



Загальна фізика 3

Загальна фізика 3

ОПТИКА : КВАНТОВА ФІЗИКА

Іванова В.В.

ФТІ НТУУ “КПІ ім. І.Сікорського”

Частина I

ОПТИКА

Лекція 1.

ОПТИКА – *Οπτική* (грец. вид)

Що таке світло?

хвилі?

промені?

корпускули?

Це вчення про природу світла, закони його розповсюдження і взаємодію з речовиною.

Етапи історії розвитку оптики

I етап : вивчення видимого оком світла

■ Геометрична оптика

Платон (427— 347 до н. е.)
(теорія зорових «променів-щупалець» з очей)

Птолемей (II в. н. е.)

праця "Оптика" в 5 книгах,
вивчає заломлення у воді!

Евклід (III в. до н. е.) -
(засновник ГО)

Трактати «Оптика» і «Катоптрика»
“Світло – промені, які
виходять з очей,
розповсюджуються по
прямому шляху”



Арістотель (384-322 до н.е.)

“Світло – дія, рух, який
розповсюджується в
просторі”

Вивчає райдуугу – відбиття світла
водяними краплями

Архімед

(287-212 до н.е.) спалив поблизу
Сіракуз римський флот))

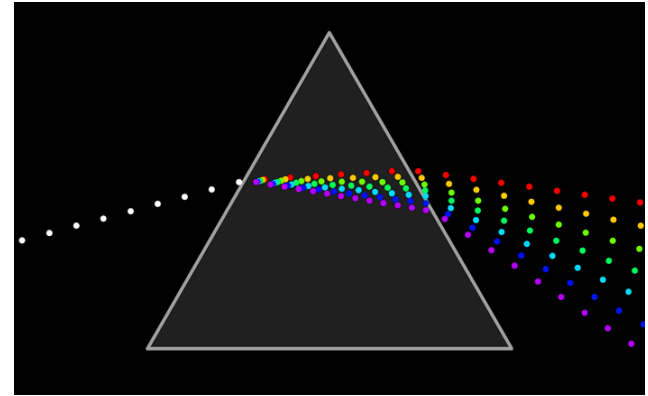
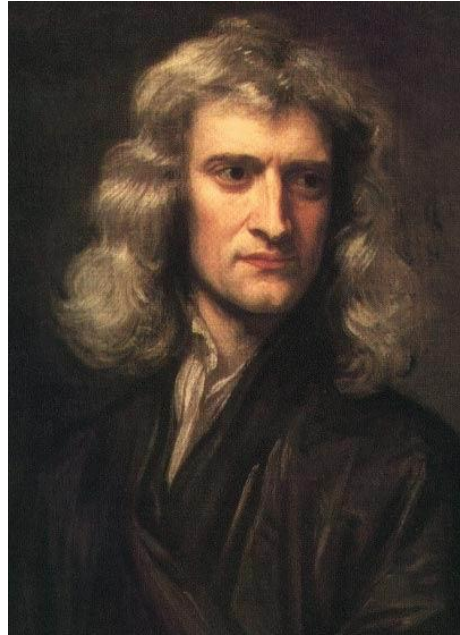
Альгазен (Басра, Каїр)

(965-1039, труд «Скарби оптики»,
будова ока,бінокулярний зір)



Платон і Аристотель, Рафаель Санті

Етапи історії розвитку оптики



1666 р. -дослід Ньютона з дисперсійною призмою

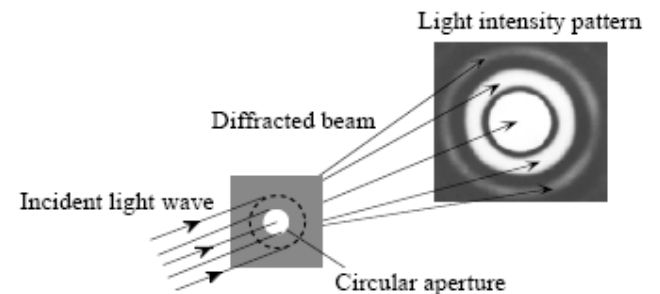
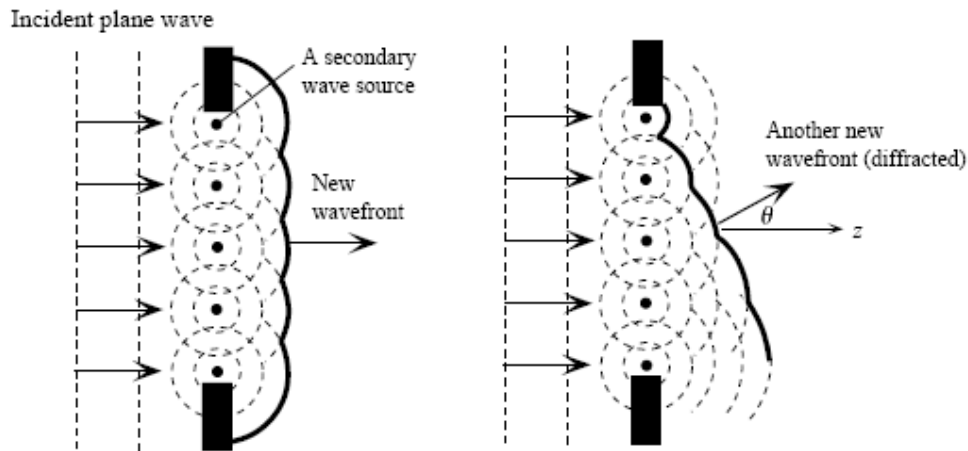
■ Корпускулярна теорія

■ **Ньютон** (1642-1729),
Декарт (1596-1650) ?

Книга «Оптика чи трактат про відбивання, заломлення, кольори...» 1675 р.

XVII-XVIII віки	Корпускули (Ньютон). Хвилі (Гук).	Подвійне променезаломлення. Інтерференція, дифракція. Веселка. Дисперсія. Скінченність швидкості світла.	Телескоп (Галілей, 1609) мікроскоп, окуляри набули широкого поширення	Заломлення. Геометрична оптика. Райдуга (дисперсія світла).
--------------------	-----------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------

- Хвильова теорія
- Грімальді, Марці
- Гюйгенс (1629 - 1695)
«Трактат про світло» 1695 р.
- Юнг
Інтерференція, дифракція
- Френель
- Фраунгофер



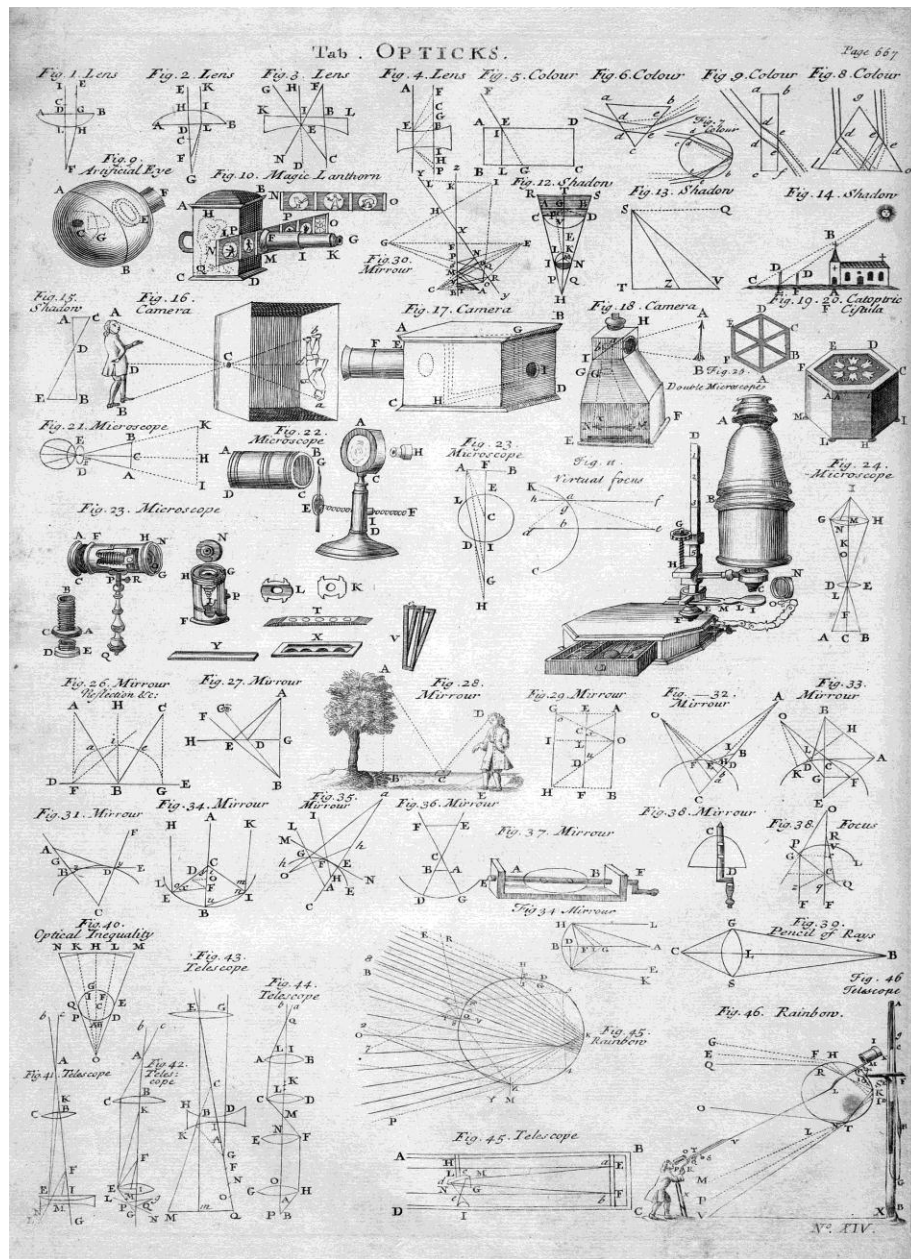
Принцип Гюйгенса

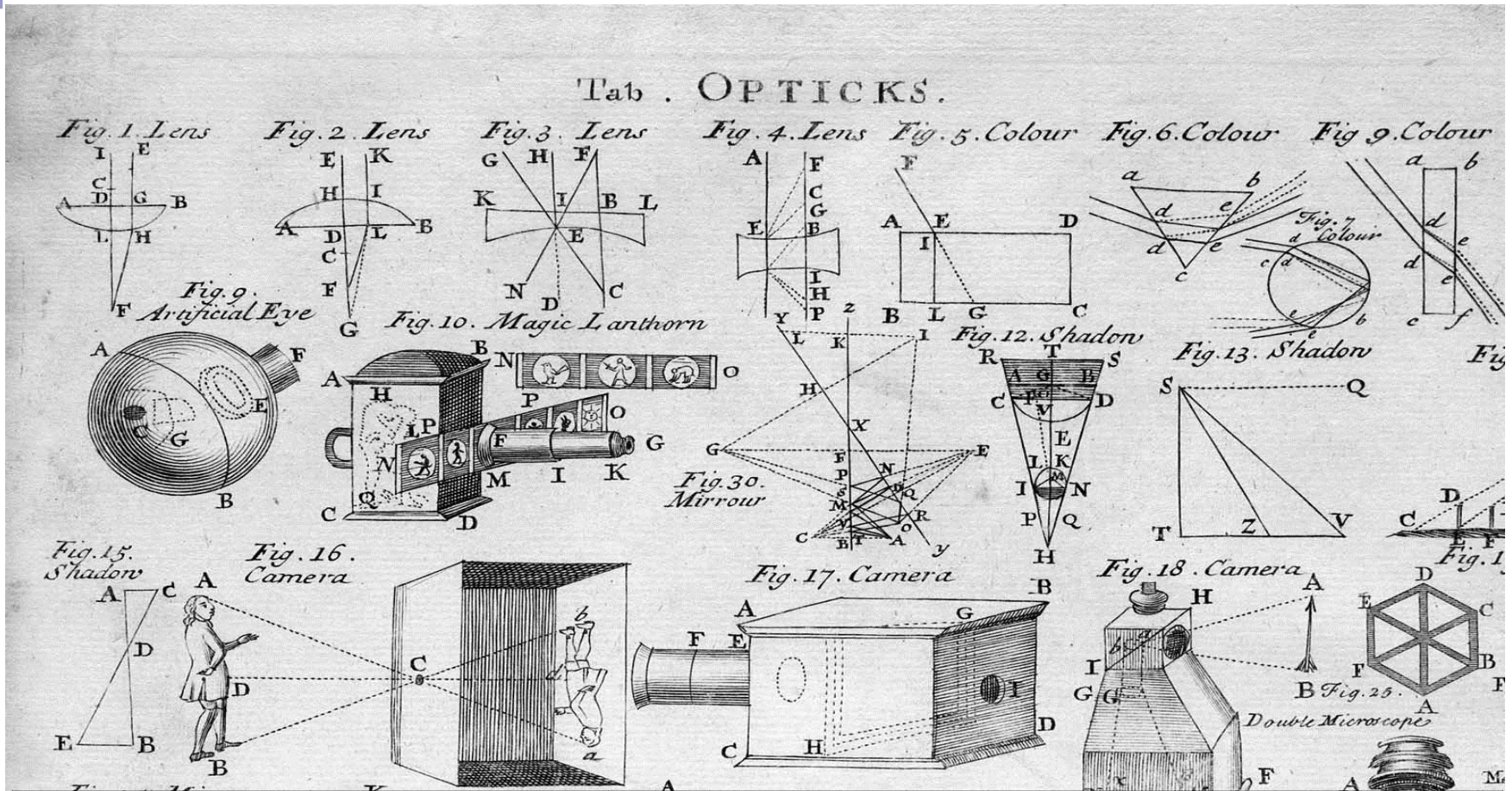
Огюстён Жан Френель

Augustin-Jean Fresnel; (1788-1827)

ОПТИКА XVII – XVIII ст.

Таблиця з
енциклопедії
1728 року





XIX в.	Поперечні (Френель і Араго) хвилі в ефірі	Поляризація. Інфрачервоне та ультрафіолетове випромінювання.	Фотографія, Спектрограф, інтерферометр.	Інтерференція, дифракція. Кристаллооптика, включаючи подвійне променезаломлення. Розсіювання
--------	----------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------

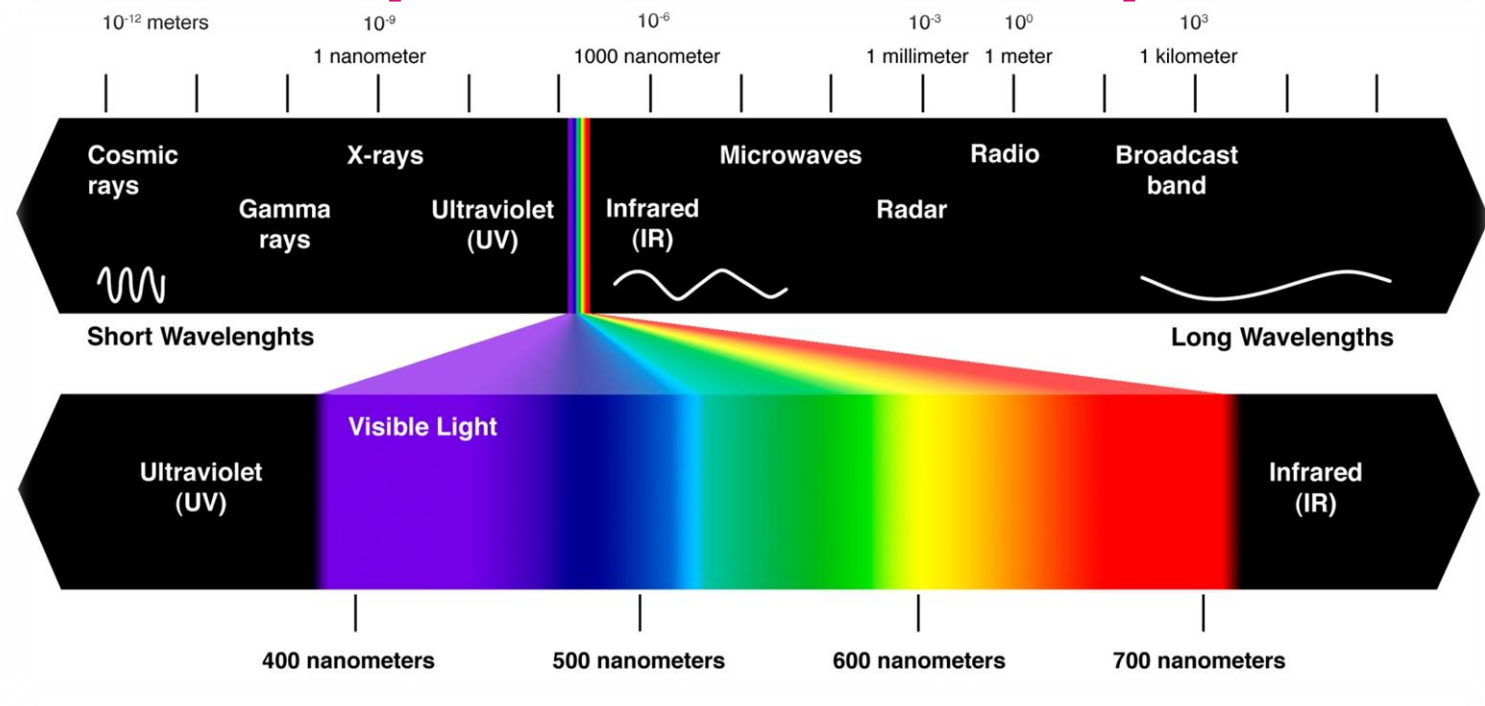
ОПТИКА XVIII – XIX ст.

