

Загальна фізика

Загальна фізика

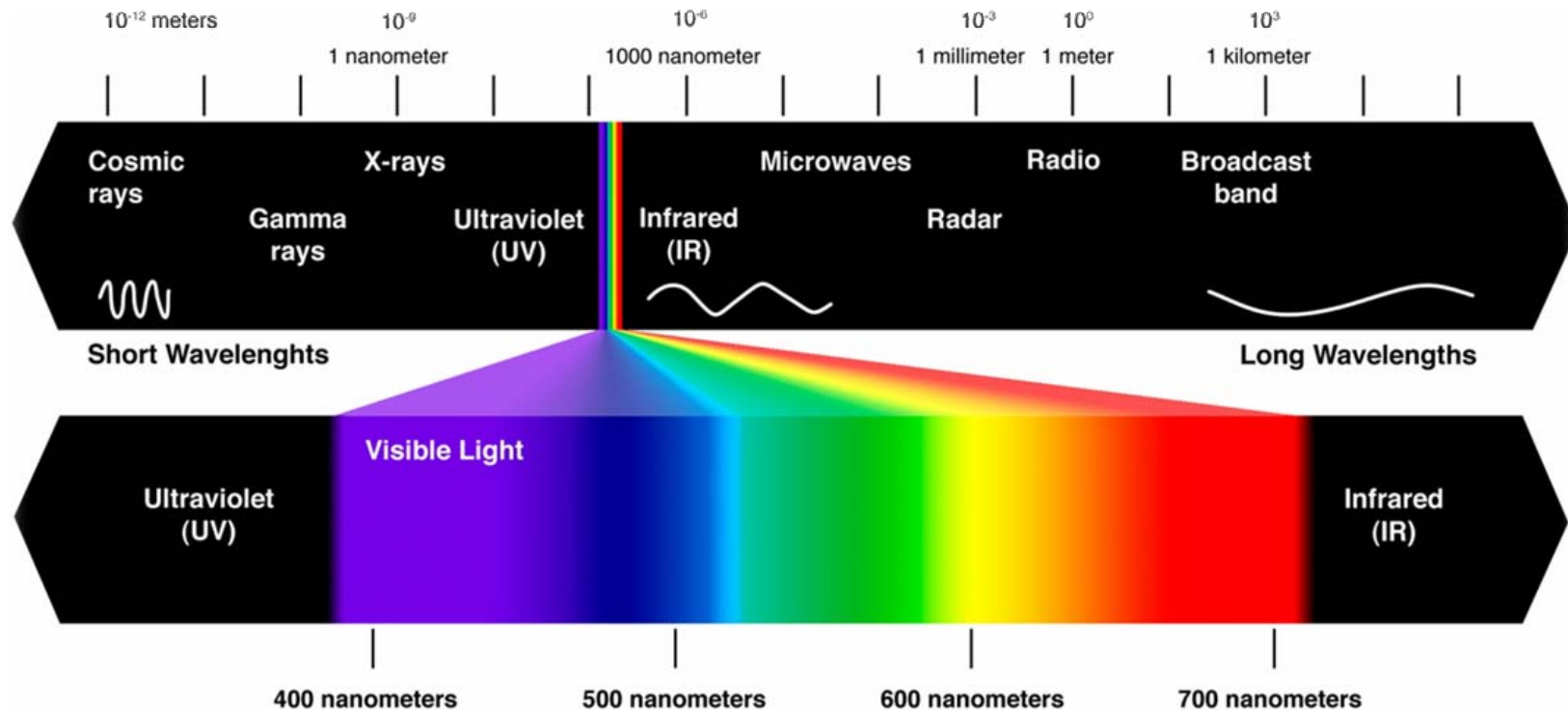
ОПТИКА

Кафедра прикладної фізики ФТІ НТУУ “КПІ”

Доц. Іванова В.В.

2.1 Оптичне випромінювання

Шкала електромагнітного випромінювання



- *Оптичний діапазон* $10^{17} - 10^{11} (10^{12})$ Гц
- *Видиме світло* $10^{15} - 0,5 \cdot 10^{14}$ Гц (0,38 – 0,78 мкм)
- *ІЧ випромінювання* $10^{14} - 10^{12} (10^{11})$ Гц
- *Т- випромінювання (ТГц діапазон)* 0,1 – 10 ТГц

Етапи історії розвитку оптики

I етап : вивчення видимого оком світла

■ Геометрична оптика

Платон (427— 347 до н. е.)

Птолемей (II в. н. е.)
праця "Оптика" в 5 книгах,

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

*"Світло – промені, які
виходять з очей,
розповсюджуються по
прямому шляху"*



Платон и Аристотель, Рафаэль Санти

Арістотель (384-322 до н.е.)

*"Світло – дія, рух, який
розповсюджується в
просторі"*

Архімед

(287-212 до н.е.) (сжег римский флот близ
Сиракуз с помощью "зажигательных вогнутых зеркал")

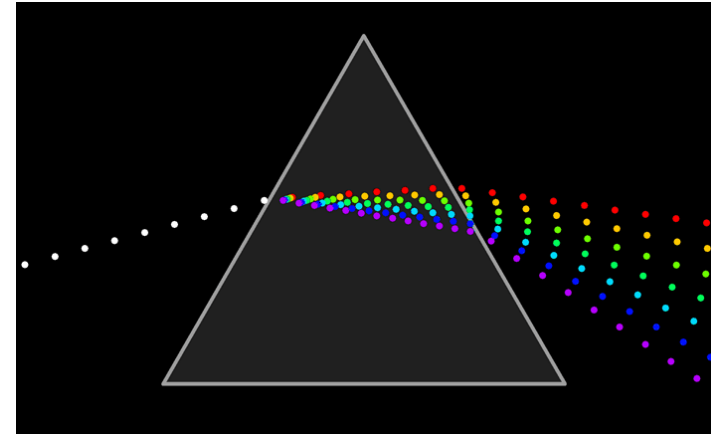
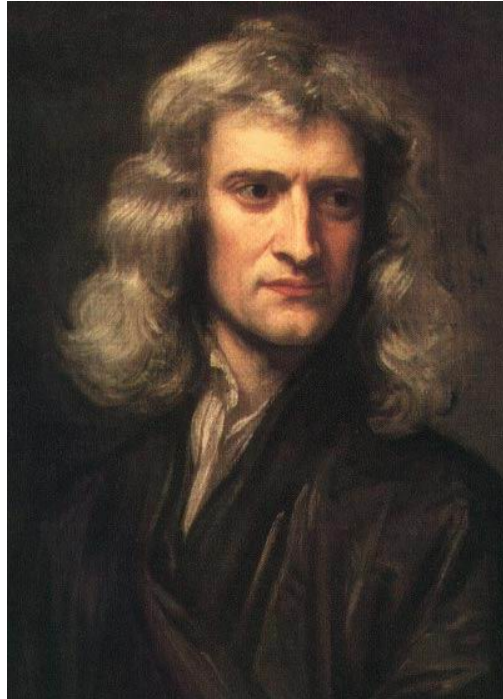
Ломоносов, Ейлер



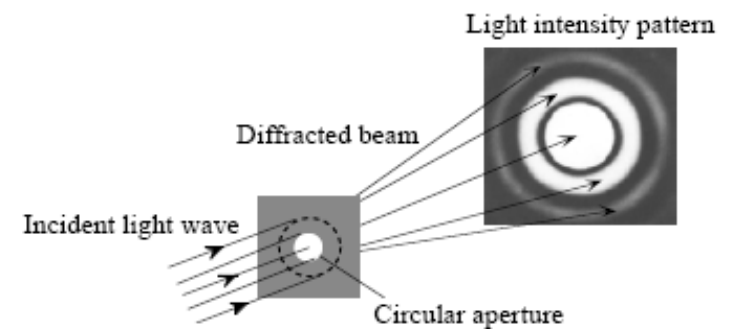
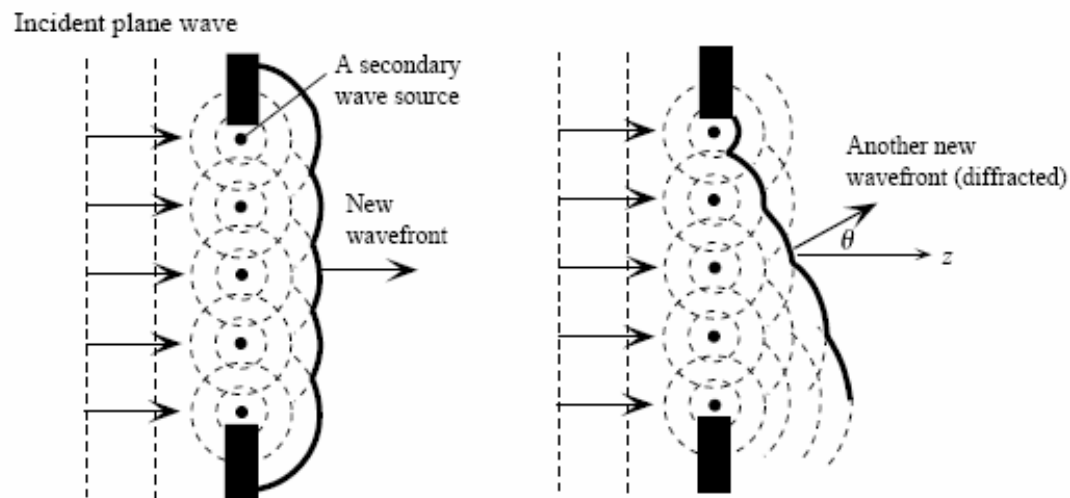
Етапи історії розвитку оптики

I етап : вивчення видимого оком світла

- Корпускулярна теорія
- НЬЮТОН (1642-1729),
Декарт (1596-1650) ?



