в одній точці, то така лінза є *збиральною* (рис. 27.3, а). Якщо паралельні промені після проходження крізь лінзу йдуть розбіжним пучком, а в одній точці перетинаються продовження цих променів, то така лінза є *розсіювальною* (рис. 27.3, б).

Точку F , у якій після заломлення збираються промені (або їх продовження), які падають на лінзу паралельно її головній оптичній осі, називають **головним фокусом лінзи**.

Головний фокус збиральної лінзи є дійсним (у точці F перетинаються власне заломлені промені), а розсіювальної лінзи — уявним (у точці F перетинаються продовження заломлених променів). Кожна лінза має два головні фокуси, розташовані на однаковій відстані від оптичного центра лінзи.

У разі коли паралельні промені падають на лінзу не паралельно її головній оптичній осі (рис. 27.4), точку, в якій перетинаються ці промені (або їх продовження) після заломлення в лінзі, називають *побічним фокусом лінзи* (точка F_1 на рис. 27.4). Таких фокусів у лінзи безліч, і всі вони розташовані в одній площині — у *фокальній площині лінзи*, яка проходить через головний фокус лінзи перпендикулярно до її головної оптичної осі.

2 Які фізичні величини характеризують лінзу

Фокусна відстань F лінзи — відстань від оптичного центра лінзи до її головного фокуса*.

Одиниця фокусної відстані лінзи в СІ — метр:

$$[F] = 1 \text{ м (м)}.$$

Фокусну відстань збиральної лінзи вважають *додатною*, а розсіювальної лінзи — *від'ємною*.

* Далі головний фокус лінзи називатимемо *фокусом лінзи*.

Чим сильніше лінза заломлює світло, тим меншою є її фокусна відстань.

Фізичну величину, яка характеризує заломні властивості лінзи та обернена до її фокусної відстані, називають **оптичною силою D лінзи**:

$$D = \frac{1}{F}$$

Одиниця оптичної сили — діоптрія: $[D] = 1 \text{ дптр}$.

1 діоптрія — це оптична сила такої лінзи, фокусна відстань якої дорівнює 1 метру: $1 \text{ дптр} = 1 \text{ м}^{-1}$.

Якщо лінза збиральна, її оптична сила є додатною, якщо лінза розсіювальна, її оптична сила є від'ємною.

? Визначте, збиральні чи розсіювальні лінзи в окулярах, якщо оптична сила цих лінз становить +2 дптр; -3 дптр. Якими є фокусні відстані цих лінз?

3 Як побудувати зображення в лінзі

Будь-який предмет можна подати як сукупність точок. Кожна точка предмета висилає (або відбиває) промені в усіх напрямках. У створенні зображення в лінзі бере участь безліч променів, однак для побудови зображення деякої точки S досить знайти точку перетину будь-яких двох променів, що виходять із точки S і проходять крізь лінзу. Зазвичай для цього обирають два із трьох «зручних променів» (рис. 27.5). Точка S_1 буде **дійсним зображенням** точки S , якщо в точці S_1 перетинаються власне заломлені промені (рис. 27.5, а). Точка S_1 буде **уявним зображенням** точки S , якщо в точці S_1 перетинаються *продовження* заломлених променів (рис. 27.5, б).

Зобразимо схематично предмет стрілкою AB і віддалимо його від збиральної лінзи на відстань, більшу за $2F$ (рис. 27.6, а).

Спочатку побудуємо зображення точки B , для чого скористаємося двома «зручними променями» (промені 1 і 2). Після заломлення в лінзі вони перетнуться в точці B_1 . Отже, точка B_1 є дійсним зображенням точки B . Оскільки

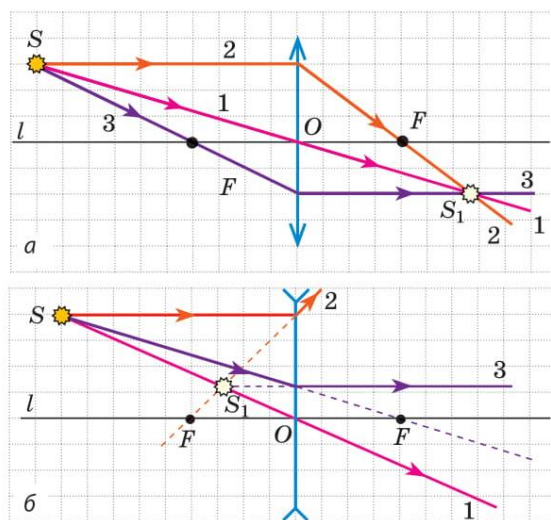


Рис. 27.5. Три найпростіші в побудові промені («зручні промені»):
1 — промінь, який проходить через оптичний центр O лінзи: цей промінь не змінює свого напрямку;
2 — промінь, паралельний головній оптичній осі l лінзи: після заломлення в лінзі цей промінь іде через фокус F (а) або через фокус F іде його продовження (б);
3 — промінь, який проходить через фокус F : після заломлення в лінзі цей промінь іде паралельно головній оптичній осі l лінзи (а, б)