Mathematisch-Physikalischer Salon,
заснований 1728 року, м. Дрезден



Оптичне випромінювання

Шкала електромагнітного випромінювання

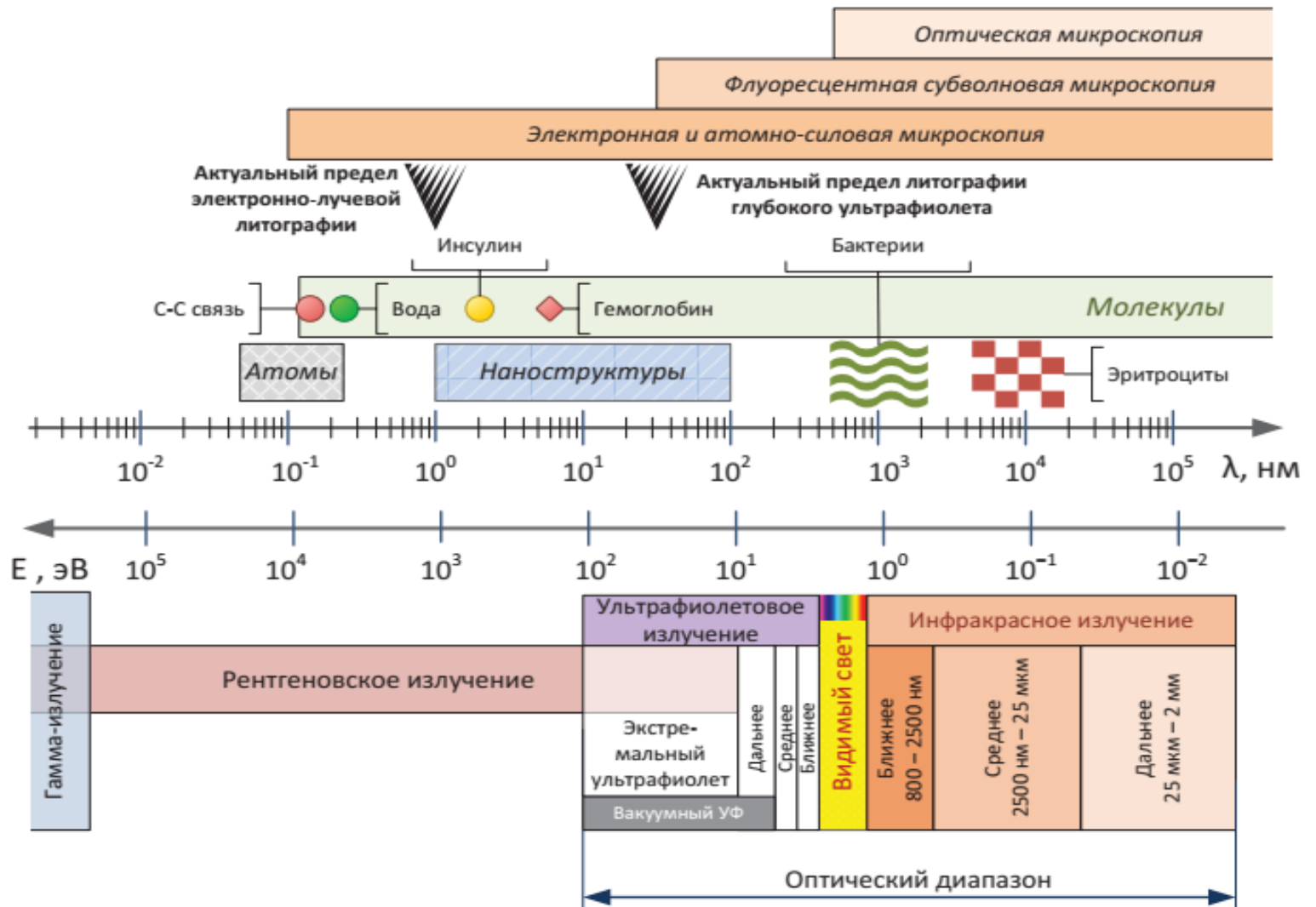


- Оптичний діапазон
- Видиме світло
- ІЧ випромінювання

$10^{17} - 10^{11} (10^{12})$ Гц (1 нм – 1 мм)
 $10^{15} - 0,5 \cdot 10^{14}$ Гц (0,38 – 0,78 мкм)
 $10^{14} - 10^{12} (10^{11})$ Гц (0,78 мкм – 1 мм)

Шкала електромагнітного випромінювання

в порівнянні з характерними об'єктами мікросвіту



Етапи історії розвитку оптики

- Електромагнітна теорія - вершина I “класичного” етапу розвитку оптики
- Д.К. Максвелл (1864, рівняння електродинаміки)

Револьюційні відкриття в фізиці на початку ХХ ст.

- У. Сміт, Герц (1873, 1887 – відкриття фотоефекту)
- М. Планк (1900, дослідження спектру випромінювання чорного тіла, ввів поняття кванта дії)
- А. Ейнштейн (1905, гіпотеза про квантову природу світла; 1917, умови вимушеного випромінювання)
- В.О. Фабрикант (1940, принцип квантового підсилення)
- Д.Габор (1947, відкриття голографії)
- О.М. Прохоров, М.Г.Басов, Ч.Таунс (1954, відкриття LASER)

II “сучасний” етап розвитку оптики

Фотоніка займається процесами генерації, пропускання, детектування, контролю випромінювання оптичного діапазону

ОПТИКА Л.1.

Оптичне випромінювання

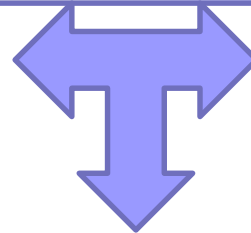
Квантово-хвильовий дуалізм



**γ -випромінювання, жорстке
рентгенівське
випромінювання**

**Випромінювання
радіодіапазону**

**ОПТИЧНЕ
ВИПРОМІНЮВАННЯ**



світлові промені

електромагнітні хвилі

фотонні колективи

ОПТИКА

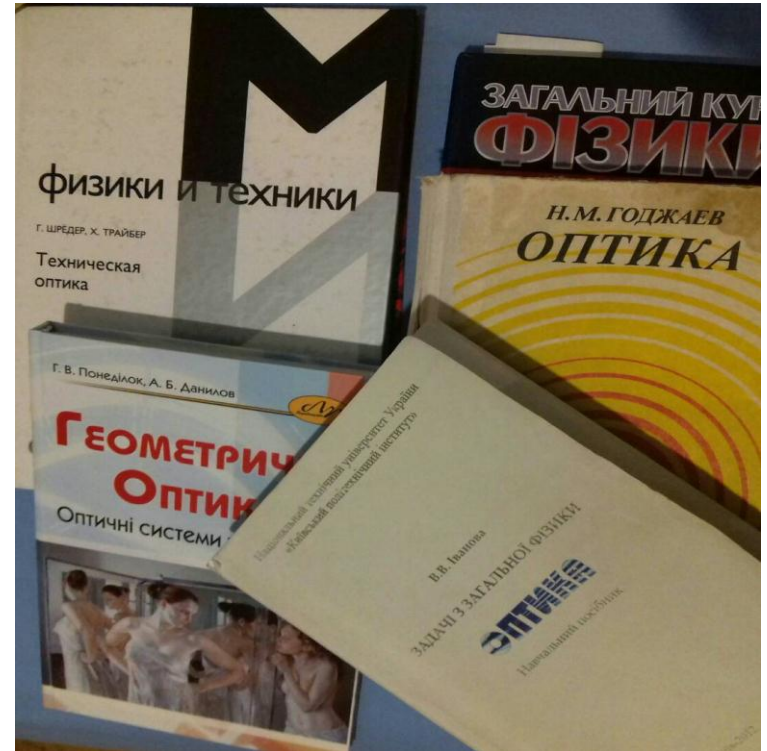
Геометрична

Хвильова

Квантова

Нелінійна

Фізіологічна

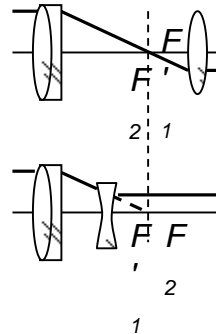


- Н.М. Годжаев. Оптика. – М.:Высшая школа, 1977.
- А.Н. Матвеев Оптика. – М.: Высшая школа, 1985
- Д.В. Сивухин. Общий курс физики. Оптика. – М.: Наука.
- Г.С. Горелик. Колебания и волны. – М.:Физматгиз, 1959.
- Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. Том 3. Оптика. – Київ, «Техніка», 2001 р.
- В.В.Іванова. Задачі з загальної фізики. Оптика. – КПІ, 2012

■ Частина I. Геометрична оптика і фотометрія

■ 1. Геометрична оптика.

- 1.1. Застосування основних законів
- 1.2. Центровані оптичні системи. Оптичні прилади
- 1.2.1. Оптика параксіальних променів
- 1.2.2. Кардинальні елементи оптичної системи
- 1.2.3. Властивості ідеальної оптичної системи
- 1.2.4. Оптичні інструменти



■ 2. Фотометрія

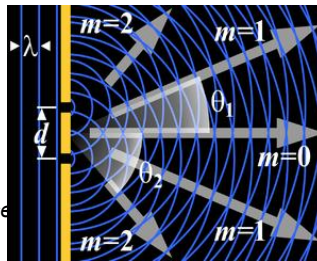
- 2.1. Основні поняття і закони

■ Частина II. Фізична оптика

■ 1. Дисперсія

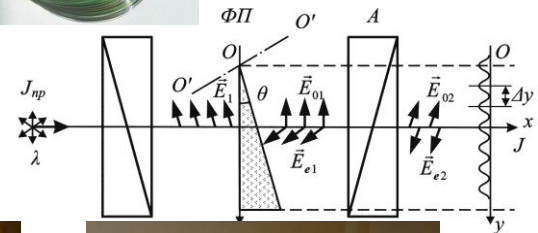
■ 2. Інтерференція світла

- 2.1. Загальні відомості
- 2.1.1. Інтерференційні схеми
- 2.1.2. Інтерференція в тонких плівках і пластинках
- 2.1.3. Кільця Ньютона
- 2.1.4. Багатопророменева інтерференція
- 2.1.5. Вплив на інтерференцію немонохроматичності світла на когерентність
- 2.1.6. Просторова когерентність



■ 3. Дифракція

- 3.1. Загальні відомості
- 3.1.1. Дифракція Френеля
- 3.1.2. Дифракція Фраунгофера
- 3.1.3. Спектральні характеристики дифракційної ґратки
- 3.1.4. Дифракція рентгенівських променів на кристалічній ґратці

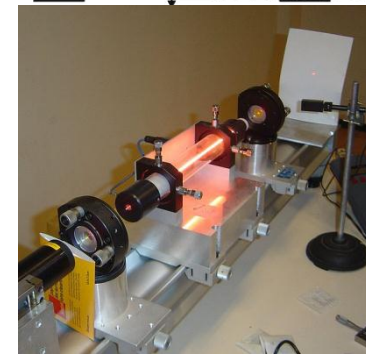


■ 4. Поляризація та елементи кристалооптики

- 4.1. Загальні відомості
- 4.1.1. Поляризація світла при відбитті та заломленні
- 4.1.2. Поляризація світла при природному двоприменезаломленні
- 4.1.3. Поляризація при штучному двоприменезаломленні

■ 5. Голографія. Принцип та основні схеми голографічного запису. Лазери.

■ 6. Квантова оптика



Геометрична оптика.

Основні поняття

Світловий промінь – геометрична лінія, в кожній точці якої напрямок перенесення світлової енергії визначається дотичною до цієї лінії.

Геометрична оптика – розділ оптики, що вивчає закономірності поширення світла і створення оптичних зображень, базуючись на представленні світла як променів.

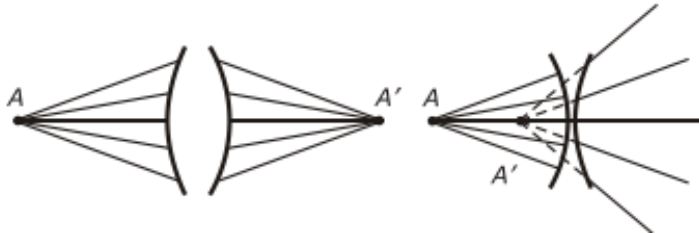
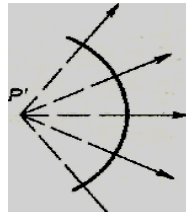
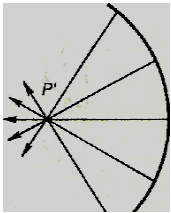
Предметом вивчення **ГО** є **оптичні системи** – сукупності оптичних елементів (лінз, призм, пластинок, дзеркал, тощо), призначені для формування оптичних пучків і створення зображень.

Геометрична оптика

Основні терміни

Сукупність точок, зображення яких одержують за допомогою оптичних систем, називається **простором предметів**, сукупність точок, що є їх зображенням, - **простором зображень**.

Гомоцентричний пучок - пучок світлових променів, в якому самі промені або їхні продовження перетинаються в одній точці.



Дійсне зображення

Уявне зображення

Ідеальною оптичною системою називають оптичну систему, яка відображає точку предмета точкою й зберігає заданий масштаб зображення. Зберігається гомоцентричність пучків.

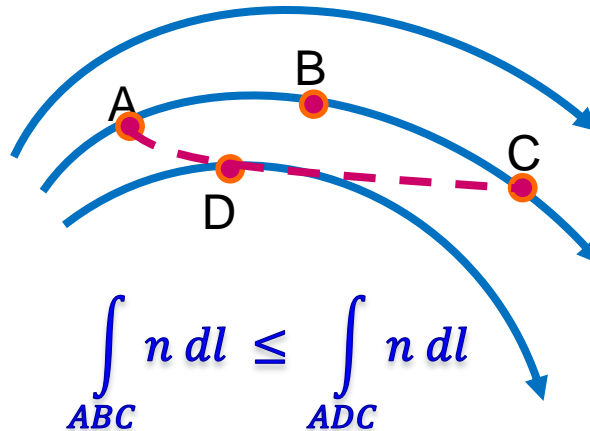
Основні закони геометричної оптики.

Принцип Ферма (П'єр Ферма 1601-1675 рр)

(Розвинув ідею Герона Александрійського (120 г. до н.е.), який стверджував, що світло при відбитті йде **найкоротшим шляхом**)

■ Принцип Ферма (1660 р.)

оптична довжина реального променя, що проходить між двома точками, менша за оптичну довжину будь-якої іншої кривої, яку можна провести між цими двома точками.



Оптична довжина шляху – це добуток показника заломлення речовини на довжину геометричного шляху світлового променя

$$n = \frac{c}{v}$$

Показник заломлення даного середовища - це відношення швидкості світла у вакуумі до фазової швидкості світла в цьому середовищі

Основні закони геометричної оптики.