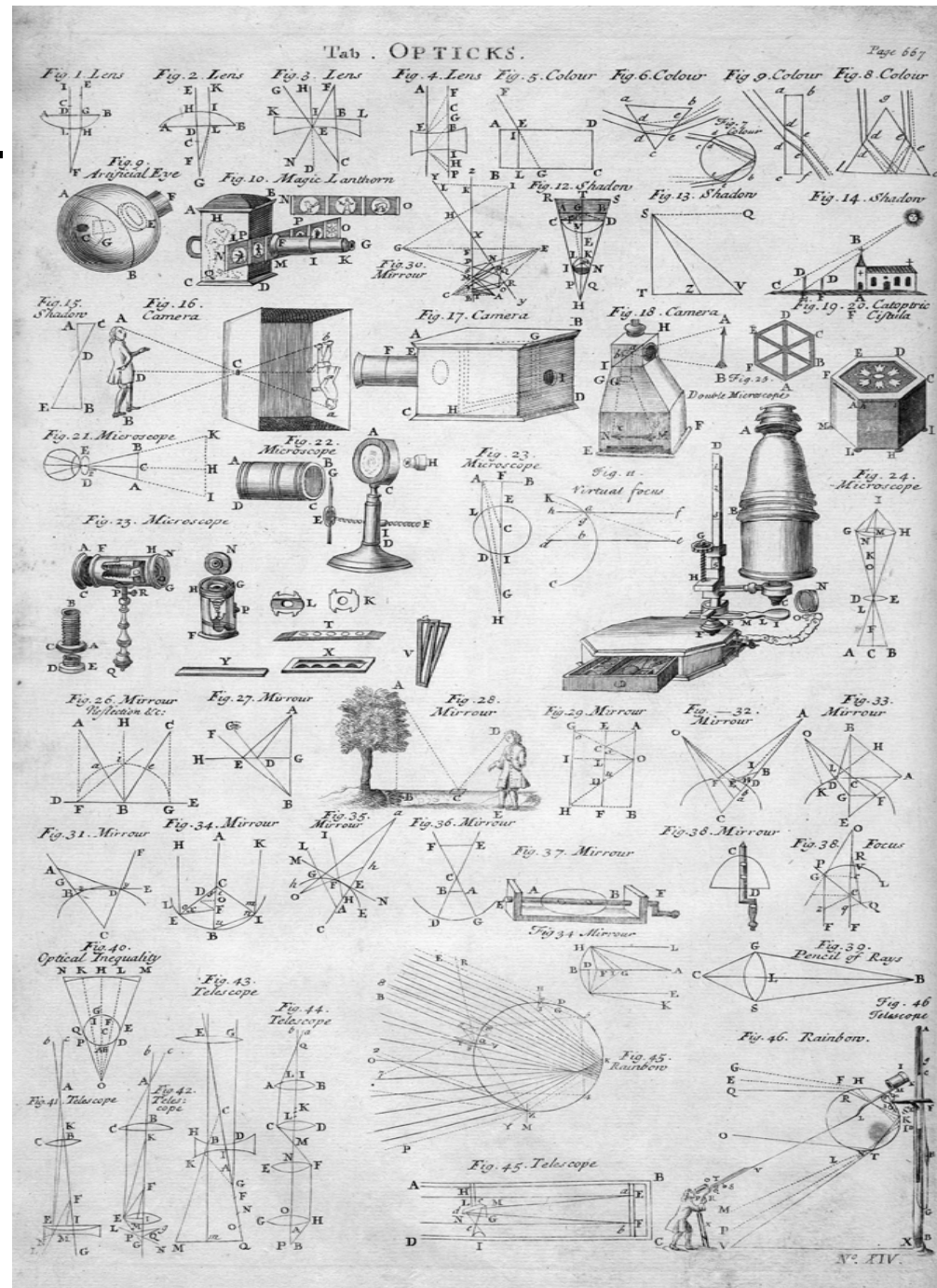
- Хвильова теорія
- Грімальді, Марци
- Гюйгенс
- Юнг
- Френель
- Фраунгофер



Принцип Гюйгенса-Френеля

ОПТИКА XVII – XVIII ст.

Таблиця з
енциклопедії
1728 року



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)

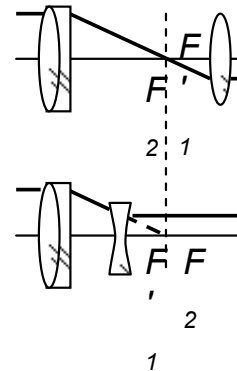
II “сучасний” етап розвитку оптики

Фотоніка займається процесами генерації, пропускання, детектування, контролю випромінювання

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 параксiальних променів
 - 1.2.2. Кардинальні елементи оптичної системи
 - 1.2.3. Властивості ідеальної оптичної системи
 - 1.2.4. Оптичні інструменти



2. Фотометрія

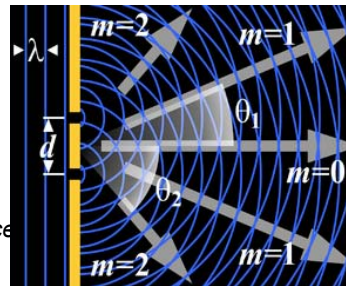
- 2.1. Основні поняття і закони

Частина II. Фізична оптика

1. Дисперсія

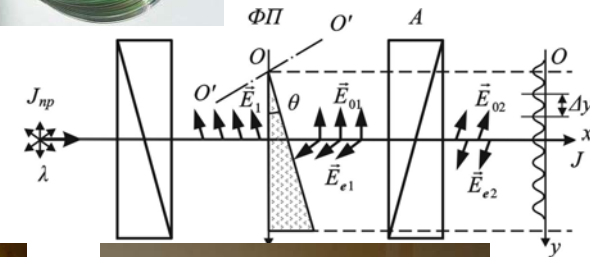
2. Інтерференція світла

- 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. Багатопроменева інтерференція
 - 2.1.5. Вплив на інтерференцію немонохроматичності світла та когерентності
 - 2.1.6. Просторова когерентність



3. Дифракція

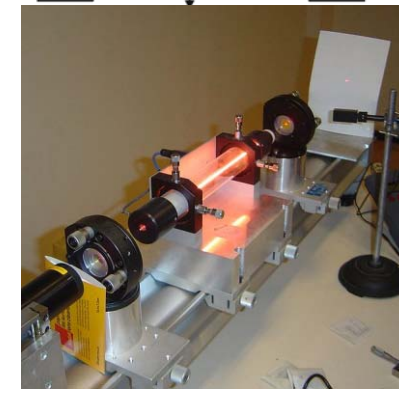
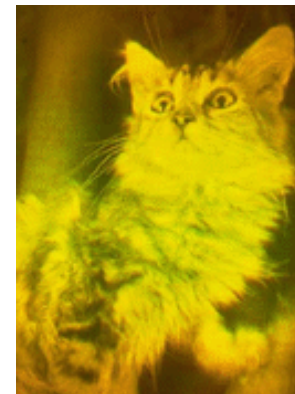
- 3.1. Загальні відомості
 - 3.1.1. Дифракція Френеля
 - 3.1.2. Дифракція Фраунгофера
 - 3.1.3. Спектральні характеристики дифракційної ґратки
 - 3.1.4. Дифракція рентгенівських променів на кристалічній ґратці



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 двопроменезаломненні
 - 4.1.3. Поляризація при штучному двопроменезаломненні

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

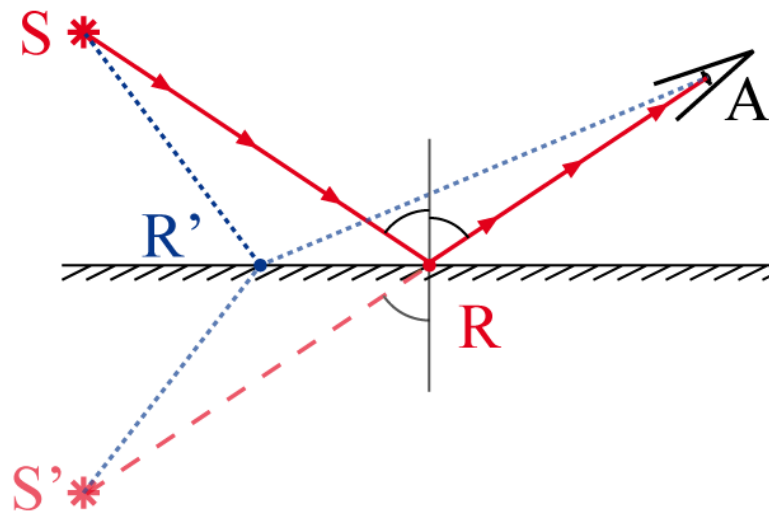


Основні закони геометричної оптики.

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.

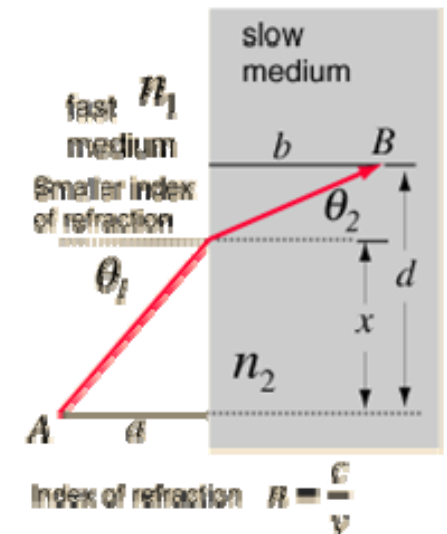


$$t = \frac{\sqrt{a^2 + x^2}}{v} + \frac{\sqrt{b^2 + (d-x)^2}}{v'}$$

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

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

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 ізотропному середовищі світло розповсюджується вздовж прямої лінії.