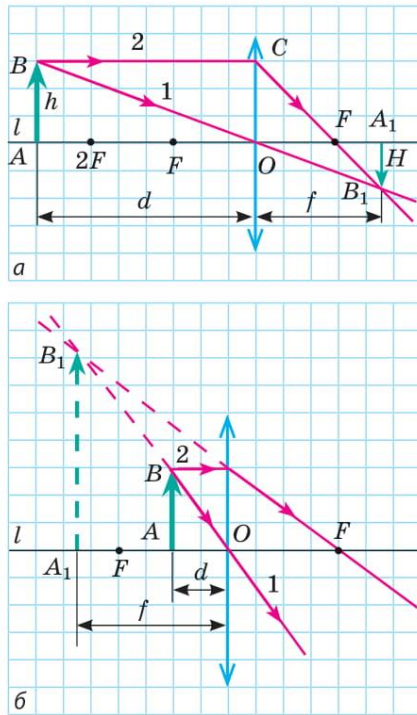


Рис. 27.6. Побудова зображення A_1B_1 предмета AB у збиральній лінзі: *а* — предмет AB розташований за подвійним фокусом лінзи; зображення є дійсним, зменшеним, перевернутим; *б* — предмет AB розташований між фокусом і лінзою, зображення предмета є уявним, збільшеним, прямим

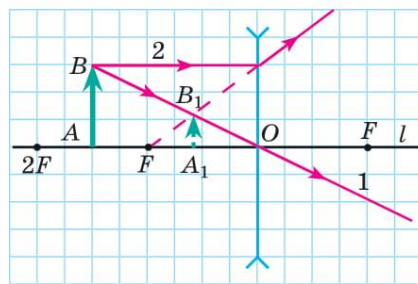


Рис. 27.7. Побудова зображення A_1B_1 предмета AB , розташованого між фокусом і подвійним фокусом розсіювальної лінзи; зображення є уявним, зменшеним, прямим

предмет AB розташований перпендикулярно до головної оптичної осі l лінзи, його зображення теж буде розташоване перпендикулярно до неї. Тому для побудови зображення точки A проведемо перпендикуляр із точки B_1 на головну оптичну вісь l . Точка A_1 перетину перпендикуляра й осі l і є зображенням точки A . Отже, A_1B_1 — зображення предмета AB , одержане за допомогою збиральної лінзи. Бачимо: якщо предмет розташований за подвійним фокусом збиральної лінзи, його зображення, одержане за допомогою лінзи, є дійсним, зменшеним, перевернутим. Таке зображення виходить, наприклад, на сітківці ока або на матриці фотоапарата.

❓ Побудуйте зображення предмета, розташованого між фокусом і подвійним фокусом лінзи, та переконайтесь, що зображення буде дійсним, збільшеним, перевернутим.

Із рис. 27.6, б бачимо: зображення предмета AB , одержаного за допомогою збиральної лінзи у випадку, коли предмет розташований між фокусом і лінзою, є уявним, збільшеним, прямим.

Таким чином, розміри та вид зображення, одержаного за допомогою збиральної лінзи, залежать від відстані між предметом і лінзою.

Побудова зображень, одержаних за допомогою розсіювальної лінзи, показує, що розсіювальна лінза завжди дає уявне, зменшене, пряме зображення предмета (див., наприклад, рис. 27.7).

Часто буває, що предмет більший за лінзу або частина лінзи закрыта непрозорим екраном (наприклад, лінза об'єктива фотоапарата). На рис. 27.8 видно, що промені 2 і 3 не проходять крізь лінзу, але їх, як і раніше, можна використати для побудови зображення. Оскільки реальні промені, що вийшли з точки B , після заломлення в лінзі перетинаються в одній точці — B_1 , то «зручні промені», за допомогою яких будується зображення, теж перетиналися б у точці B_1 .