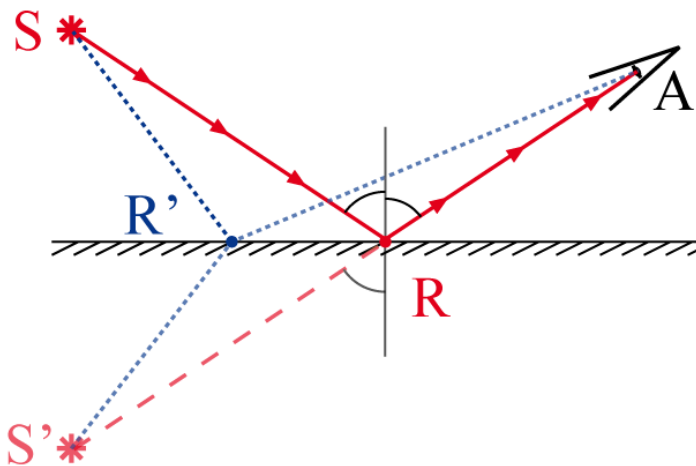
Принцип Ферма

■ Принцип Ферма

оптична довжина реального променя, що проходить між двома точками, менша за оптичну довжину будь-якої іншої кривої, яку можна провести між цими двома точками.

$$L = \int n \, dl$$

(Промінь світла, що поширюється між двома точками А і В ,
обирає шлях, якому відповідає найменший час поширення.)

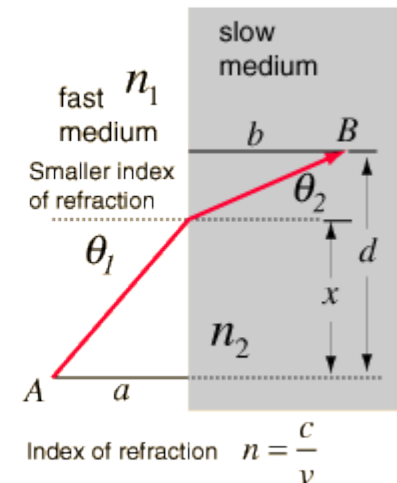


$$t = \frac{\sqrt{a^2 + x^2}}{v} + \frac{\sqrt{b^2 + (d-x)^2}}{v'}$$

$$\frac{dt}{dx} = \frac{x}{v\sqrt{a^2 + x^2}} - \frac{(d-x)}{v'\sqrt{b^2 + (d-x)^2}}$$

$$0 = \frac{\sin \theta_1}{v} - \frac{\sin \theta_2}{v'}$$

Snell's Law $\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1}$



Основні закони геометричної оптики.

Принцип Ферма

■ Закон прямолінійного розповсюдження світла

В однорідному ізоотропному середовищі світло розповсюджується вздовж прямої лінії.

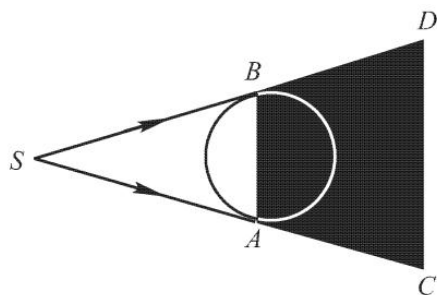


Рис. 1

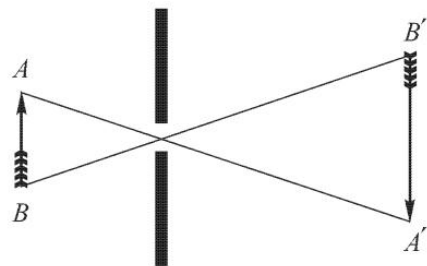
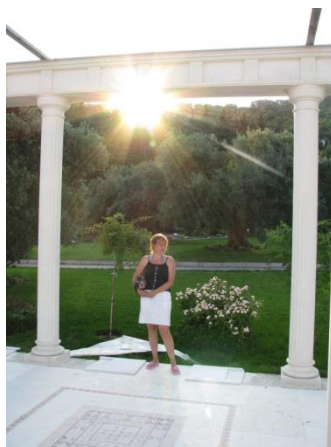
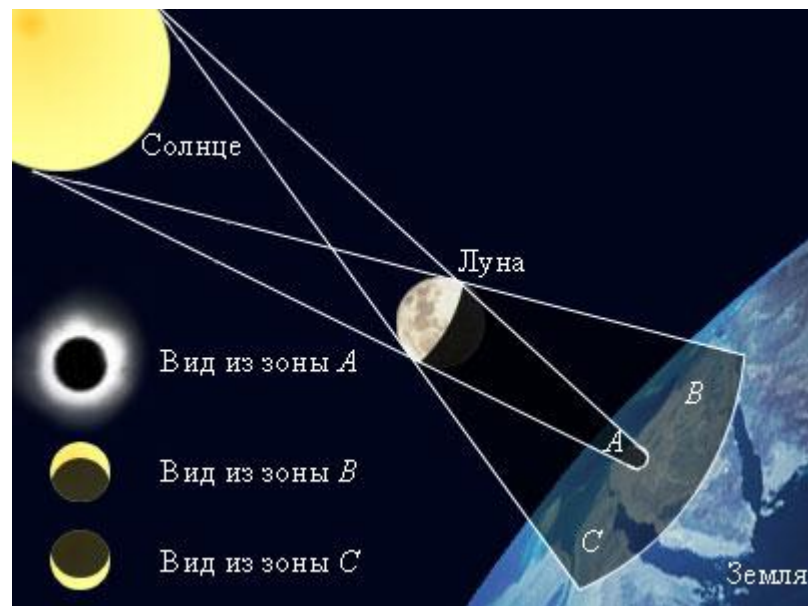


Рис. 2



Основні закони геометричної оптики.

Принцип Ферма

- Закон незалежного розповсюдження світлових променів

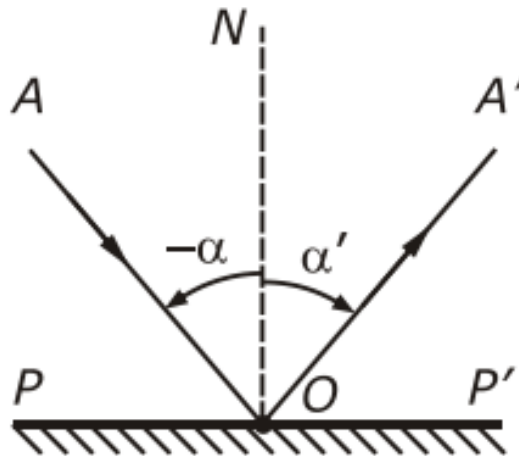
Світлові промені розповсюджуються незалежно один від одного, так наче інших променів не існує.

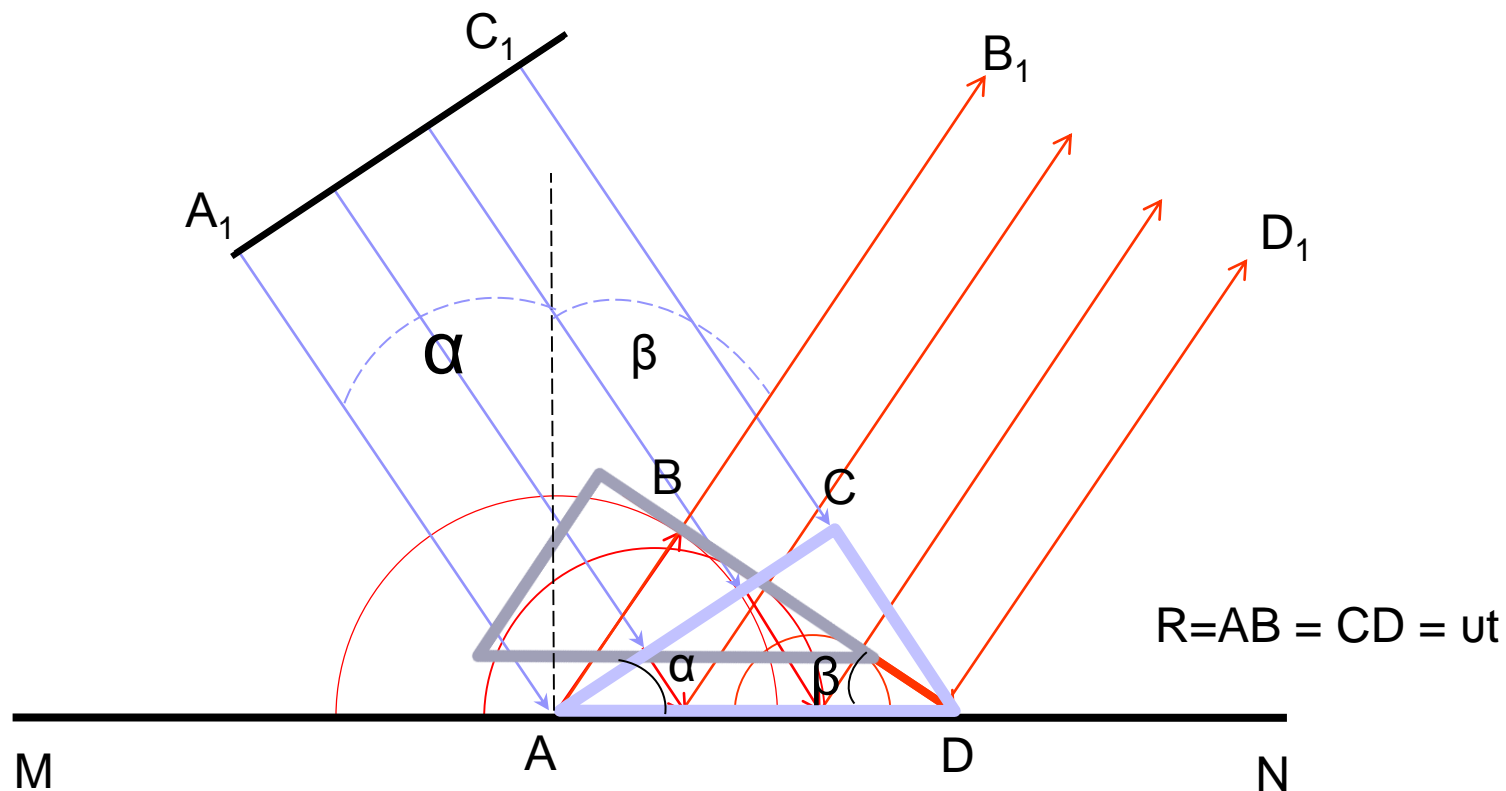


Основні закони геометричної оптики. Принцип Ферма

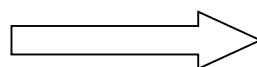
■ Закон відбиття

Промінь, що падає на поверхню (границю розділу оптичних середовищ), нормаль до поверхні в точці падіння та відбитий від поверхні промінь знаходяться в одній площині. Кут падіння дорівнює куту відбиття .





$$\Delta ABD = \Delta ACD \Rightarrow \angle DAC = \angle ADB \quad \begin{array}{l} \text{Кут DAC} = \alpha \\ \text{Кут ADB} = \beta \end{array}$$

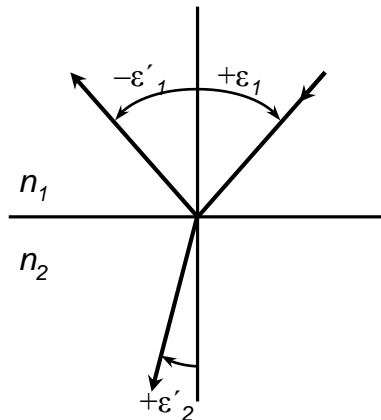
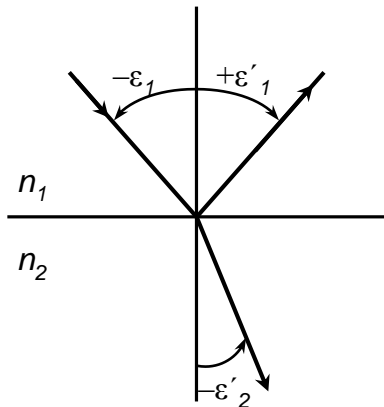


$$\alpha = \beta$$

Основні закони геометричної оптики. Принцип Ферма

■ Закон заломлення (Снелліус 1621)

Промінь, що падає на поверхню розділу двох середовищ з показниками заломлення n і n' , нормаль до поверхні в точці падіння та заломлений промінь знаходяться в одній площині, кути падіння і заломлення зв'язані співвідношенням (закон Снелліуса):



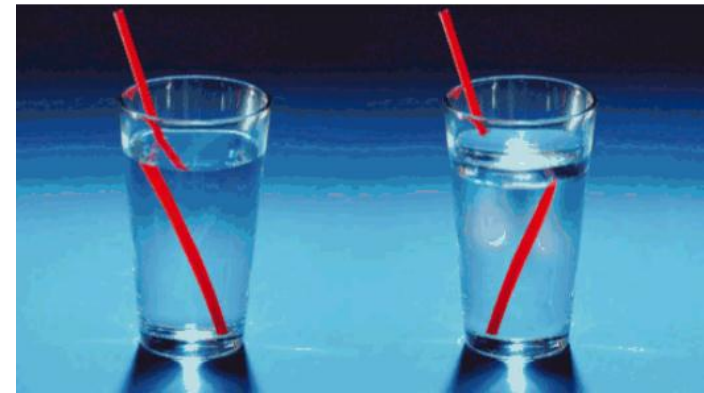
$$\frac{\sin \varepsilon_1}{\sin \varepsilon'_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

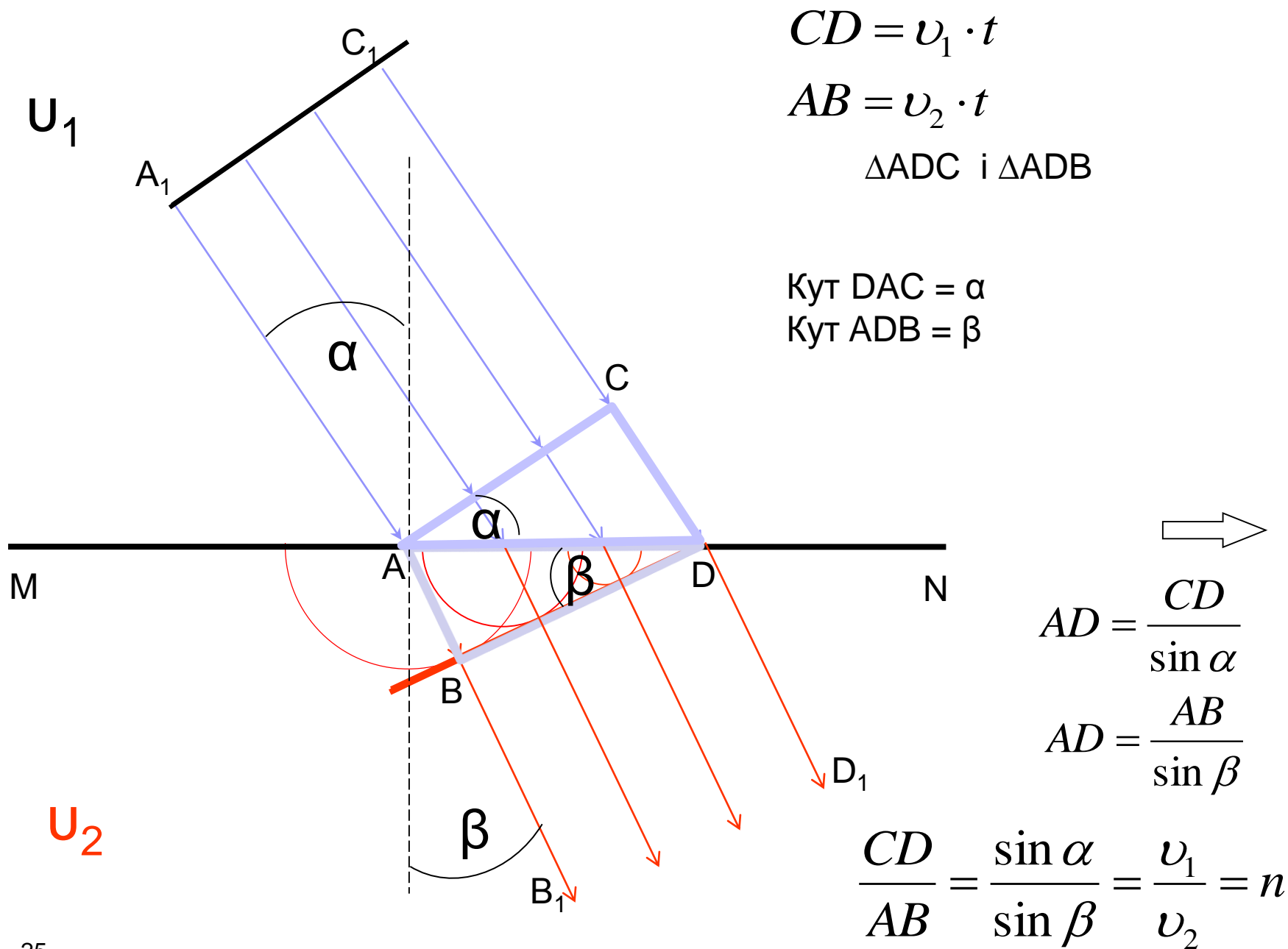
Показник заломлення (абсолютний показник заломлення)