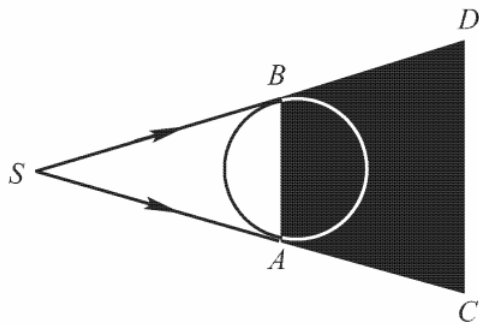


Рис. 1

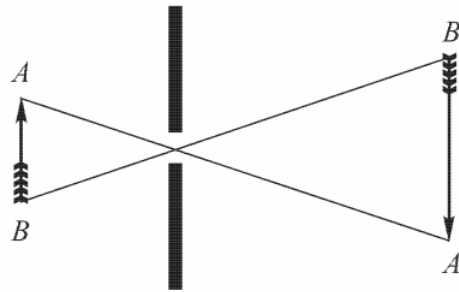
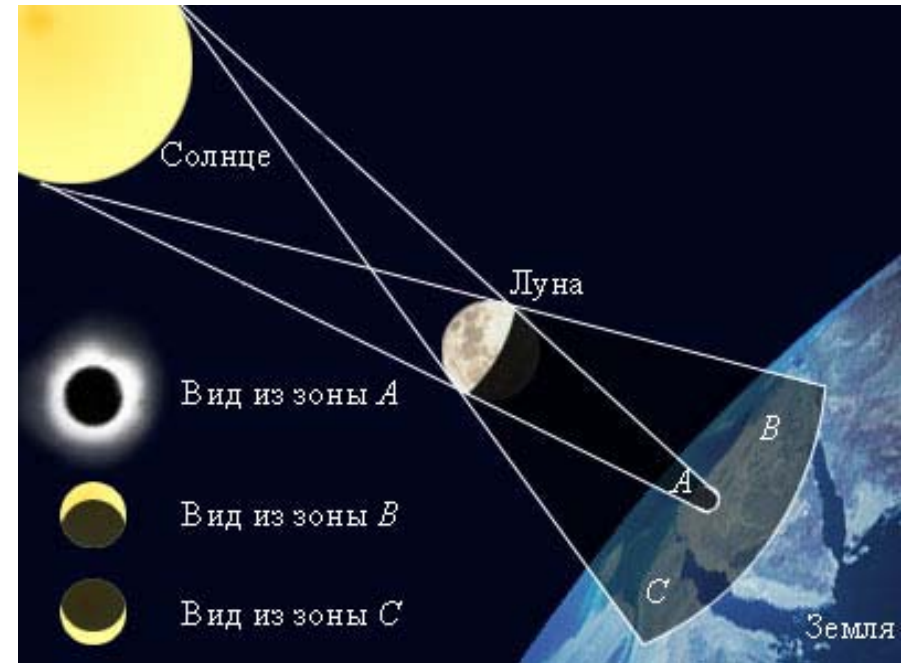


Рис. 2



Основні закони геометричної оптики.

Принцип Ферма

- Закон незалежного розповсюдження світлових променів

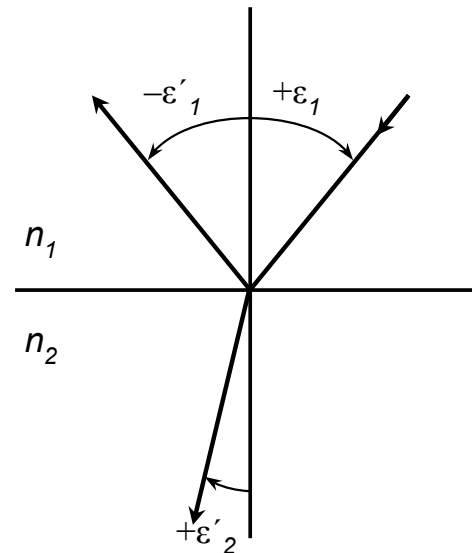
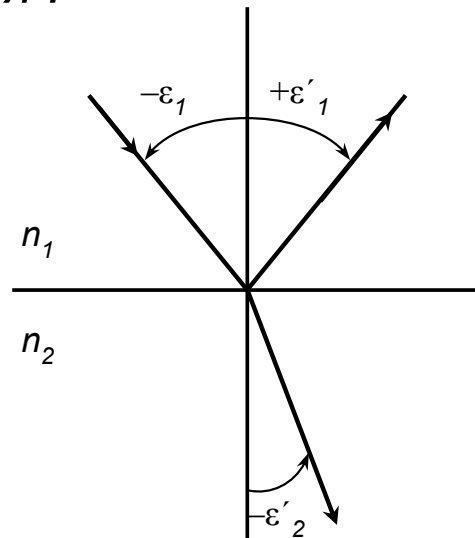
Світлові промені розповсюджуються незалежно один від одного, так наче інших променів не існує.

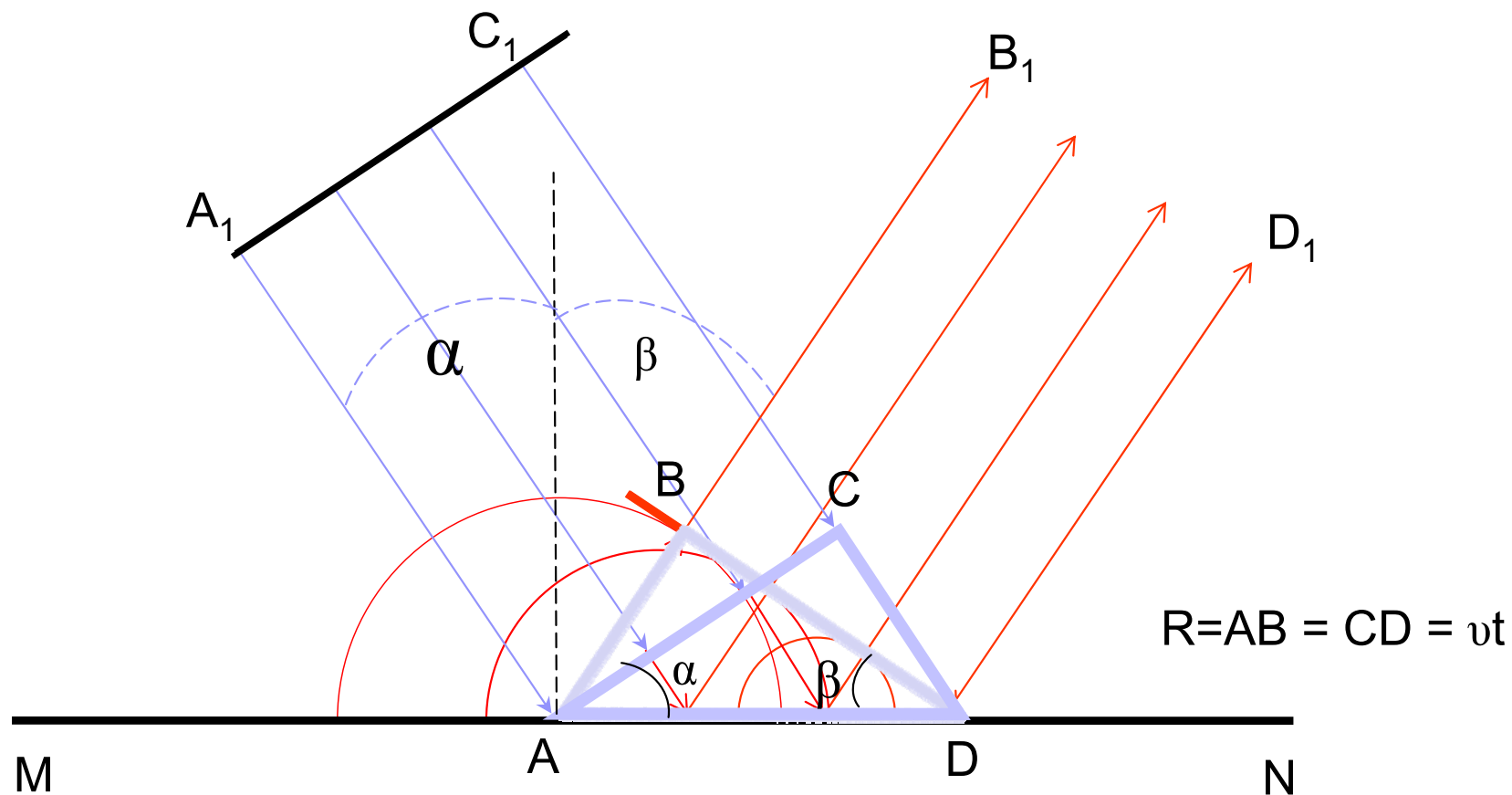


Основні закони геометричної оптики. Принцип Ферма

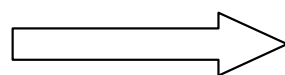
■ Закон відбиття

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 .





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



$$\alpha = \beta$$

Основні закони геометричної оптики. Принцип Ферма

■ Закон заломлення

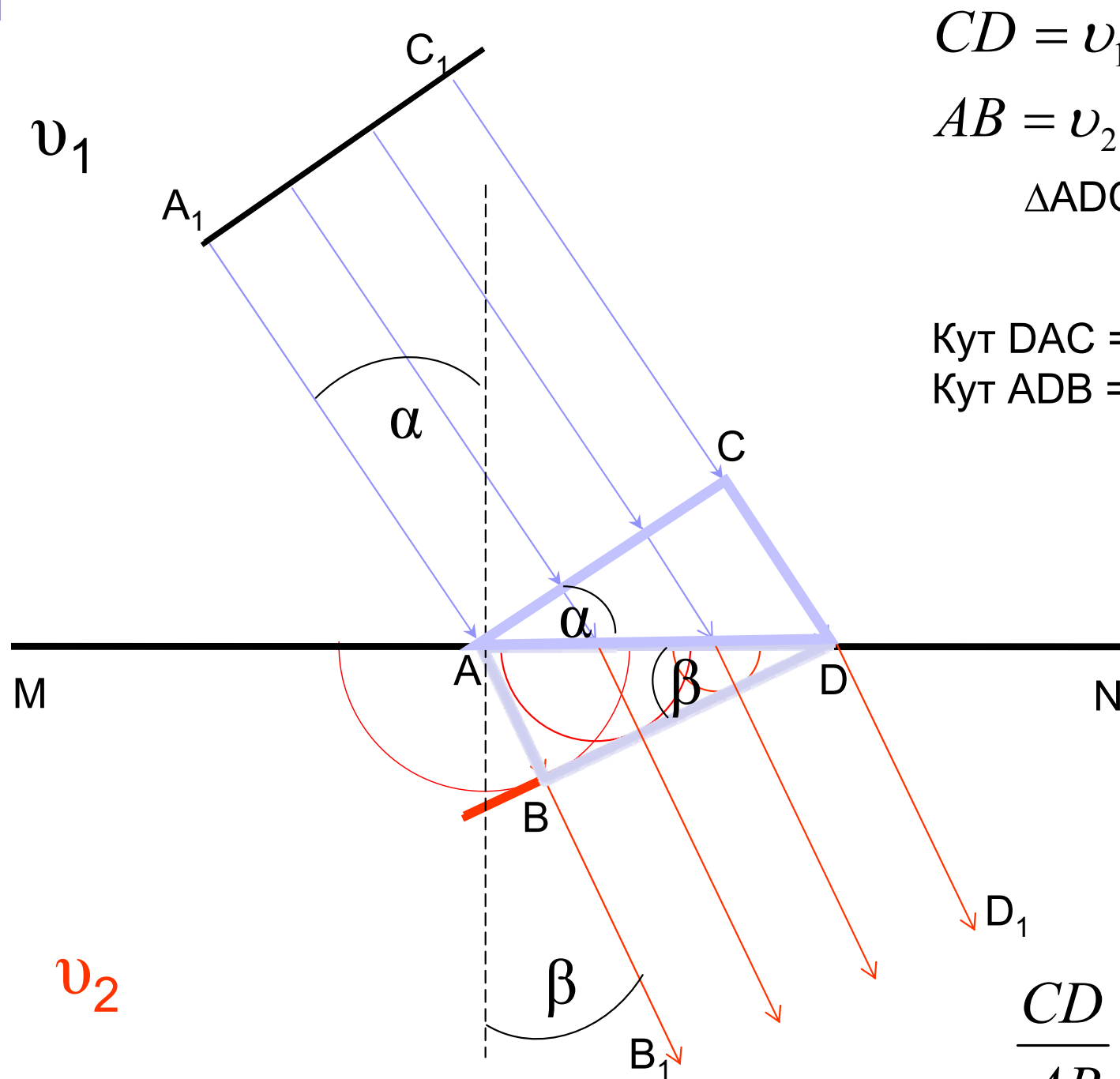
Промінь, що падає на поверхню розділу двох середовищ з показниками заломлення n і n' , нормаль до поверхні в точці падіння та заломлений промінь знаходяться в одній площині, кути падіння і заломлення зв'язані співвідношенням (закон Снелліуса):