4 Формула тонкої лінзи. Лінійне збільшення лінзи

Визначимо математичну залежність між відстанню d від предмета до лінзи, відстанню f від зображення предмета до лінзи і фокусною відстанню F лінзи. Для цього скористаємося рис. 27.6, а.

Прямокутні трикутники FOC і FA_1B_1 подібні, тому $\frac{OC}{A_1B_1} = \frac{FO}{FA_1}$. Оскільки $OC = h$, $A_1B_1 = H$, $FO = F$, $FA_1 = f - F$, отримуємо:

$$\frac{h}{H} = \frac{F}{f - F}. \quad (1)$$

Прямокутні трикутники BAO і B_1A_1O подібні, отже, $\frac{AB}{A_1B_1} = \frac{AO}{A_1O}$, або

$$\frac{h}{H} = \frac{d}{f}. \quad (2)$$

Прирівнявши праві частини рівностей (1) і (2), маємо: $\frac{F}{f - F} = \frac{d}{f}$; $Ff = df - dF$;

$df = Ff + dF$. Поділивши останню рівність на dfF , отримаємо **формулу тонкої лінзи**:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$$

Відношення лінійного розміру H зображення предмета до розміру h самого предмета називають **лінійним збільшенням** Γ лінзи:

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}$$

5 Учимся розв'язувати задачі

Задача. На розсіювальну лінзу падає збіжний пучок світлових променів (див. рис. 27.9). Після заломлення в лінзі промені перетинаються в точці S_1 , розташованій на відстані a від лінзи. Якщо лінзу прибрати, точка перетину променів переміститься ближче до місця, де перебувала лінза, на відстань b (точка S). Визначте фокусну відстань лінзи.

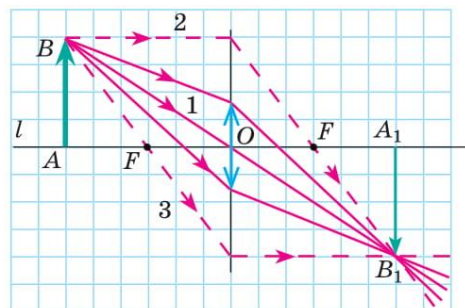


Рис. 27.8. Побудова зображення A_1B_1 предмета AB у випадку, коли предмет є значно більшим за лінзу

«Правила знаків» при використанні формули тонкої лінзи

■ Відстань f (від зображення предмета до лінзи) потрібно брати зі знаком «-», якщо зображення є уявним, і зі знаком «+», якщо зображення є дійсним.

■ Фокусна відстань F збиральної лінзи є додатною, а розсіювальної — від'ємною.

■ Відстань d від світної точки (предмета) до лінзи слід брати зі знаком «+», окрім випадків, коли на лінзу падає збіжний пучок світла (світна точка розташована ніби за лінзою — див. рисунок), — у таких випадках d слід брати зі знаком «-».

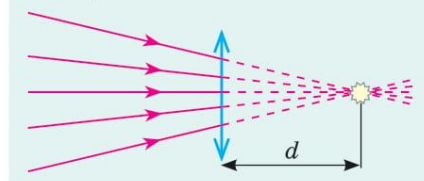


Рис. 27.9. До задачі в § 27

Аналіз фізичної проблеми. Скористаємося оборотністю світлових променів. Тоді точка S_1 , у якій збігаються промені за наявності лінзи, відіграє роль джерела світла, з якого промені йдуть розбіжним пучком; а точка S , у якій збігаються промені за відсутності лінзи, відіграє роль уявного зображення.

Пошук математичної моделі, розв'язання. Урахувавши, що f слід брати зі знаком «-», запишемо формулу тонкої лінзи: $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f}$, або $F = \frac{df}{f-d}$.

Із рис. 27.9 бачимо, що $d = a$, $f = a - b$, отже, $F = \frac{a(a-b)}{(a-b)-a} = \frac{a(a-b)}{(-b)} = \frac{a(b-a)}{b}$.

Аналіз результату. За умовою задачі $b < a$, тому вираз $(b-a)$ є від'ємним, а отже, від'ємною є і фокусна відстань ($F < 0$), що відповідає розсіювальній лінзі.

Відповідь: $F = \frac{a(b-a)}{b}$.