є основною оптичною характеристикою середовища (матеріалу):

$$n = \frac{c}{v}$$

Refractive index - це відношення швидкості світла у вакуумі до фазової швидкості світла в цьому середовищі



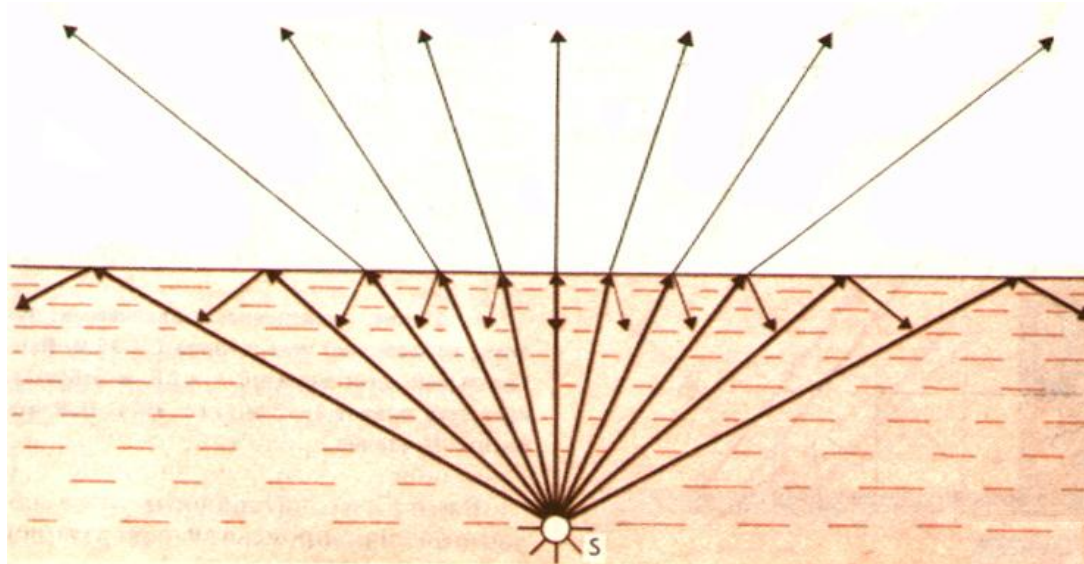


Речовина	ОПТИКА Л.1.		n
	n	Речовина	
Ацетон	1.36	Органічне скло	1.50
Алмаз	2.42	Сірчана кислота	1.43
Бензол	1.50	Рубін	1.76
Кам'яна сіль	1.54	Скипідар	1.47
Вода	1.33	Слюда	1.58
Кварц	1.54	Спирт	1.36
Гліцерин	1.47	Скло (віконне)	1.48 - 1.53
Лід	1.31	Скло (оптичне)	1.47 - 2.04
Рицинова олія	1.48	Ефір	1.35

Основні закони геометричної оптики.

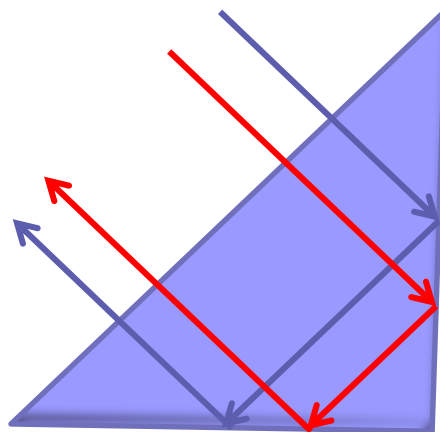
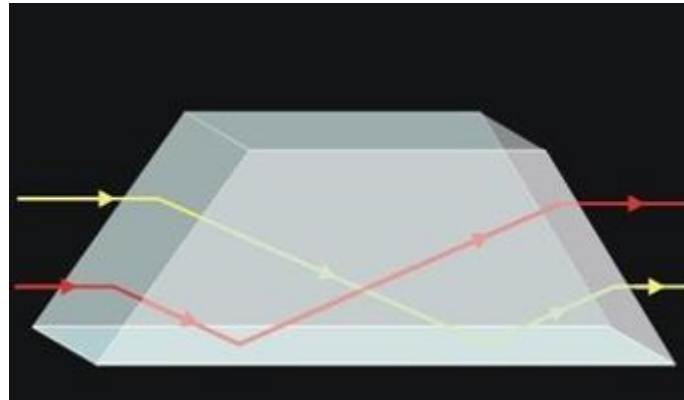
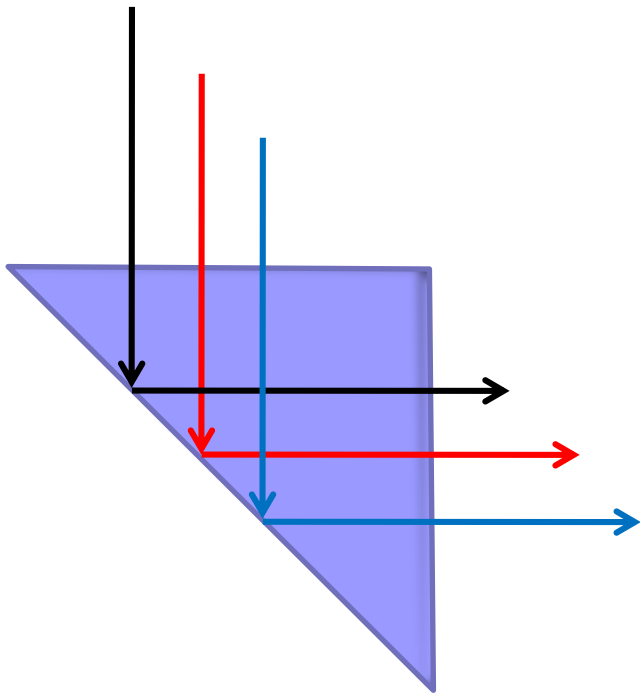
Принцип Ферма

- повне внутрішнє відбиття

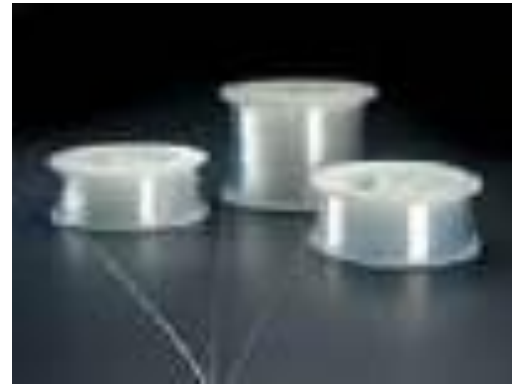
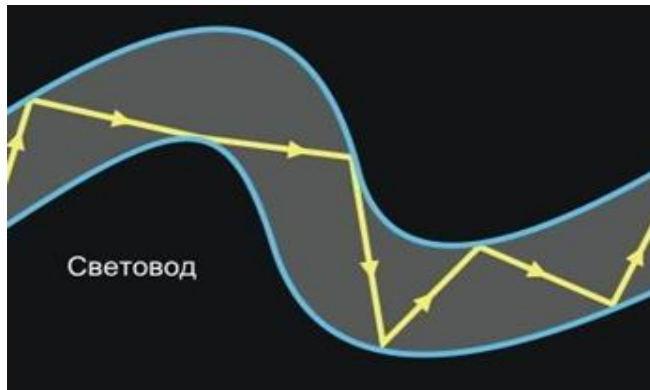


$$\varepsilon_{np} = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

Повне внутрішнє відбиття

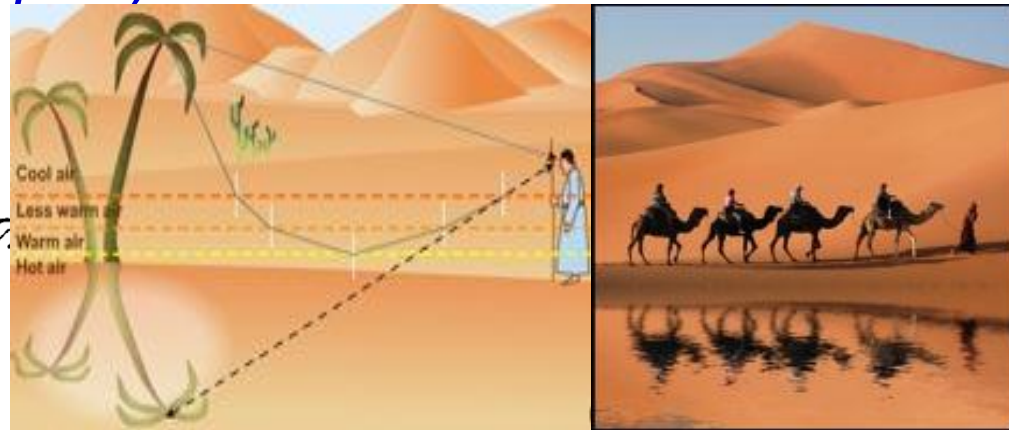
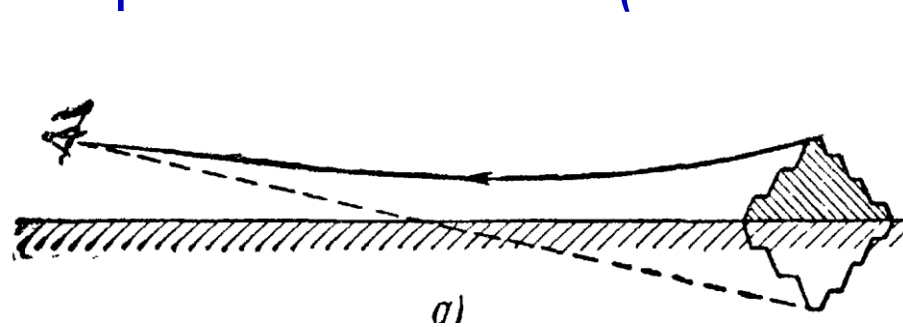


Повне внутрішнє відбиття

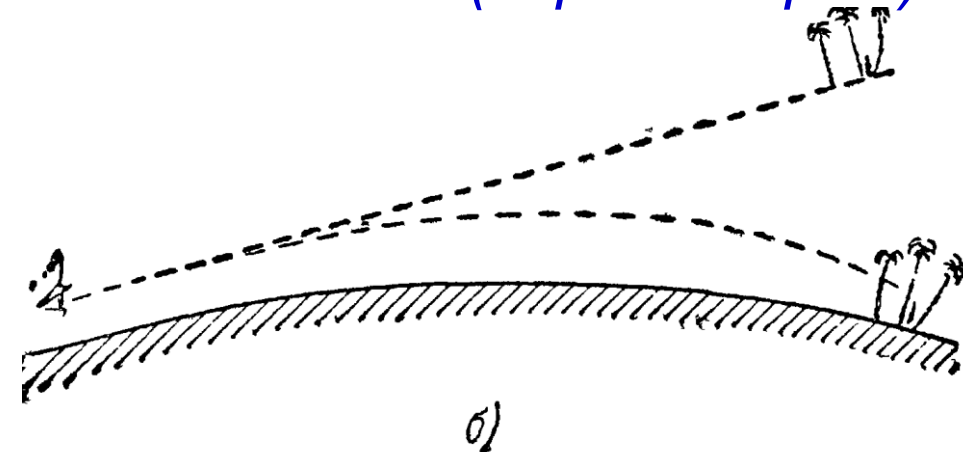


Пояснення марева

- над розігрітою поверхнею показник заломлення росте з висотою (*нижній міраж*)

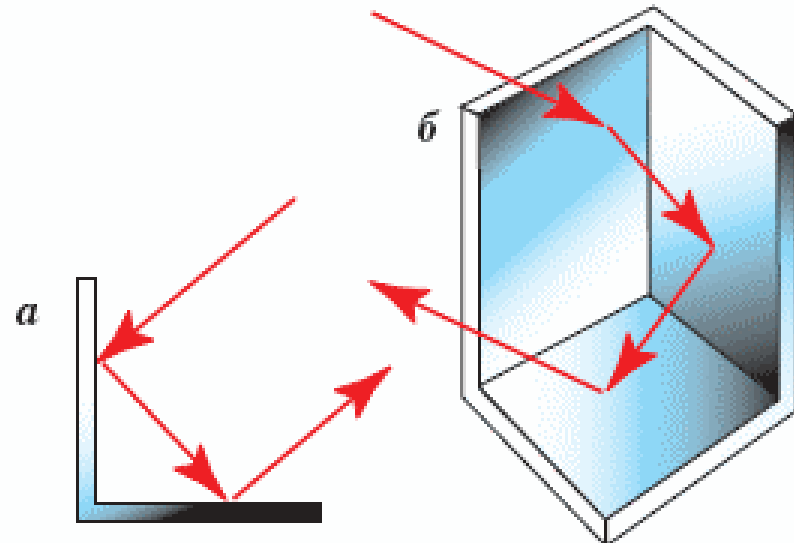
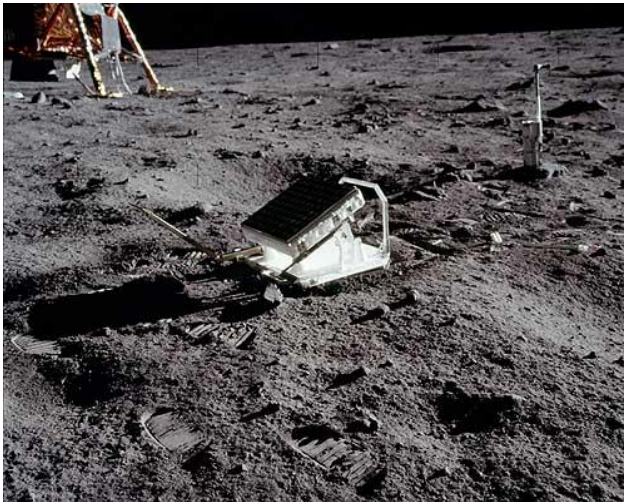


- зменшення густини повітря (показника заломлення) з висотою (*верхній міраж*)



Кутиковий відбивач

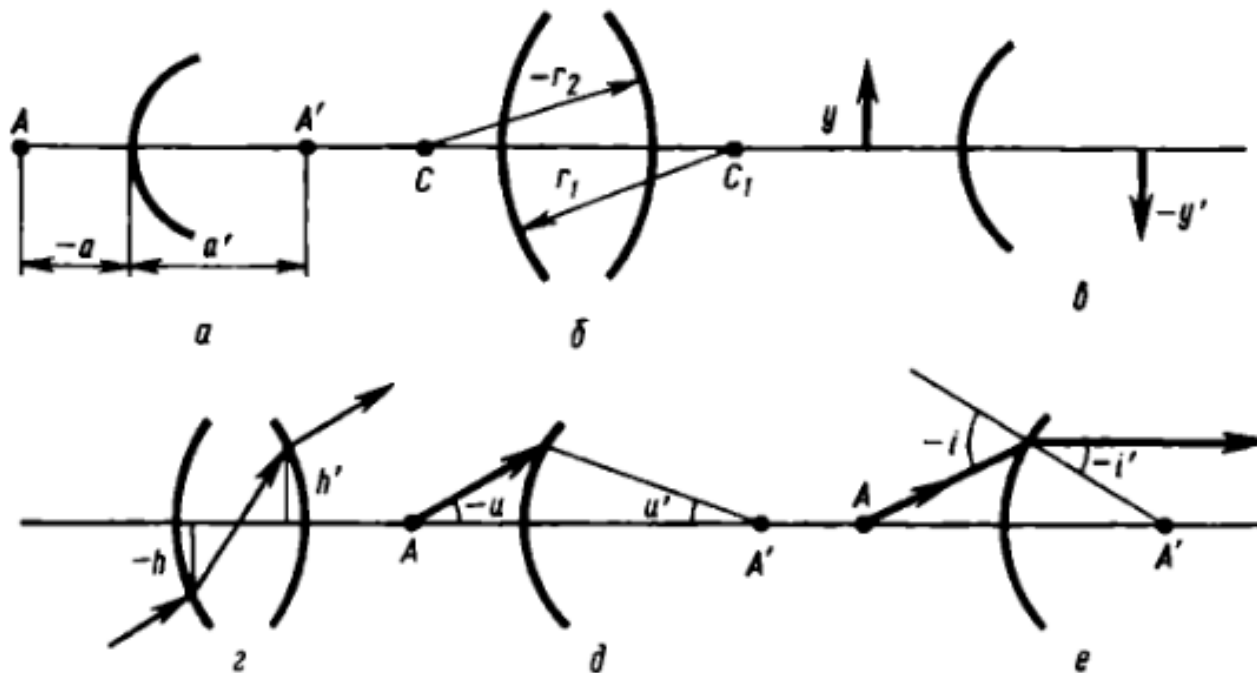
- Встановлений на Місяці Аполоном-11



Геометрична оптика. Застосування основних законів

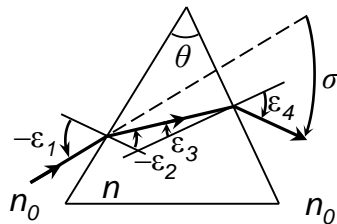
Правило знаків в геометричній оптиці

- за **додатній** напрямок розповсюдження світла прийнято напрямок **зліва направо**;
- **додатніми** вважаються **відрізки**, якщо вони відраховуються **вздовж** напрямку розповсюдження **світла**;
- **радіуси кривизни** поверхонь відраховуються **від вершин поверхонь**;
- відрізки, перпендикулярні до оптичної осі, вважаються **додатними**, якщо вони знаходяться **над віссю**, і від'ємними – **під віссю**;
- **кут** вважається **додатнім** відносно осі відліку, якщо відлік від осі ведеться **за годинниковою стрілкою**.