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

Абсолютний показник заломлення

є основною оптичною характеристикою середовища (матеріалу):

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



$$CD = v_1 \cdot t$$

$$AB = v_2 \cdot t$$

$\triangle ADC$ i $\triangle ADB$

$$K_{yT} DAC = \alpha$$

$$K_{yT} ADB = \beta$$

$$AD = \frac{CD}{\sin \alpha}$$

$$AD = \frac{AB}{\sin \beta}$$

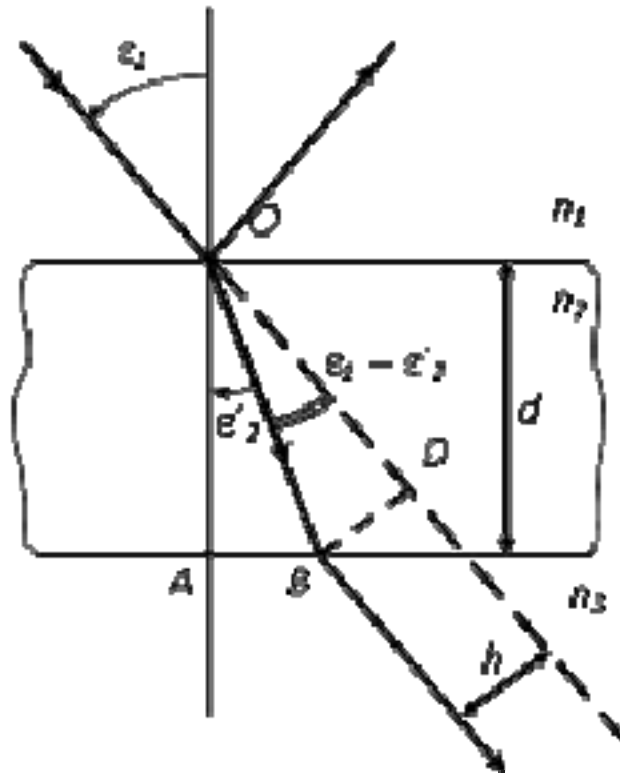
$$\frac{CD}{AB} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = n$$

Речовина	n	Речовина	n
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

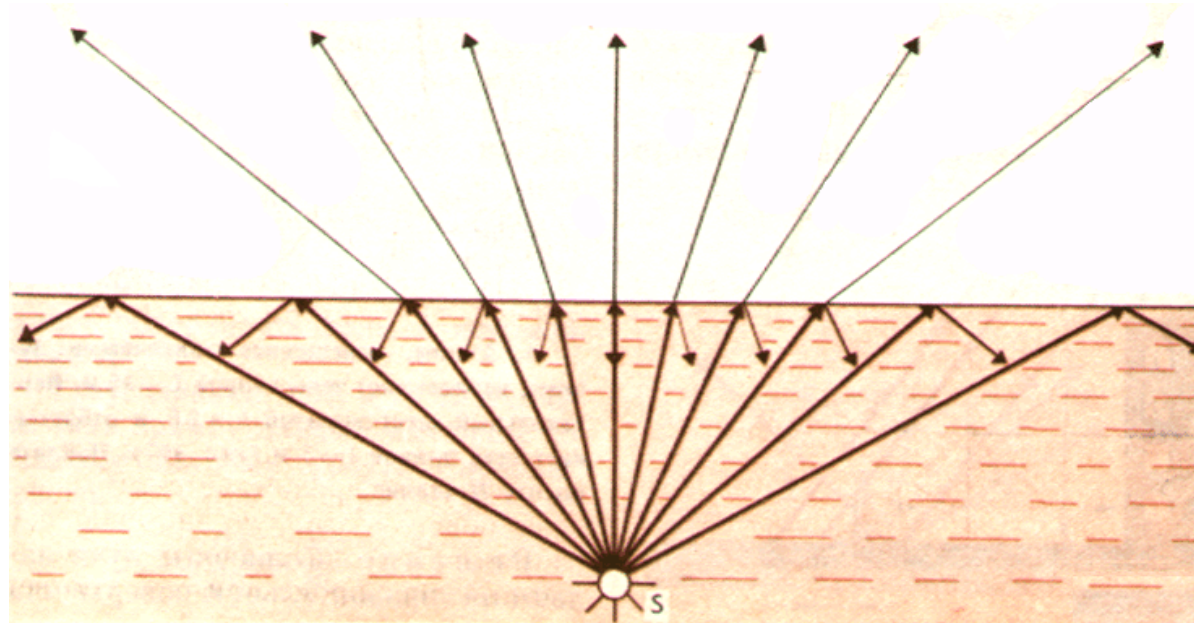
Задача

Промінь світла падає під кутом 30° на плоскопаралельну скляну пластину ($n = 1,5$) товщиною 10 см. Визначити зсув h променя, що пройшов крізь пластину.



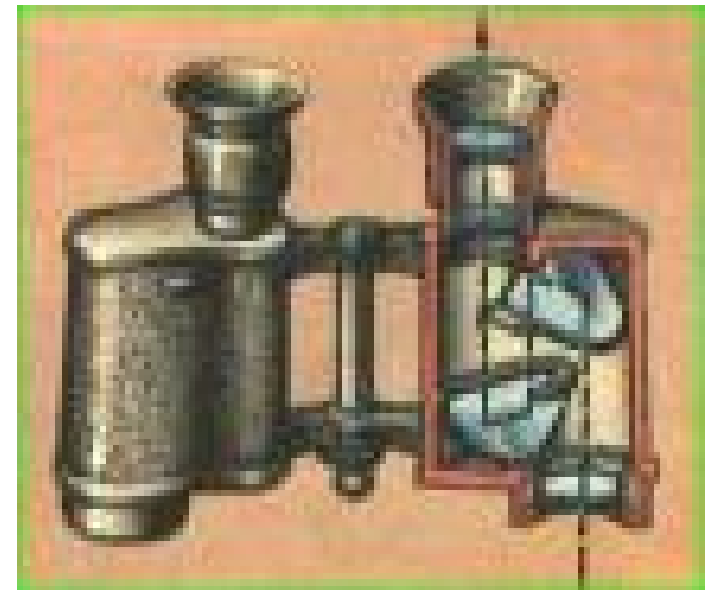
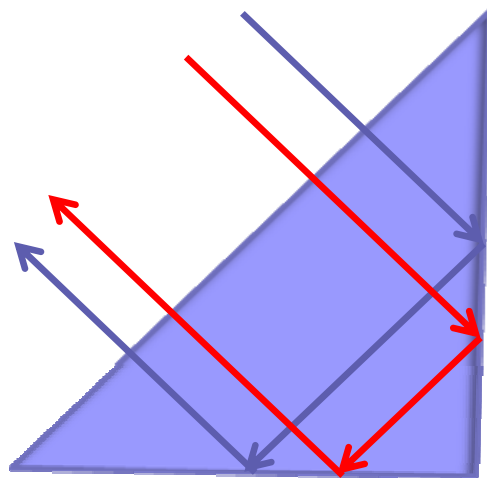
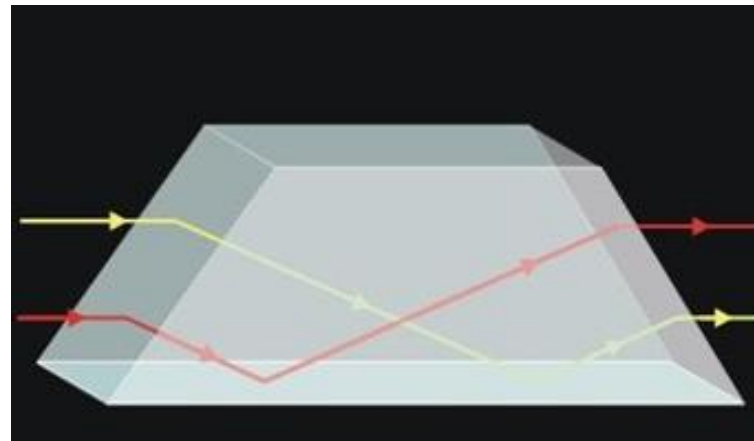
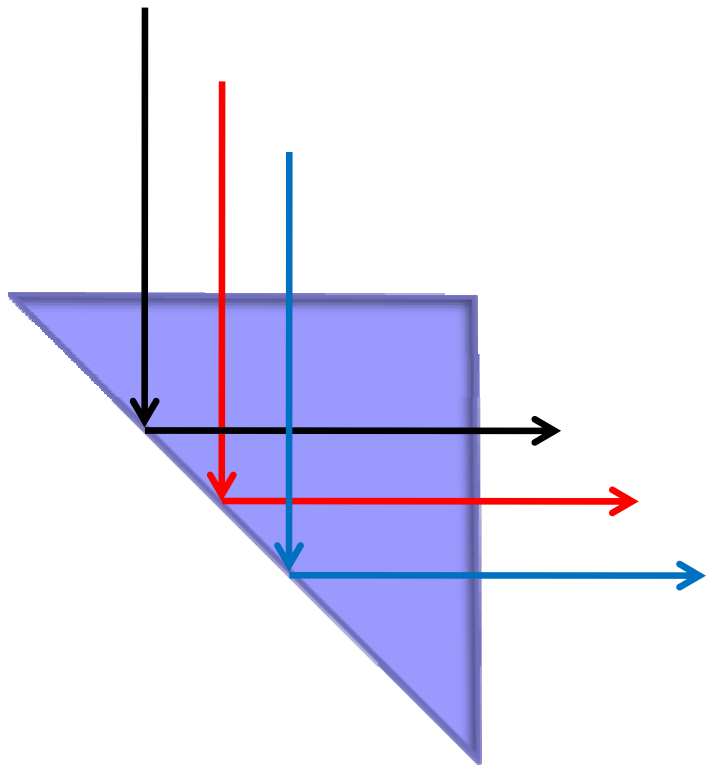
Основні закони геометричної оптики. Принцип Ферма