Підбиваємо підсумки

- Прозоре тіло, обмежене з двох боків сферичними поверхнями, називають лінзою. Лінзи бувають збиральними і розсіювальними, а за формою — опуклими й увігнутими.
- Лінзу називають збиральною, якщо паралельні промені, що падають на неї, після заломлення в лінзі перетинаються в одній точці. Цю точку називають дійсним фокусом лінзи.
- Лінзу називають розсіювальною, якщо паралельні промені, що падають на неї, після заломлення в лінзі йдуть розбіжним пучком. Точку, в якій перетинаються продовження заломлених променів, називають уявним фокусом лінзи.
- Залежно від типу лінзи і місця розташування предмета одержують різні зображення:

Місце розташування предмета	Характеристика зображення в лінзі	
	збиральна лінза	розсіювальна лінза
За подвійним фокусом лінзи: $d > 2F$	Дійсне, зменшене, перевернуте	Уявне, зменшене, пряме
У подвійному фокусі лінзи: $d = 2F$	Дійсне, рівне, перевернуте	
Між фокусом і подвійним фокусом лінзи: $F < d < 2F$	Дійсне, збільшене, перевернуте	
У фокусі лінзи: $d = F$	Зображення немає	
Між фокусом і лінзою: $d < F$	Уявне, збільшене, пряме	

- Фізичну величину, яка характеризує заломні властивості лінзи і є оберненою до її фокусної відстані, називають оптичною силою лінзи: $D = \frac{1}{F}$.

- Відстань d від предмета до лінзи, відстань f від зображення предмета до лінзи і фокусна відстань F пов'язані формулою тонкої лінзи: $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$.



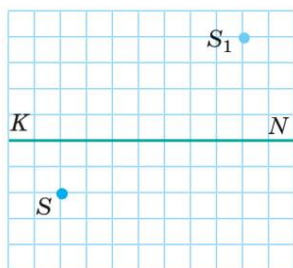
Контрольні запитання

- Що таке лінза? Які види лінз вам відомі?
- Чим розсіювальна лінза відрізняється від збиральної?
- Що називають дійсним фокусом лінзи?
- Чому фокус розсіювальної лінзи називають уявним?
- Охарактеризуйте оптичну силу лінзи як фізичну величину.
- Які промені використовують для побудови зображення в лінзі?
- Які зображення дає збиральна лінза? розсіювальна лінза? Від чого залежить вид зображення?
- Які фізичні величини пов'язує формула тонкої лінзи? Яких правил слід дотримуватися, застосовуючи цю формулу?
- Як визначити лінійне збільшення лінзи?

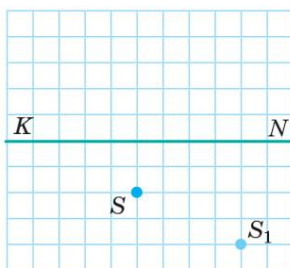


Вправа № 27

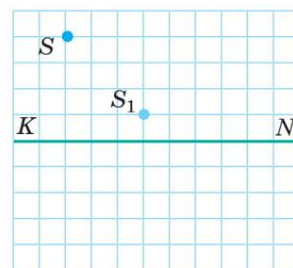
- Для отримання зображення предмета в натуральну величину предмет розташували на відстані 25 см від лінзи. Визначте оптичну силу лінзи. Яка це лінза — збиральна чи розсіювальна?
- Предмет розташований на відстані 1 м від лінзи, а його уявне зображення — на відстані 25 см від лінзи. Визначте оптичну силу лінзи. Яка це лінза — збиральна чи розсіювальна?
- На кожному з рисунків *а–в* показано головну оптичну вісь KN лінзи, світну точку S і її зображення S_1 . Для кожного випадку визначте за допомогою побудов розташування оптичного центра і фокусів лінзи, зазначте тип лінзи, вид зображення.



а



б



в

- Оптична сила збиральної лінзи дорівнює 5 дптр. На якій відстані від лінзи слід розташувати предмет заввишки 4 см, щоб отримати: а) дійсне зображення заввишки 1 см; б) дійсне зображення заввишки 2 см; в) уявне зображення заввишки 10 см?
- Якщо предмет розташований на відстані 36 см від збиральної лінзи, то висота його зображення 10 см, а якщо на відстані 24 см — висота його зображення 20 см. Визначте фокусну відстань лінзи та висоту предмета.



Експериментальне завдання

Використавши збільшувальне скло, отримайте на стіні кімнати або на підлозі дійсне зображення джерела світла.

- Виконавши необхідні вимірювання, визначте оптичну силу та фокусну відстань збільшувального скла.
- Поступово закриваючи частину збільшувального скла непрозорим екраном, поспостерігайте, як змінюється зображення.