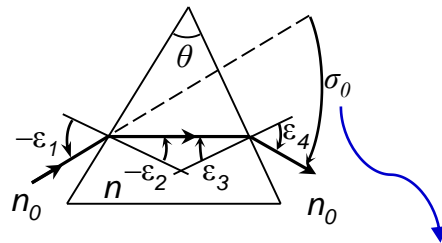


Геометрична оптика. Застосування основних законів

Призма як оптична деталь



кут відхилення
променя
призмою σ



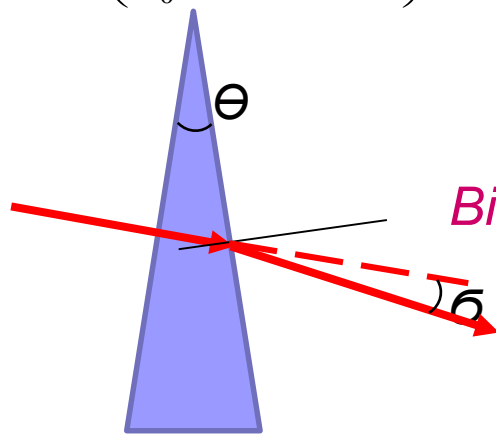
мінімальний кут
відхилення променя
призмою σ_0

(Має місце, коли промінь
всередині призми йде
паралельно її основі,
 $\epsilon_2 = \epsilon_3$, $\epsilon_1 = \epsilon_4$)

$$\sigma = (\epsilon_1 - \epsilon_2) + (\epsilon_4 - \epsilon_3) = (\epsilon_1 + \epsilon_4) - \theta$$

$$\sigma = \arcsin\left(\frac{n}{n_0} \sin(\theta + \epsilon_2)\right) - \arcsin\left(\frac{n}{n_0} \sin \epsilon_2\right) - \theta,$$

$$\sigma_0 = 2 \arcsin\left(\frac{n}{n_0} \sin \frac{\theta}{2}\right) - \theta$$



Відхилення променя
тонким клином
 $\sigma = \theta(n - 1)$



Центровані оптичні системи

Лінза – оптична деталь з прозорої речовини, обмежена двома заломлюючими вісесиметричними центрованими поверхнями.

Лінзи : сферичні, циліндричні, параболічні й т.д.

Стрепсиад

У лікарей такой видал ты камешек,
Красивый и прозрачный? Добывают им
Огонь они.

Сократ

Ты говоришь о стеклышке?

Стрепсиад

Ну да! Что, если я добуду стеклышко
И, подождав, пока напишет иск писец,
В сторонке стану, солнечный поймаю луч
И сразу растоплю истца ходатайство?



Аристофан. Комедія «Хмарки», 425 р. до н.е.

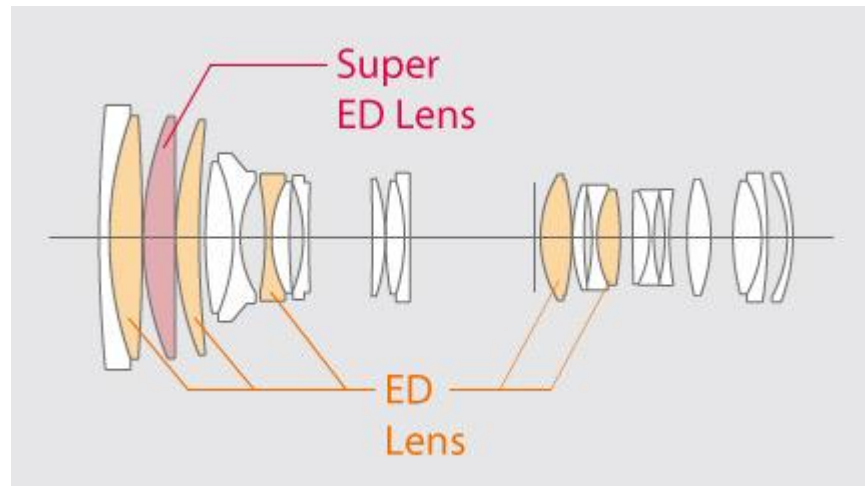
Центровані оптичні системи

Оптична система - сукупність оптичних лінз, призм, дзеркал, діафрагм та інших елементів, які формують пучок світлових променів.

Якщо центри кривизни поверхонь оптичних елементів (поверхонь обертання) лежать на одній осі, то такі системи називають *центрованими оптичними системами*, а вісь - **оптичною віссю**.



Телеоб'єктив Fujinon XF 50-140mm
F/2.8 R LM OIS WR

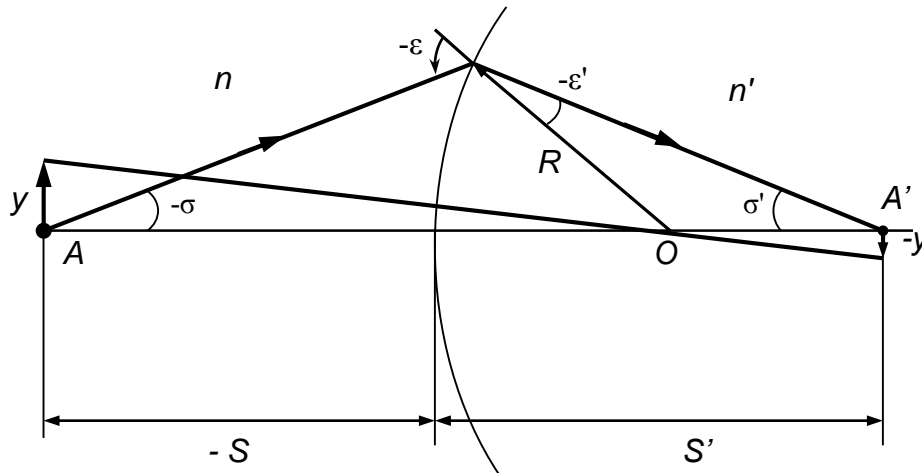


Центровані оптичні системи

Основні співвідношення параксіальної оптики

Параксіальними називаються промені, які виходять з предметної точки на оптичній осі під малими кутами і зустрічають оптичну систему на малій висоті.

Заломлення на одній сферичній поверхні



Інваріант Аббе

$$n' \left(\frac{1}{S'} - \frac{1}{R} \right) = n \left(\frac{1}{S} - \frac{1}{R} \right)$$

Центровані оптичні системи

Основні співвідношення параксіальної оптики

Формула Аббе

$$\frac{n'}{S'} - \frac{n}{S} = \frac{n' - n}{R}$$

Оптична сила однієї
заломлюючої поверхні,
діоптрія [дптр]

якщо $S \rightarrow \infty$, то $S' = f'$

$$\Phi = \frac{n'}{f'} = \frac{(n' - n)}{R}$$

Інваріант Лагранжа-
Гельмгольца

$$n \cdot y \cdot \sigma = n' \cdot y' \cdot \sigma'$$

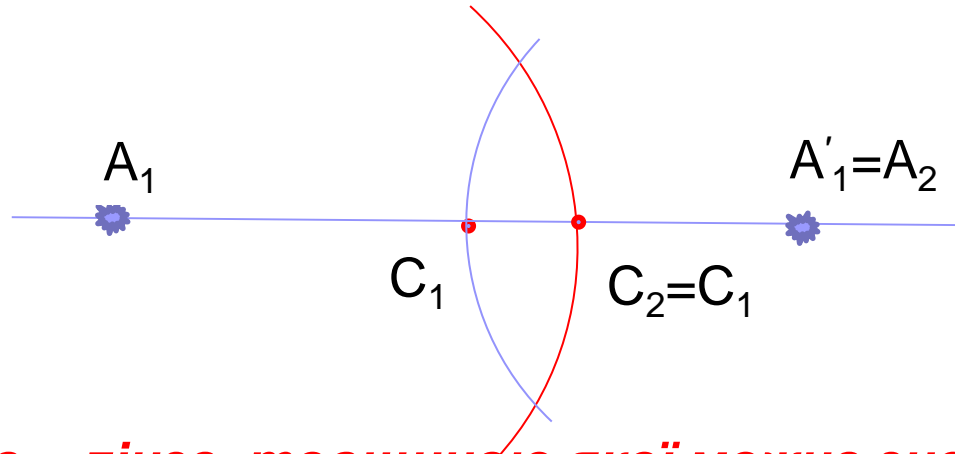
Формула сферичного
дзеркала

Враховуючи, що для дзеркала в
повітрі $n' = -n = -1$

$$\frac{1}{S'} + \frac{1}{S} = \frac{1}{R}$$

Тонка лінза

Формула тонкої лінзи

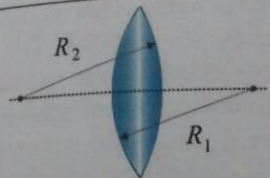
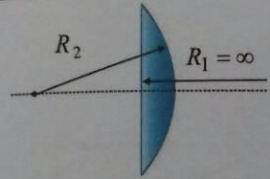
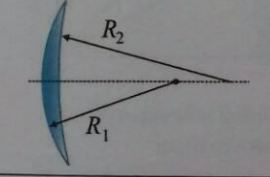
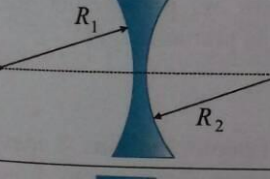
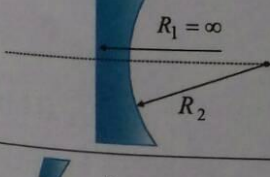
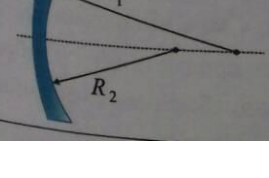


Тонка лінза – лінза, товщиною якої можна знехтувати

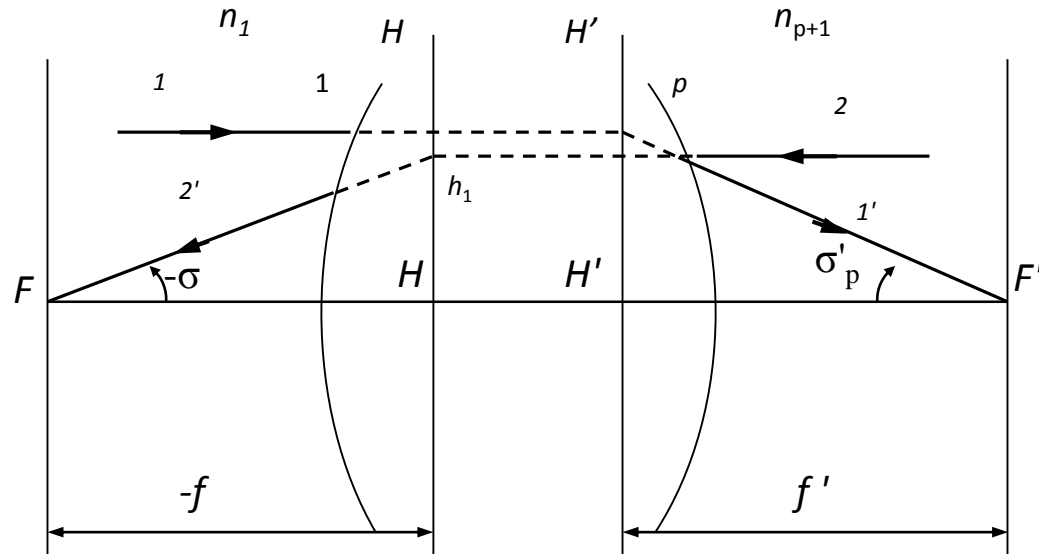
$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 = \frac{n - n'}{R_1} + \frac{n' - n}{R_2} = (n - n') \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

$$\Phi = \frac{n'}{f'} = -\frac{n}{f}$$

Класифікація тонких лінз

Форма лінзи	Назва лінзи	Характеристика лінзи. Оптична сила лінзи	Параметри
	Подвійно-опукла	Збиральна $\Phi > 0$	$N > 1$ $R_1 > 0$ $R_2 < 0$
	Плоско-опукла	Збиральна $\Phi > 0$	$N > 1$ $R_1 = \infty$ $R_2 < 0$
	Опукло-увігнута (Додатний меніск)	Збиральна $\Phi > 0$	$N > 1$ $R_1 > 0$ $R_2 > 0$ $R_1 < R_2$
	Подвійно-увігнута	Розсіювальна $\Phi < 0$	$N > 1$ $R_1 < 0$ $R_2 > 0$
	Плоско-увігнута	Розсіювальна $\Phi < 0$	$N > 1$ $R_1 = \infty$ $R_2 > 0$
	Опукло-увігнута (Від'ємний меніск)	Розсіювальна $\Phi < 0$	$N > 1$ $R_1 > 0$ $R_2 > 0$ $R_2 < R_1$

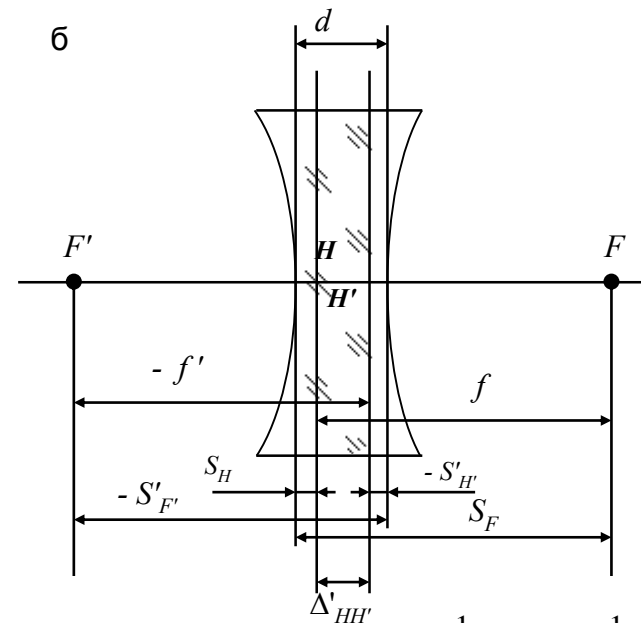
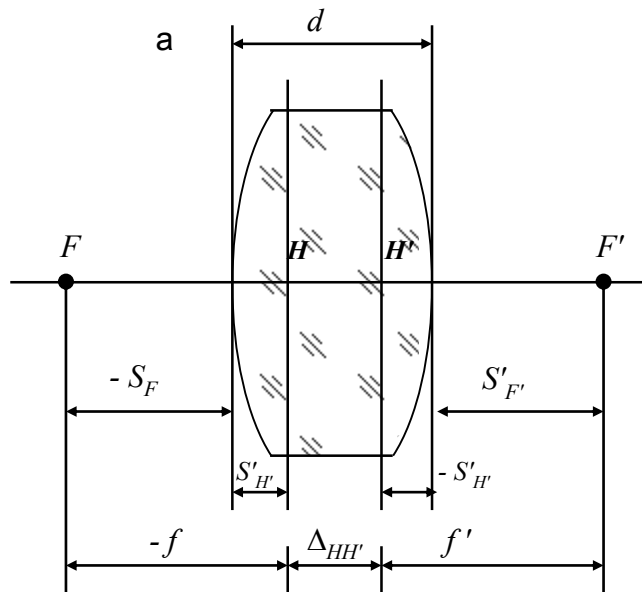
Кардинальні елементи оптичної системи