- повне внутрішнє відбиття

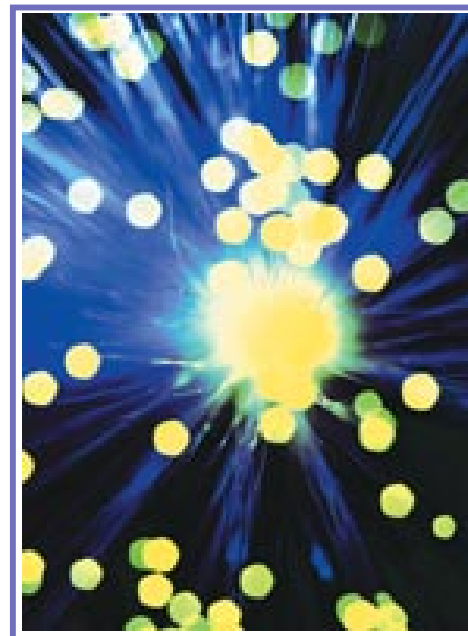
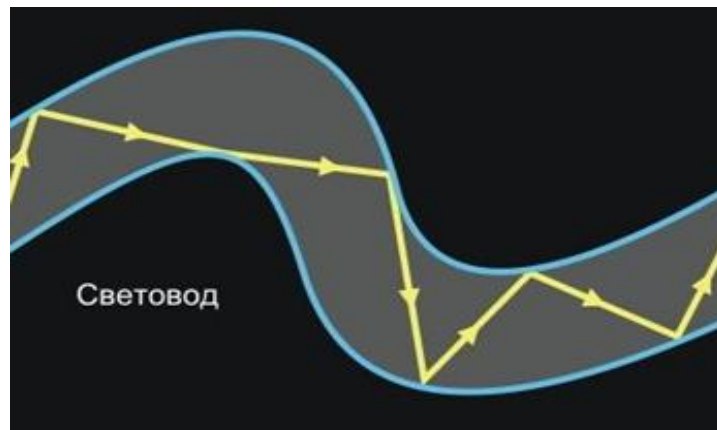


$$\varepsilon_{np} = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

Повне внутрішнє відбиття

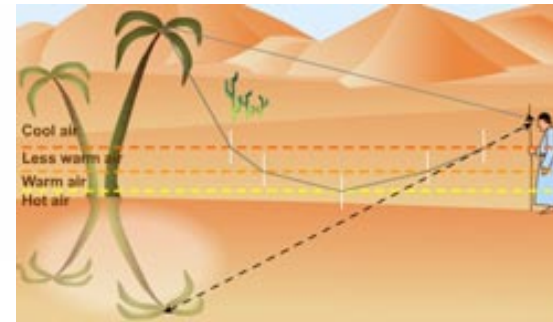
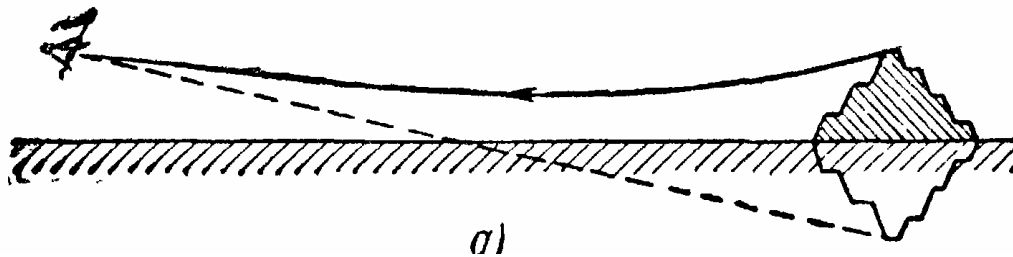


Повне внутрішнє відбиття

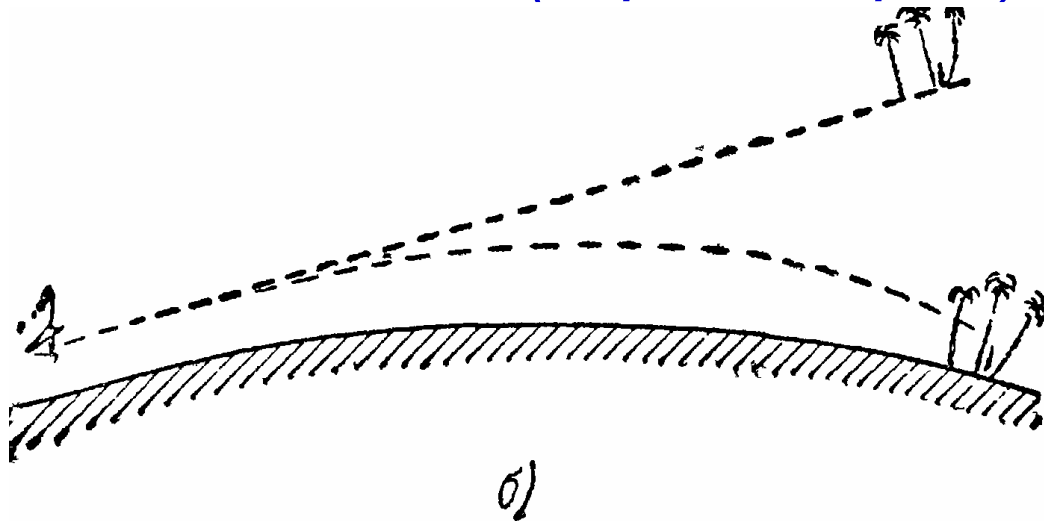


Пояснення марева

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

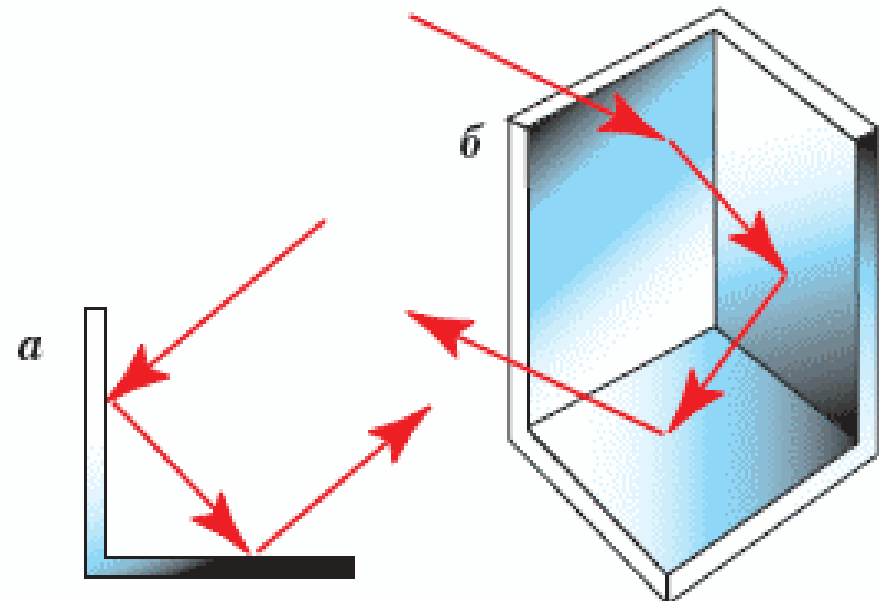
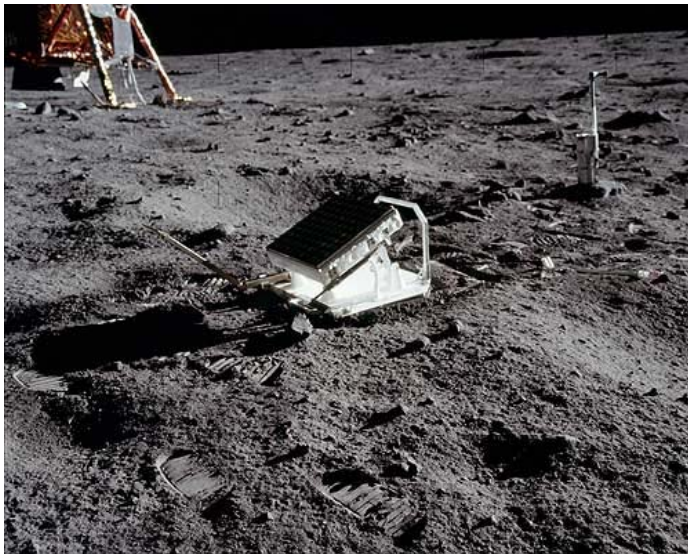


- зменшення густини повітря (показника заломлення) з висотою (*верхній міраж*)

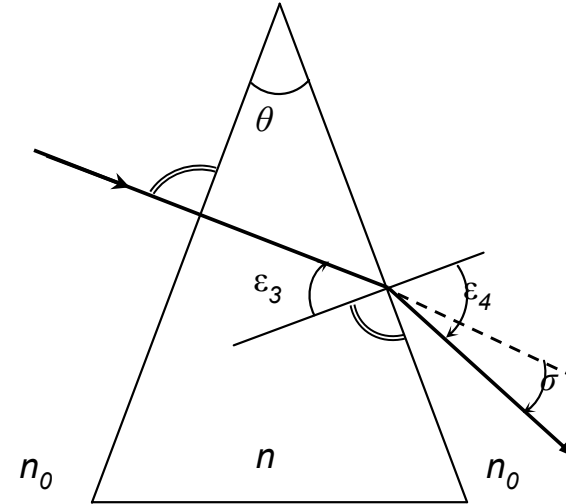
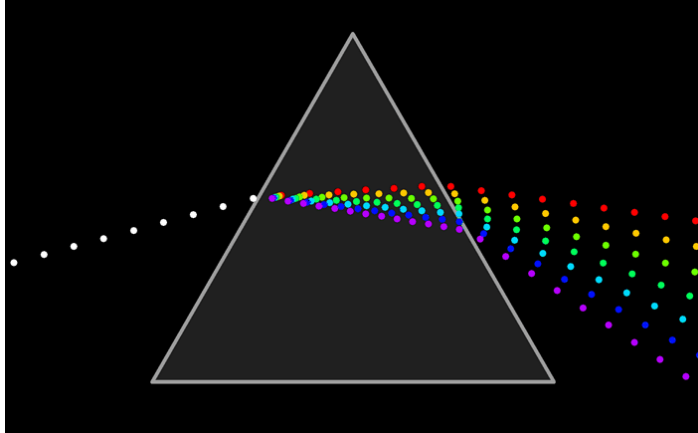