Кардинальними елементами оптичної системи є фокуси, фокальні площини, головні точки й головні площини

$$-\frac{f}{f'} = \frac{n_1}{n_{p+1}}$$

Товста лінза



$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - \frac{d}{n} \Phi_1 \cdot \Phi_2$$

$$\frac{1}{f'} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \frac{(n-1)^2}{nR_1R_2} d;$$

$$f = -f';$$

$$S'_F = f' \left(1 - \frac{n-1}{nR_1} d \right);$$

$$S_F = -f' \left(1 + \frac{n-1}{nR_2} d \right);$$

$$S'_H = -f' \frac{n-1}{nR_1} d;$$

$$S_H = f \frac{n-1}{nR_2} d;$$

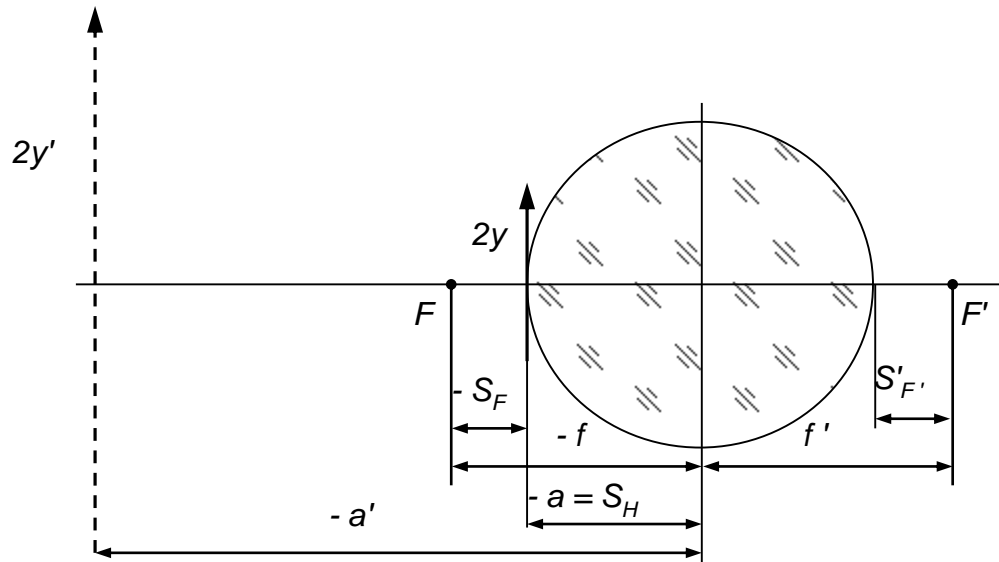
$$\Delta_{HH'} = \left(1 - \frac{f'}{n} (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \right) d.$$

Товста лінза

Задача

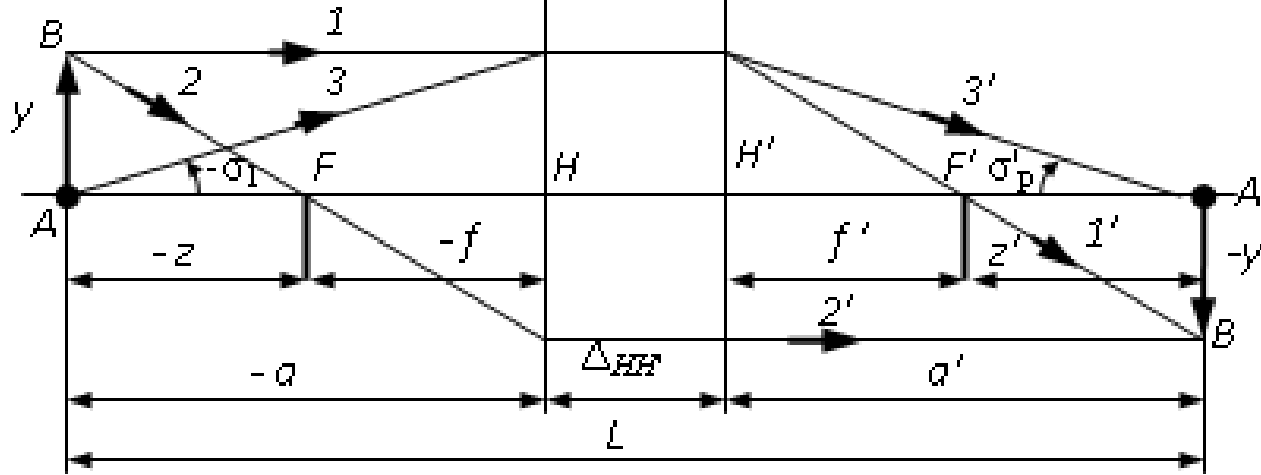
а) Знайти положення кардинальних елементів скляної кулі діаметром 50 мм, виготовленої із скла КФ4.

б) Визначити положення зображення та його збільшення, якщо предмет приклали впритул до кулі.



Ідеальна оптична система

Ідеальною оптичною системою називають оптичну систему, яка відображає **точку** предмета **точкою** й зберігає заданий масштаб зображення



Поперечне (лінійне) збільшення

$$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{f}{z} = -\frac{z'}{f'} = -\frac{fa'}{f'a} = \frac{na'}{n'a}$$

У повітрі

$$\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'}$$

Якщо n – показник заломлення середовища перед лінзою (у просторі предметів),

a n' – за лінзою (в просторі зображень),

то

$$\frac{n'}{a'} - \frac{n}{a} = \frac{n'}{f'}$$

Завжди!

$$\frac{f'}{f} = -\frac{n'}{n}$$

Ідеальна оптична система

1. Формула Ньютона

$$zz' = ff'$$

2. Формула Гаусса

$$\frac{f'}{a'} + \frac{f}{a} = 1$$

3. Формула відрізків

$$\frac{n'}{a'} - \frac{n}{a} = \frac{n'}{f'}$$

4. Лінійне збільшення

$$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{f}{z} = -\frac{z'}{f'} = -\frac{fa'}{f'a} = \frac{na'}{n'a}$$

5. Кутове збільшення

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} \sigma'_p}{\operatorname{tg} \sigma_1} = \frac{a}{a'} = \frac{n}{n'} \frac{1}{\beta}$$

6. Поздовжнє збільшення

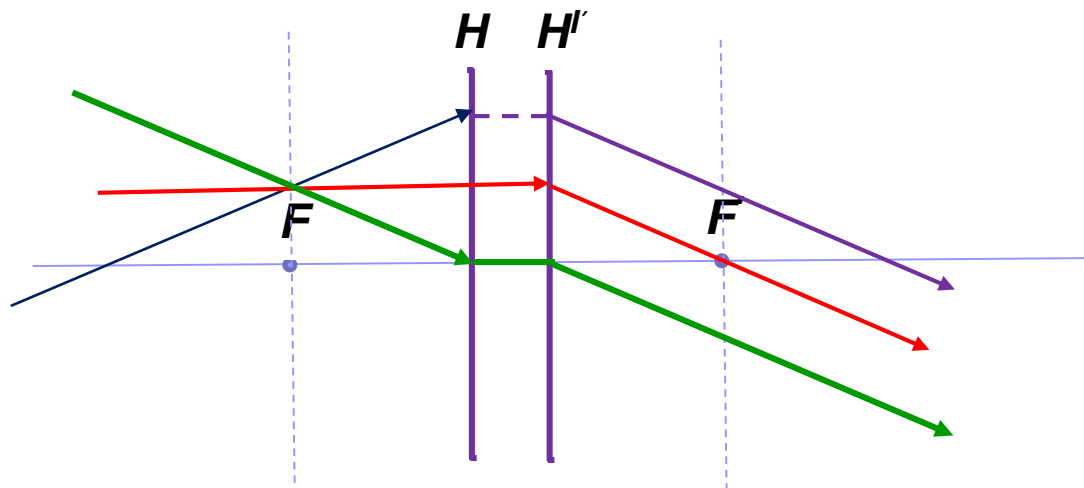
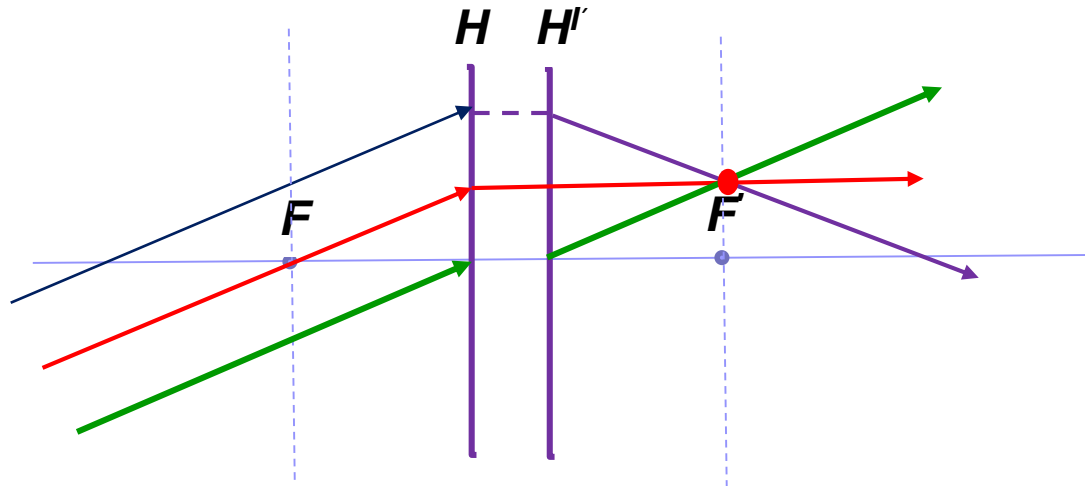
$$\alpha = \frac{\partial z'}{\partial z} = -\frac{z'}{z} = -\frac{ff'}{z^2} = \frac{n'}{n} \beta^2$$

7. Зв'язок між збільшеннями

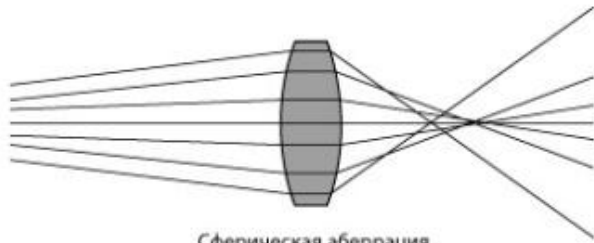
$$\beta\gamma = \frac{n}{n'}; \quad \alpha\gamma = \beta.$$

$$f' = -\frac{L - \Delta_{HH'}}{(1 - \beta)^2} \beta; \quad a' = f'(1 - \beta); \quad a = \frac{1 - \beta}{\beta} f'$$

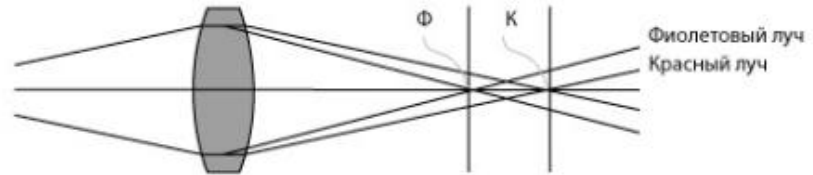
Побудова ходу променів і зображень Допоміжні промені



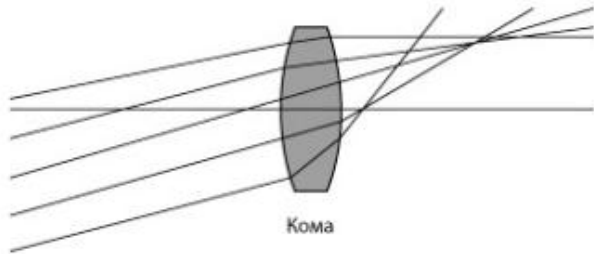
Аберації оптичних систем



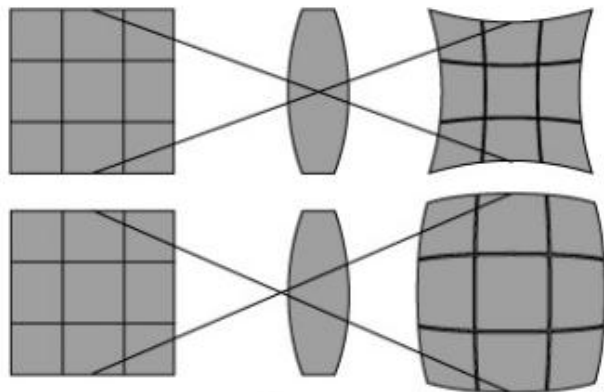
Сферическая абберация



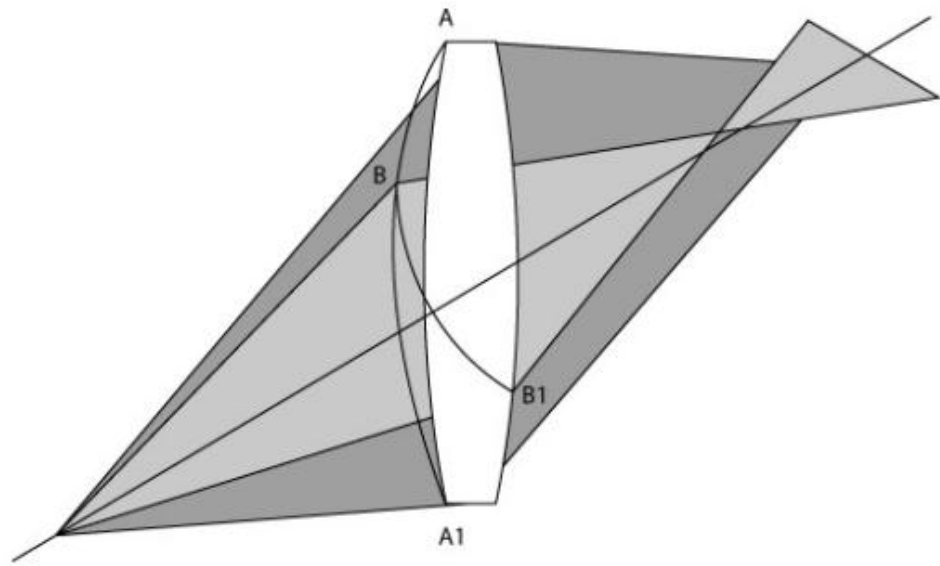
Хроматическая абберация. Ф - фокус фиолетовых лучей, К - фокус красных лучей.



Кома

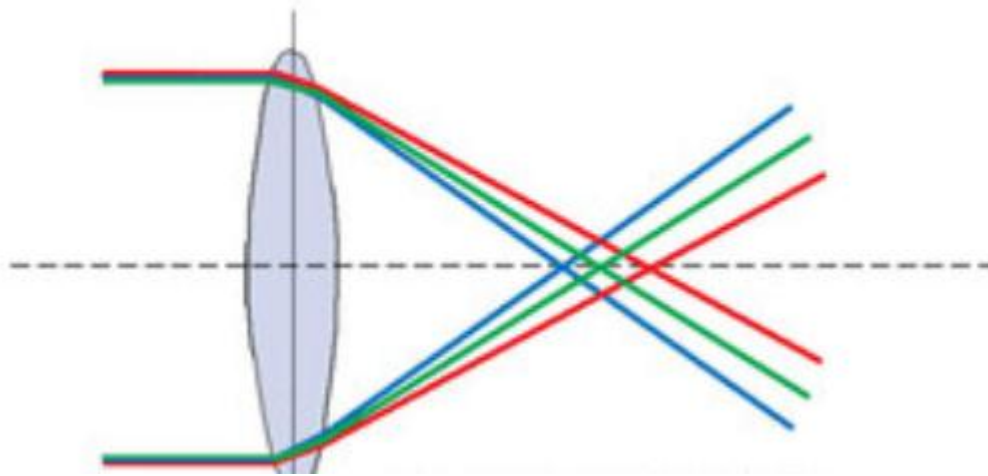


Дисторсия



Астигматизм

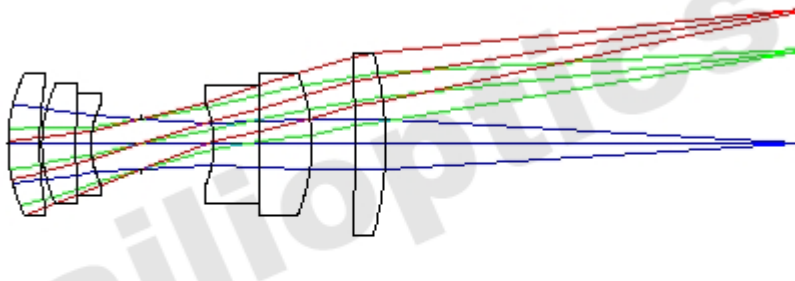
Аберації оптичних систем



Хроматичні аберації

Корекція аберрацій

Об'єктив iPhone 6

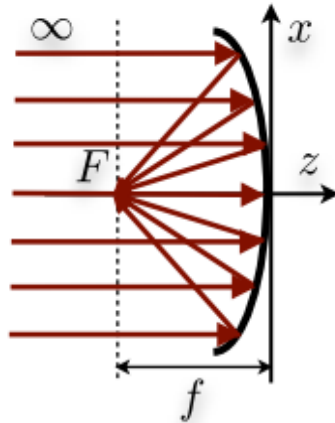


8Мп камера iPhone 6

LAYOUT	
11.5X FRI MAR 7 2003 TOTAL LENGTH: 103.07000 MM	C:\ZEMAX\SAMPLES\11.5.ZMX C:\ZEMAX\SAMPLES\11.5.ZMX

Перенесення зображення точкового предмету в нескінченність і навпаки \equiv взаємне перетворення плоского і сферичного хвильових фронтів

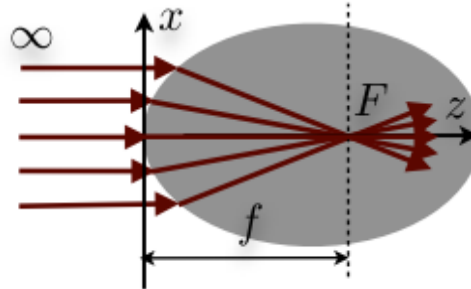
object at ∞
image at F



paraboloidal reflector

$$s = \frac{x^2}{4f}$$

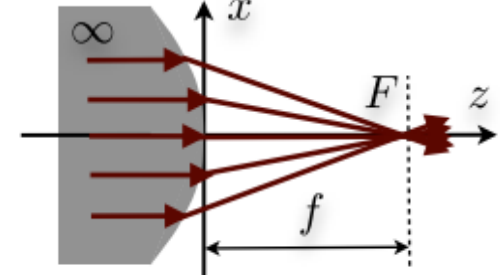
object at ∞
image at F



ellipsoidal refractor

$$\left(s - \frac{n}{n+1}f\right)^2 + \frac{n^2}{n^2-1}x^2 = \left(\frac{n}{n+1}f\right)^2$$

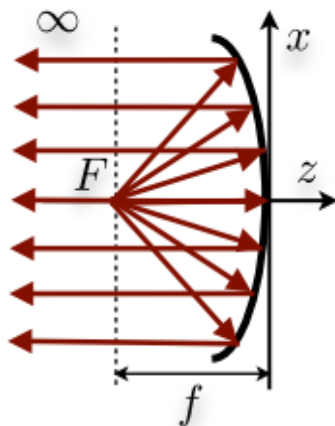
object at ∞
image at F



hyperboloidal refractor

$$\left(s - \frac{1}{n+1}f\right)^2 - \frac{1}{n^2-1}x^2 = \left(\frac{1}{n+1}f\right)^2$$

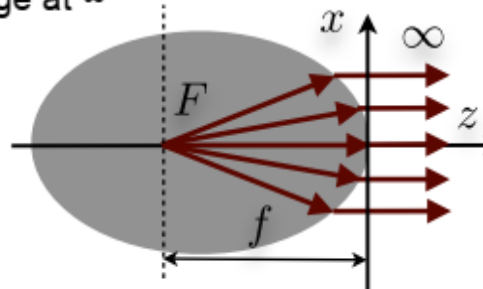
object at F
image at ∞



paraboloidal reflector

$$s = \frac{x^2}{4f}$$

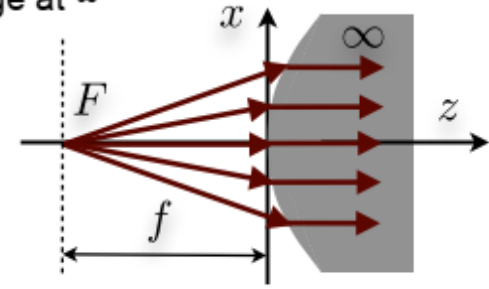
object at F
image at ∞



ellipsoidal refractor

$$\left(s + \frac{n}{n+1}f\right)^2 + \frac{n^2}{n^2-1}x^2 = \left(\frac{n}{n+1}f\right)^2$$

object at F
image at ∞

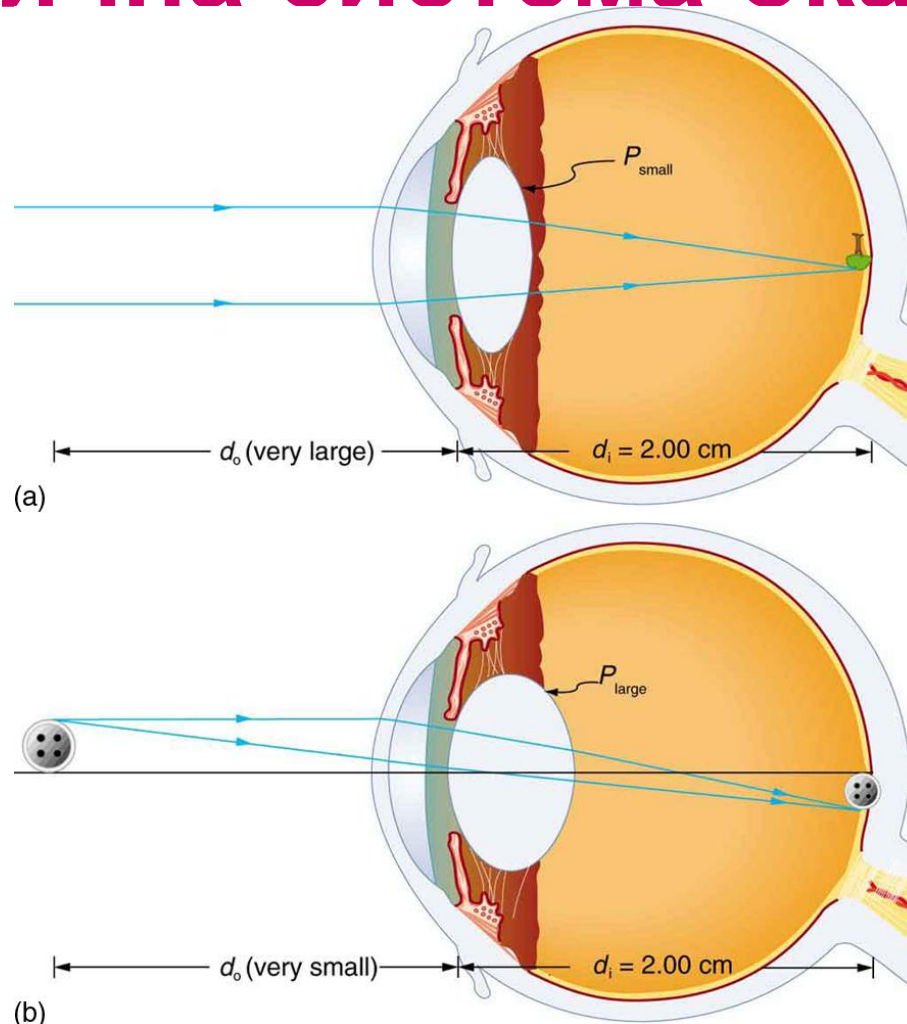


hyperboloidal refractor

$$\left(s + \frac{1}{n+1}f\right)^2 - \frac{1}{n^2-1}x^2 = \left(\frac{1}{n+1}f\right)^2$$

Оптична система ока

Акомодація ока



Задача

Межі акомодатії ока короткозорої людини без окулярів лежать між $a_1 = 16\text{см}$ і $a_2 = 80\text{см}$. В окулярах вона добре бачить віддалені предмети. На якій мінімальній відстані d вона може тримати книгу при читанні в окулярах?

Оптичні інструменти

Видиме збільшення – відношення тангенсу кутового розміру зображення до тангенсу кутового розміру предмета

1. Лупа

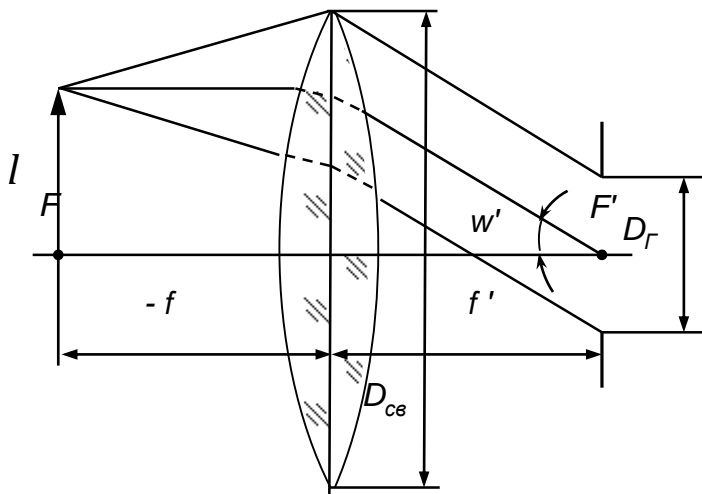
$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} W'}{\operatorname{tg} W} = \frac{\frac{l}{f'}}{\frac{l}{L}} = \frac{L}{f'}$$

Лупа – збиральна лінза або система лінз, призначена для візуального спостереження за предметом, який розташовано в передній фокальній площині або за нею.

❖ **видиме збільшення при акомодції ока на нескінченність**

$$\Gamma = \frac{L}{f'} = \frac{250}{f'}$$

де $L = 250$ мм – відстань найкращого зору



Задача

Лупа дає збільшення $\Gamma = 2$. Впритул до неї приклали збиральну лінзу з оптичною силою $\Phi_1 = 20$ дптр. Яке збільшення Γ_2 буде давати така складена лупа?

Оптичні інструменти

Задача

Лупа дає збільшення $\Gamma = 2$. Впритул до неї приклали збиральну лінзу з оптичною силою $\Phi_1 = 20$ дптр. Яке збільшення Γ_2 буде давати така складена лупа?

Розв'язання:

1. видиме збільшення лупи
при акомодатії ока
на нескінченність

$$\Gamma = \frac{L}{f'} = L \cdot \Phi_0$$

де Φ_0 – оптична
сила лупи

$$\Phi_0 = \frac{\Gamma}{L} = \frac{2}{0,25} = 8$$

2. Так як обидві лінзи тонкі і
складені впритул, то оптична
сила такої складеної лупи

$$\Phi_2 = \Phi_0 + \Phi_1 = 28$$

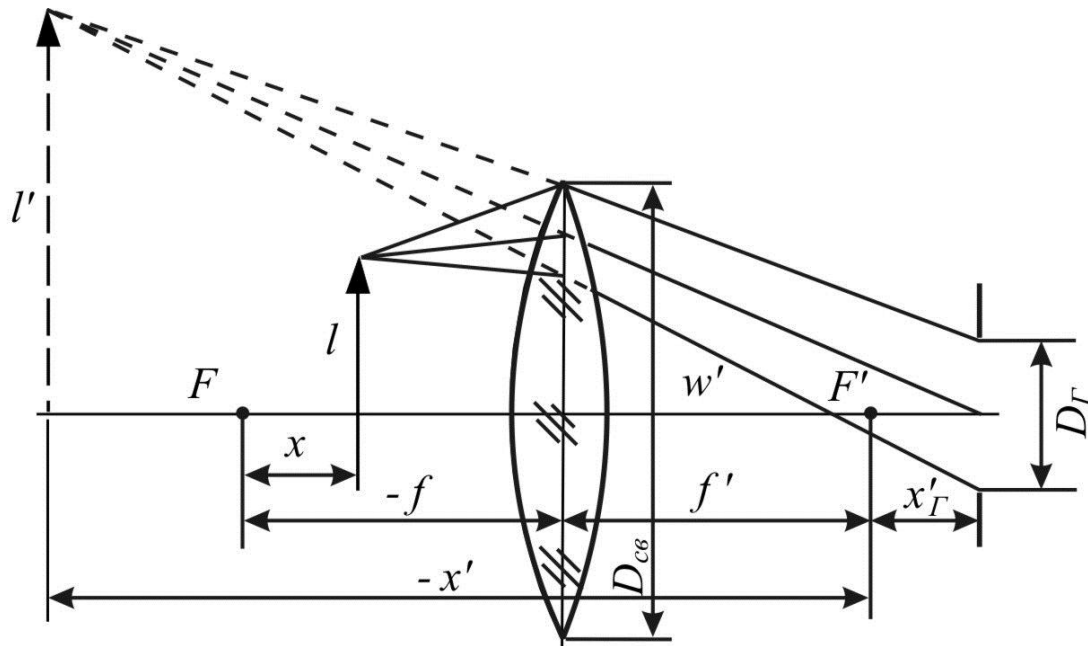
3. Збільшення складеної
лупи

$$\Gamma = \frac{L}{f'} = L \cdot \Phi_2 = 7$$

Оптичні інструменти

Лупа

❖ видиме збільшення при акомодції ока на відстань найкращого зору



$$\Gamma = 1 + \frac{250}{f'}$$

де $L = 250$ мм – відстань найкращого зору

Оптичні інструменти

2. Телескоп

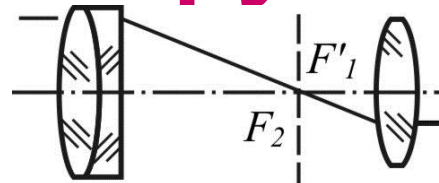
❖ Зорові труби

❖ видиме збільшення

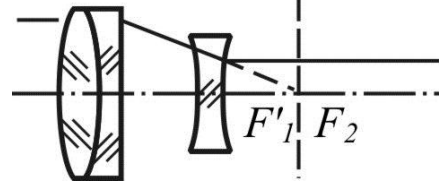
$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} W'}{\operatorname{tg} W} = -\frac{f'_{об}}{f'_{ок}}$$

Задача

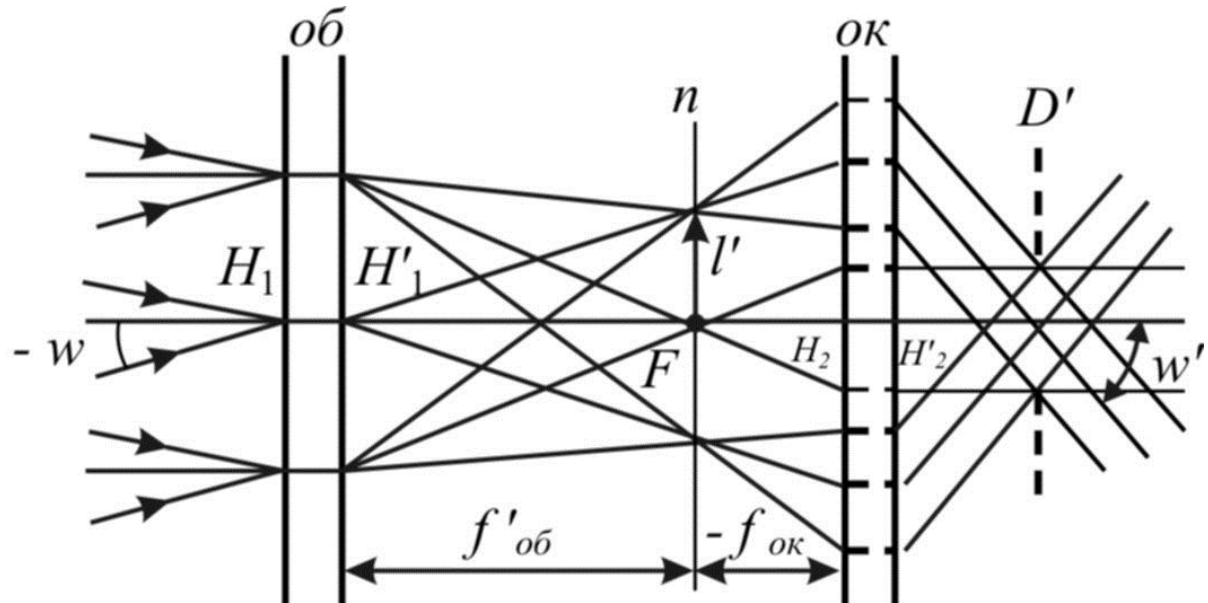
Оптична сила Φ об'єктива телескопа дорівнює 0,5 дптр. Окуляр діє як лупа, що дає збільшення $\Gamma_1 = 10$. Яке збільшення Γ_2 дає телескоп?