Кутиковий відбивач

- Встановлений на Місяці Аполоном-11



Призма як оптична деталь



кут відхилення
променя
призмою

$$\sigma = \arcsin\left(\frac{n}{n_0} \sin(\theta + \varepsilon_2)\right) - \arcsin\left(\frac{n}{n_0} \sin \varepsilon_2\right) - \theta,$$

мінімальний кут відхилення
променя призмою

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

Основні співвідношення параксіальної оптики

Інваріант Аббе

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

*Оптична сила однієї
заломлюючої поверхні*

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

*Інваріант Лагранжа-
Гельмгольца*

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

*Формула сферичного
дзеркала*

$$\frac{1}{S'} + \frac{1}{S} = \frac{2}{R}$$

Тонка лінза

**Формула
тонкої лінзи**

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

Задача

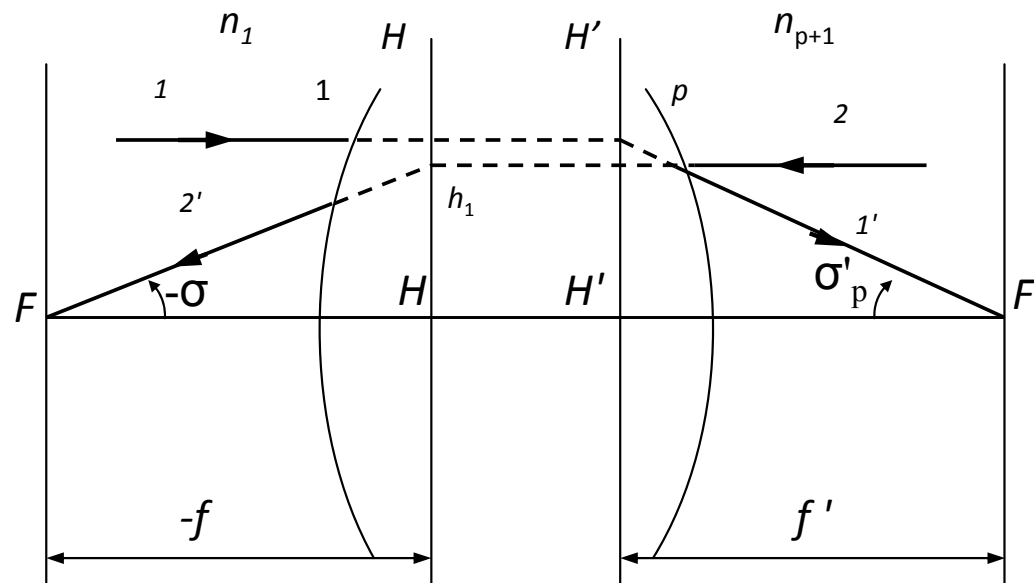
Знайти показник заломлення сірчаної кислоти, якщо у скляної лінзи фокусна відстань в сірчаній кислоті збільшилась в 20 разів у порівнянні з її фокусною відстанню в повітрі.

Тонка лінза

Задача

Знайти оптичну силу і фокусну відстань тонкої лінзи у рідині з показником заломлення 1,7 , якщо її оптична сила в повітрі становила -5 дптр.

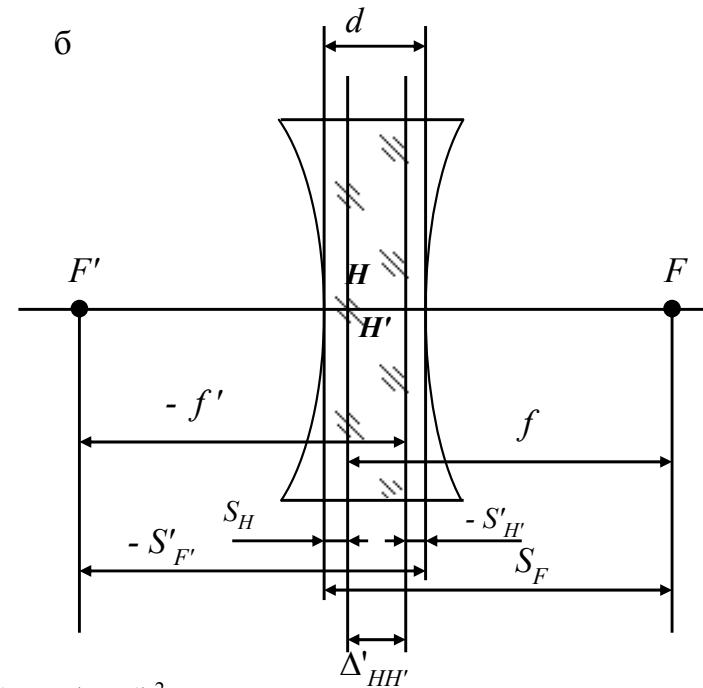
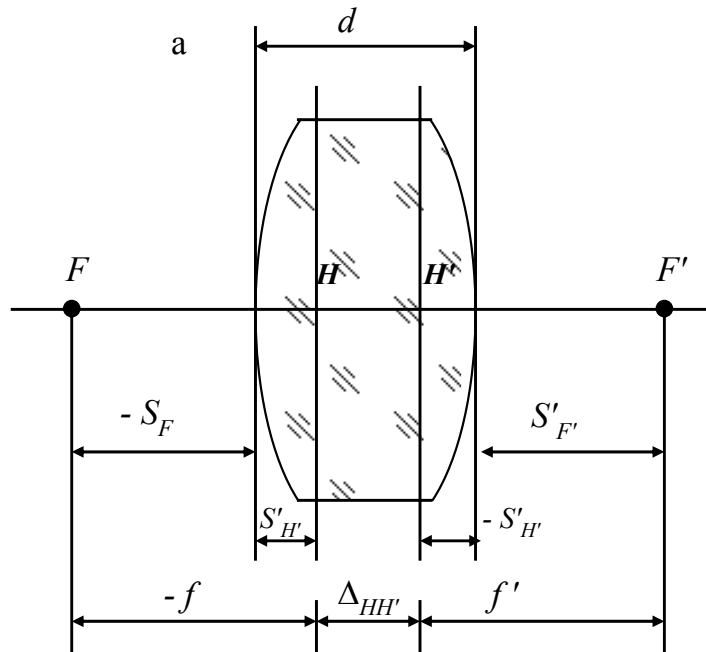
Кардинальні елементи оптичної системи



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

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

Товста лінза



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

$$f = -f';$$

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

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

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

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

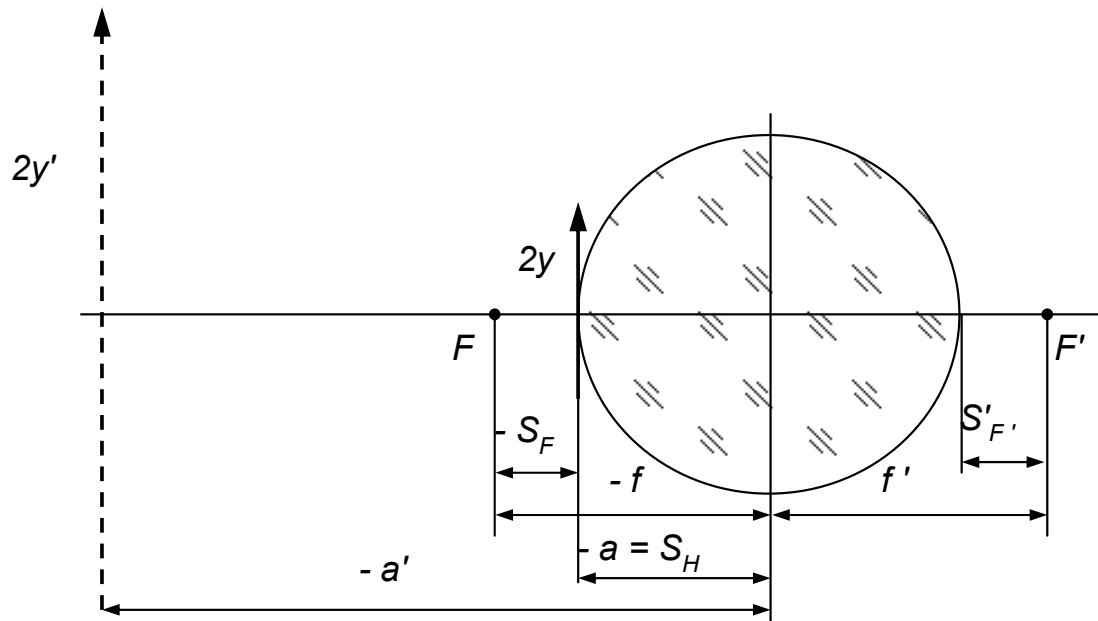
$$\Delta_{HH'} = \left(1 - \frac{f'}{n}(n-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)\right)d.$$

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

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

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

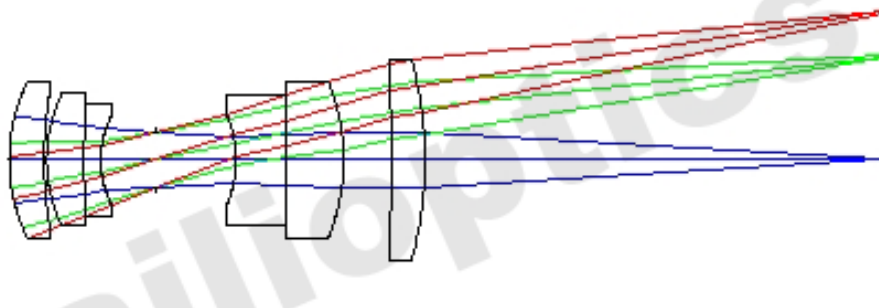
7. Зв'язок між збільшеннями

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

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

Корекція аберрацій

Об'єктив iPhone 6



8Мп камера iPhone 6

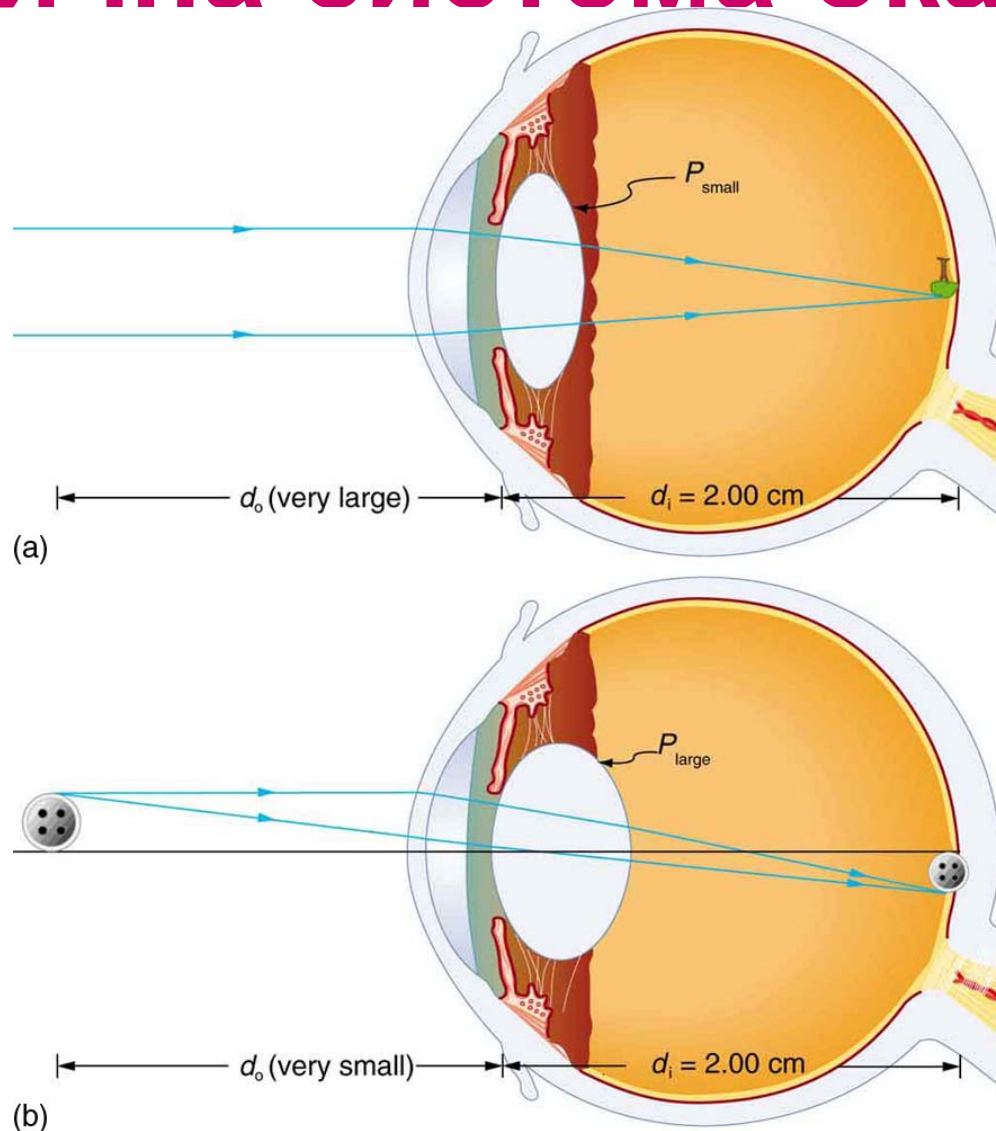
LAYOUT

11.5X
FRI MAR 7 2003
TOTAL LENGTH: 103.07000 MM

C:\ZEMAX\SAMPLES\11.5.ZMX
C:\ZEMAX\SAMPLES\11.5.ZMX

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

1. Лупа

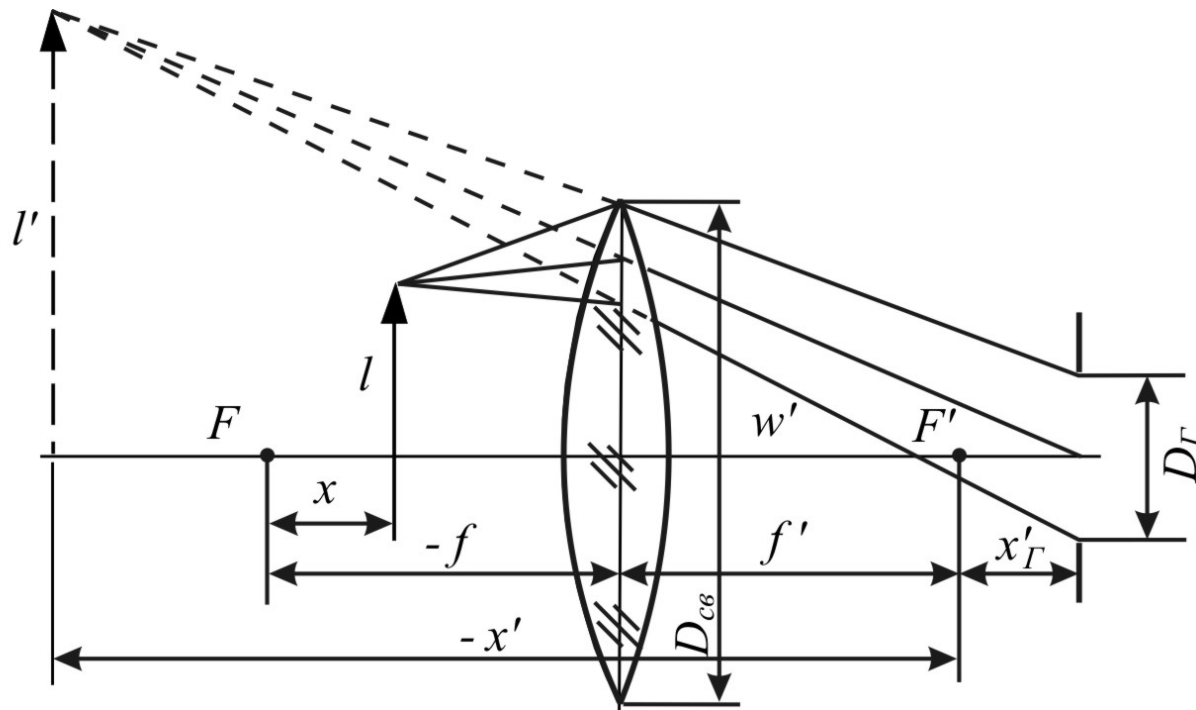
❖видиме збільшення
при акомодції ока
на нескінченність

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

де $L = 250$ мм — відстань
найкращого зору

❖видиме збільшення при акомодції ока
на відстань найкращого зору

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



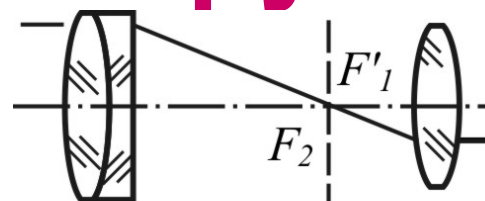
Задача

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?

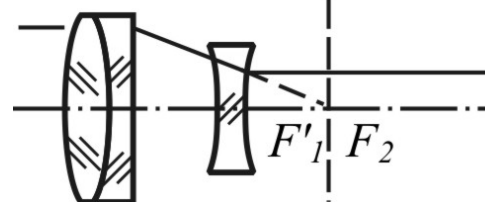
Оптичні інструменти

2. Телескоп

❖ Зорові труби



Кеплера



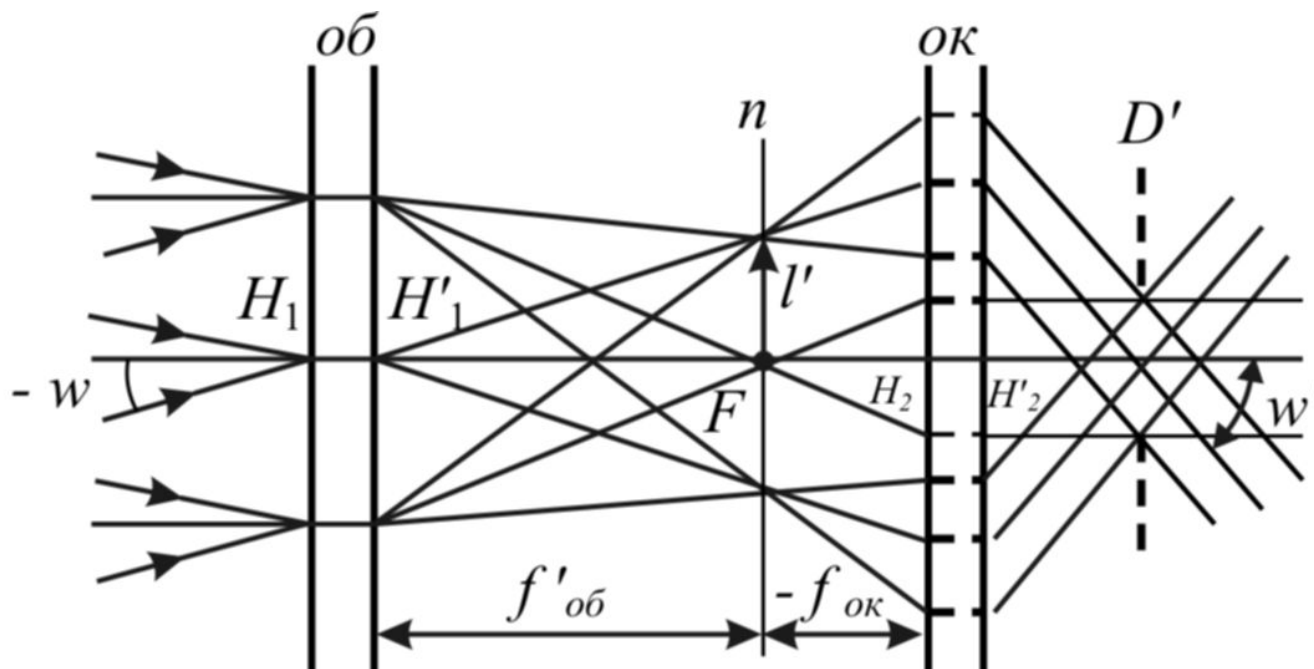
Галілея

❖ видиме збільшення

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

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?