Кеплера



Галілея



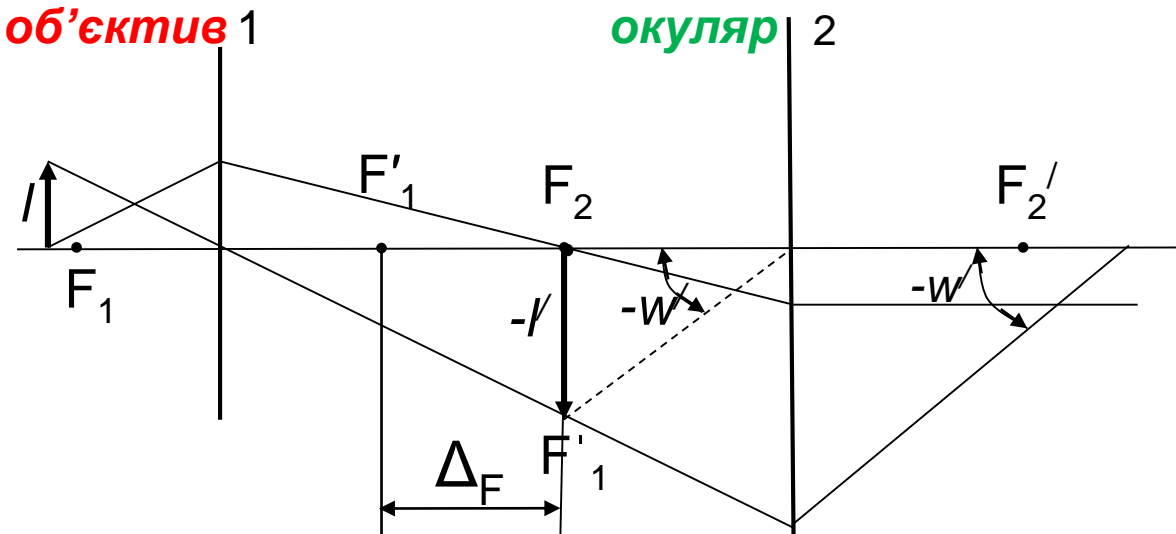
$$L = f'_{об} + f'_{ок}$$

Оптичні інструменти

2. Мікроскоп

❖ **видиме збільшення**

$$\Gamma = \beta \cdot \Gamma_{ок} = \frac{-250 \cdot \Delta_F}{f'_1 \cdot f'_2}$$



Основні характеристики

об'єктивів мікроскопів:

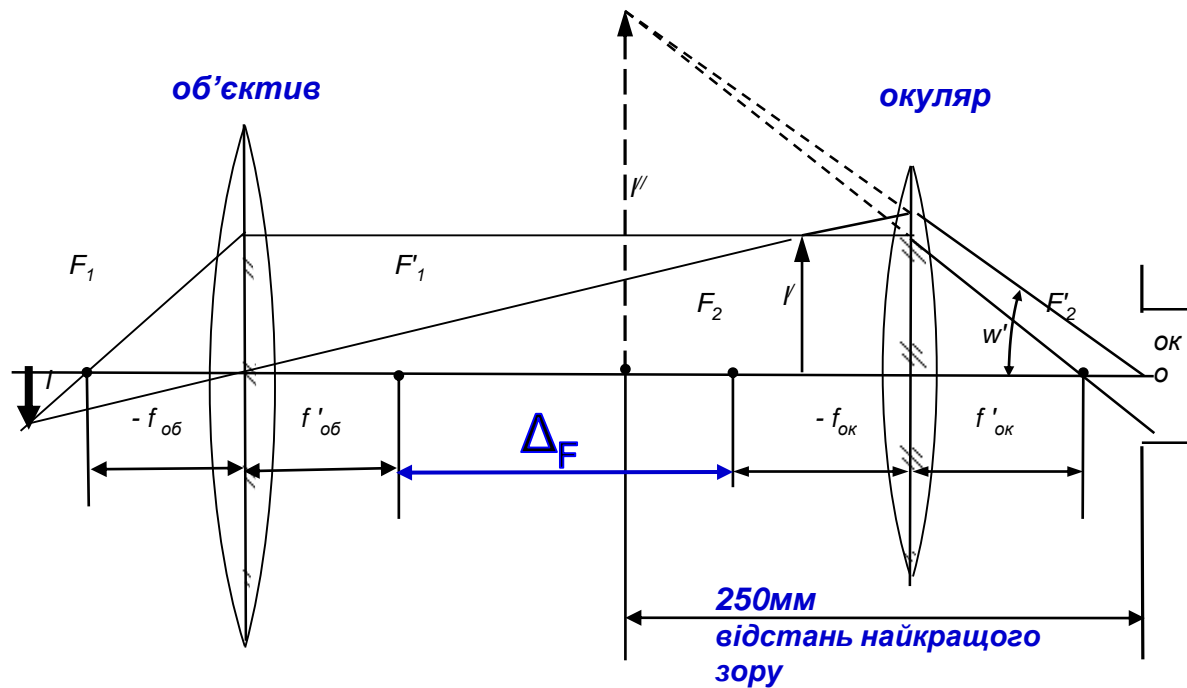
- лінійне збільшення (від 3х до 90х)
- числова апертура (від 0,01 до 1,4).

Найвживаніші

окулярі мікроскопів мають:

збільшення від 5х до 20х ,
що відповідає фокусним відстаням
від 50 мм до 12,5 мм

❖ **видиме
збільшення**

$$\Gamma = \beta \cdot \Gamma_{oK} = \frac{-\Delta_F}{f_1'} \left(\frac{250}{f_2'} + 1 \right)$$


Оптичні інструменти

2. Мікроскоп

Задача

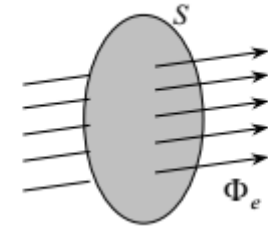
Відстань Δ між фокусами об'єктива й окуляра всередині мікроскопа дорівнює 16 см. Фокусна відстань f_1 об'єктива дорівнює 1 мм. З якою фокусною відстанню f_2 варто взяти окуляр щоб одержати збільшення $\Gamma = 500$?



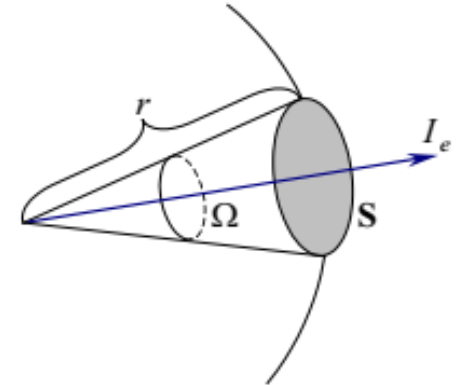
Фотометрія

Основні поняття і закони

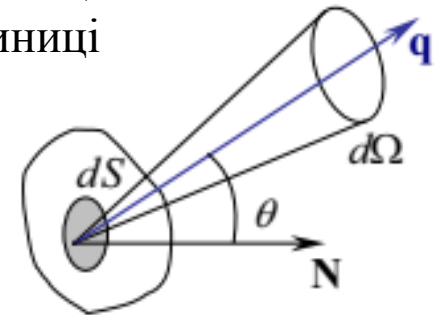
Потік випромінювання (світловий потік) – це енергія, яку переносить світлова хвиля за одиницю часу через дану ділянку
 $[\text{Дж/с}] = [\text{Вт}], [\text{лм}]$



Енергетична сила світла (Сила світла) - світловий потік, який випромінюється в даному напрямку в одиниці тілесного кута
 $[\text{Вт/ср}], [\text{лм/ср}] = [\text{кд}]$



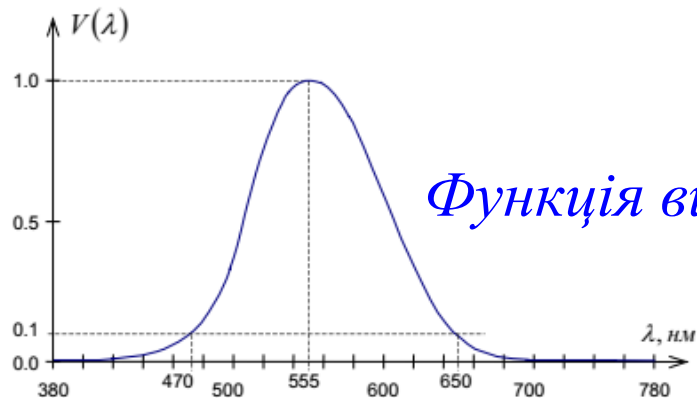
Енергетична яскравість (Яскравість) - світловий потік в одиниці тілесного кута, який випромінюється в даному напрямку з одиниці **видимої площі** поверхні випромінювання $dS \cos \theta$
 $[\text{Вт/м}^2 \text{ ср}], [\text{кд/м}^2]$



Фотометрія Основні поняття і закони

Енергетичні характеристики		Світлові характеристики	
Променистий потік (потік випромінювання) – потужність випромінювання	$\Phi_e = \int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda} d\lambda, \text{ Вт},$ $\Phi_{e\lambda} = d\Phi_e / d\lambda - \text{спектральна густина потоку випромінювання, Вт/мкм}$	Світловий потік - потужність випромінювання у видимому діапазоні, яка оцінюється за зоровим сприйняттям	$\Phi_v = \int_0^{\infty} K_{\lambda} \Phi_{e\lambda} d\lambda = 683 \int_{0,38}^{0,78} V_{\lambda} \Phi_{e\lambda} d\lambda$, лм (люмен), де: V_{λ} - видність ока (спектральна чутливість ока), $K_{\lambda m} = 683 \text{ лм/Вт}$ - світловий еквівалент
Промениста енергія	$W_e = \int_0^t \Phi_e(t) dt, \text{ Дж}$	Світлова енергія	$W_v = \int_0^t \Phi_v(t) dt, \text{ Дж}$
Енергетична сила світла (сила випромінювання) у даному напрямку	$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}, \text{ Вт/ср}$	Сила світла - світловий потік, який випромінюється в даному напрямку в одиниці тілесного кута	$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}, \text{ кд (кандела);}$ 1 кд = 1 лм/ср стара свіча = 1,005 кд, 1 кд = 1/60 сили світла, яке випромінює 1 см ² АЧТ при 2042,5 К (температура затвердіння платини за нормального тиску)
Поверхнева щільність потоку випромінювання (енергетична світність)	$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA_1}, \text{ Вт/м}^2$	Світність - світловий потік з одиниці площі джерела випромінювання	$M_v = \frac{d\Phi_v}{dA} \text{ лм/м}^2$

Фотометрія



Функція видності ока

Енергетична освітленість (опромінення)

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA_2}, \text{ Вт/м}^2$$

Освітленість - світловий потік, який падає на одиницю площі освітлюваної поверхні

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA_2}, \text{ лк} = \text{лм/м}^2 \text{ (люкс)}$$

Енергетична яскравість
випромінюваної поверхні в даному напрямку - відношення енергетичної сили світла в цьому напрямку до видимої площі поверхні джерела випромінювання

$$B_{e\alpha} = \frac{dI_{e\alpha}}{dS_1 \cdot \cos \alpha}, \text{ Вт/м}^2\text{ср},$$

де α – кут між нормаллю до поверхні і напрямком випромінювання

Яскравість -
світловий потік в одиниці тілесного кута, який випромінюється в даному напрямку з одиниці видимої площі поверхні випромінювання

$$B_{v\alpha} = \frac{d^2\Phi_v}{d\Omega dS_1 \cdot \cos \alpha} = \frac{dI_{v\alpha}}{dS_1 \cdot \cos \alpha}, \text{ кд/м}^2,$$

стільб: $1 \text{ сб} = 10^4 \text{ кд/м}^2$
1 ламберт = $10^4/\pi \text{ кд/м}^2$
1 нт = 1 св/м^2 (ніт)

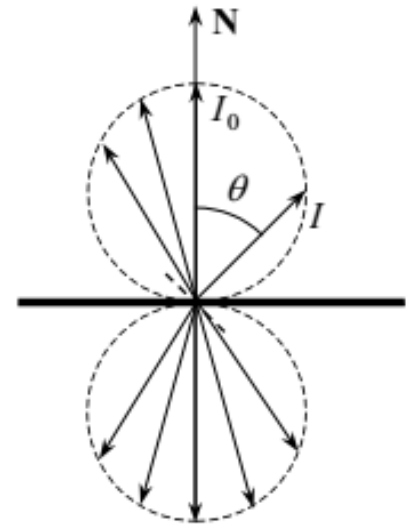
Фотометрія

У **ламбертівського випромінювача** яскравість постійна і не залежить від напрямку випромінювання

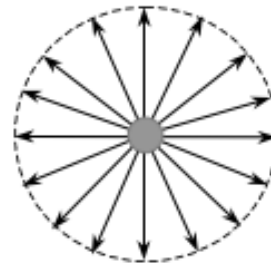
Плоский ламбертівський випромінювач
(матовий папір, поверхня свіжого снігу, тощо)

Закон Ламберта

Сила світла плоского рівнояскравого джерела світла змінюється за законом косинуса $dI_{e\alpha} = B_e \cdot dA_1 \cos \alpha = dI_{e0} \cos \alpha$



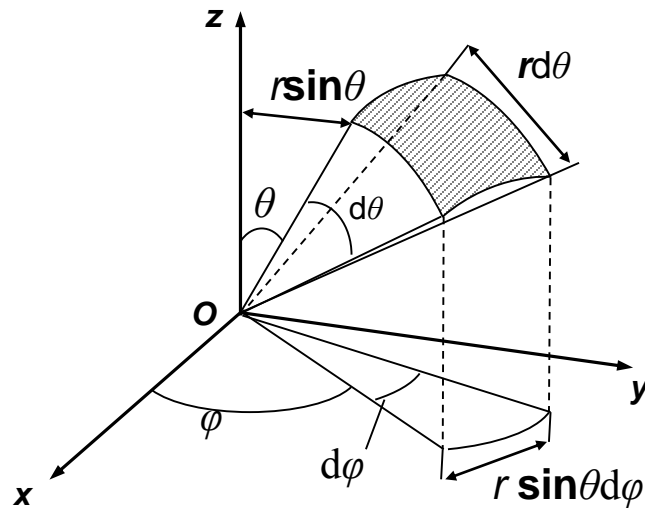
Сферичний ламбертівський випромінювач має силу світла $I = I_0 = \text{const}$



Фотометрія

Задача

Пржектор ближньої дії дає пучок світла у вигляді конуса з кутом розкриву $2\theta_0 = 40^\circ$. Світловий потік Φ прожектора дорівнює $8 \cdot 10^4$ лм. Припускаючи, що світловий потік всередині конуса розподілений рівномірно, визначити силу світла прожектора.



Визначення тілесного кута в полярних координатах

Розв'язання:

Елементарний тілесний кут

$$d\Omega = \frac{ds}{r^2}$$

$$ds = (r \cdot d\theta)(r \sin \theta \cdot d\varphi)$$

Фотометрія

Розв'язання:

Повний тілесний кут прожектора

$$\Omega = \int_0^{\theta_0} \sin \theta \cdot d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi = 2\pi(1 - \cos \theta_0)$$

З означення сили світла $I = \frac{\Phi}{\Omega} = \frac{\Phi}{2\pi(1 - \cos \theta_0)}$

$$I = \frac{8 \cdot 10^{-4}}{2\pi(1 - 0,94)} = 211 \text{ ккд}$$