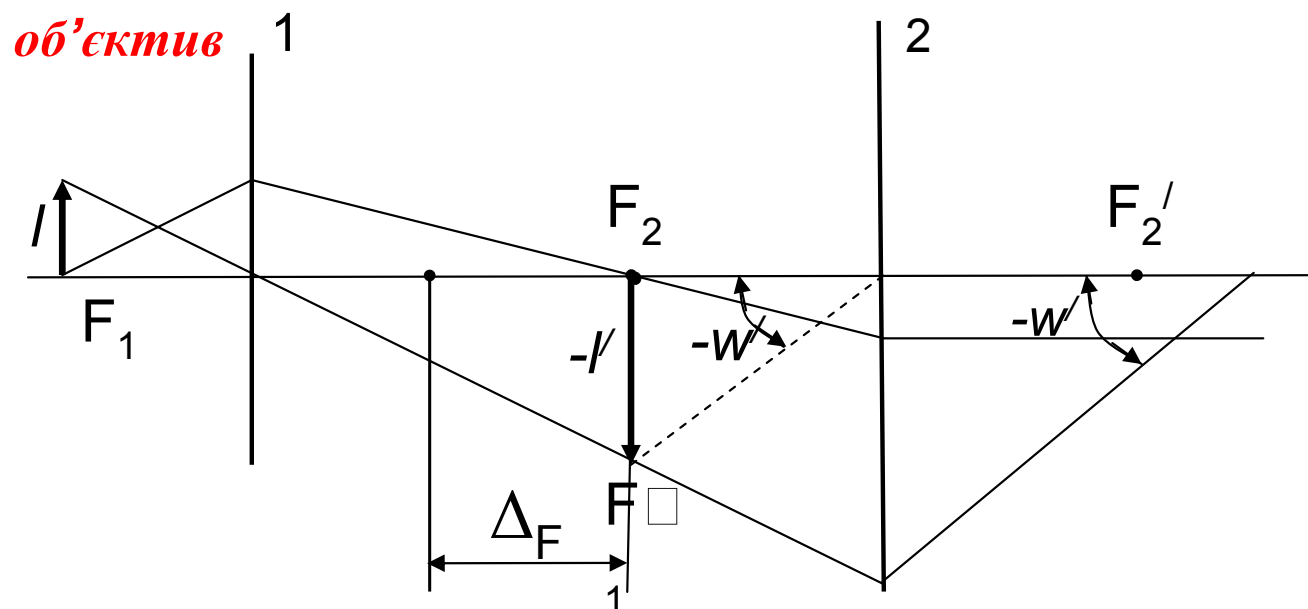
$$L = f_{об'} + f_{ок'}$$

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

окуляри мікроскопів мають:

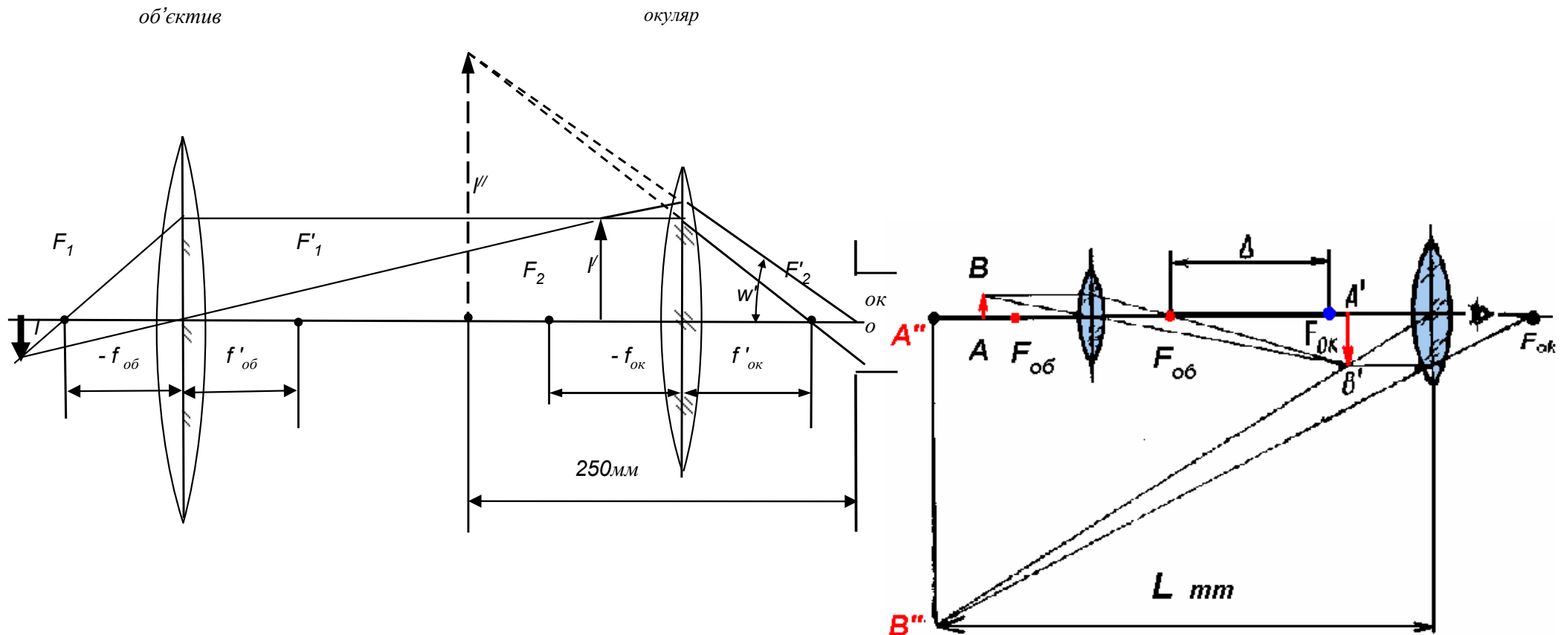
збільшення від 5х до 20х ,
що відповідає фокусним відстаням
від 50 мм до 12,5 мм

Оптичні інструменти

2. Мікроскоп

❖ **видиме
збільшення**

$$\Gamma = \beta \cdot \Gamma_{ок} = \frac{-\Delta_F}{f'_1} \left(\frac{250}{f'_2} + 1 \right)$$



Оптичні інструменти

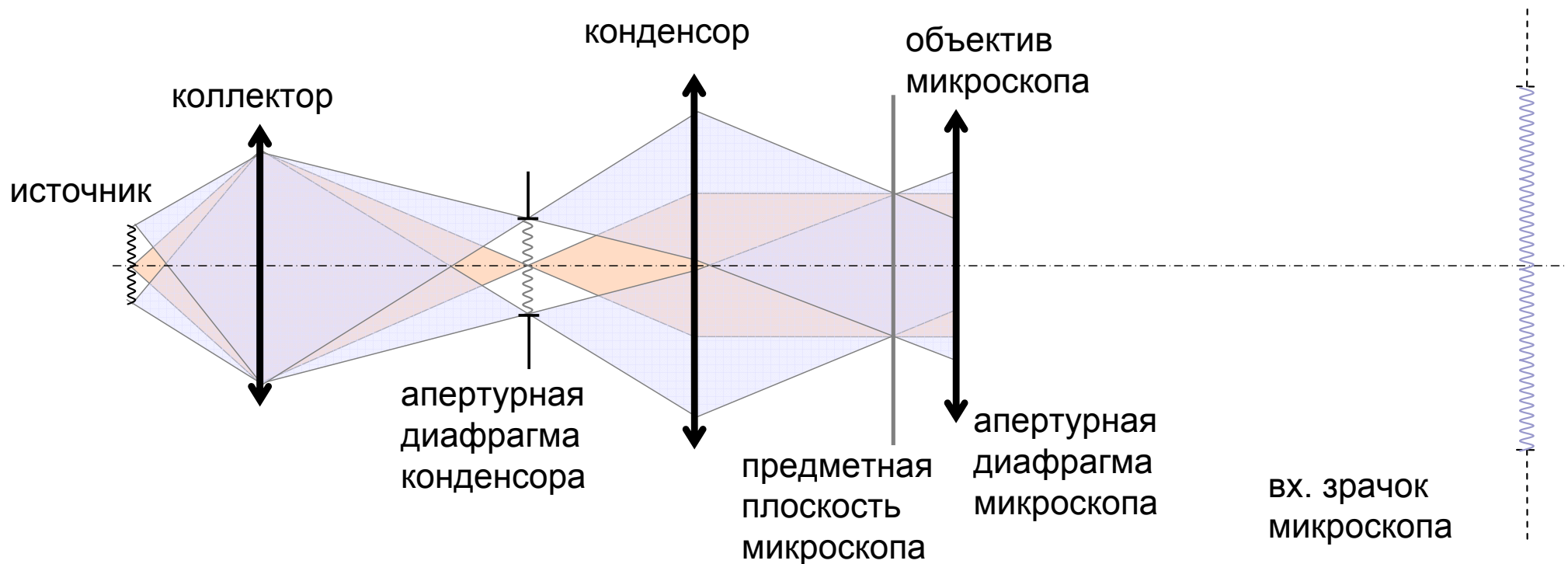
2. Мікроскоп

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 $\Gamma = 500$?



Оптичні інструменти



Фотометрія

Енергетичні характеристики		Світлові характеристики	
Променистий потік (потік випромінювання) – потужність випромінювання	$\Phi_e = \int_0^\infty \Phi_{e\lambda} d\lambda, \text{ Вт},$ $\Phi_{e\lambda} = d\Phi_e / d\lambda - \text{спектральна густина потоку випромінювання, Вт/нм}$	Світловий потік – потужність випромінювання у видимому діапазоні, яка оцінюється за зоровим сприйняттям	$\Phi_v = \int_0^\infty K_\lambda \Phi_{e\lambda} d\lambda = 683 \int_{0,38}^{0,78} V_\lambda \Phi_{e\lambda} d\lambda, \text{ лм (люмен)},$ 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	$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}, \text{ кд (кандела); 1 кд} = 1 \text{ лм/ср}$ 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	$M_v = \frac{d\Phi_v}{dA}, \text{ лм/м}^2$
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	$B_{ea} = \frac{dI_{ea}}{dS_1 \cdot \cos \alpha}, \text{ Вт/м}^2 \text{ср},$ 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	$B_{va} = \frac{d^2\Phi_v}{d\Omega dS_1 \cdot \cos \alpha} = \frac{dI_{va}}{dS_1 \cdot \cos \alpha}, \text{ кд/м}^2,$ стильб: 1 сб = 10 ⁴ кд/м ² 1 ламберт = 10 ⁴ /π кд/м ² 1 нт = 1 св/ м ² (ніт)

Фотометрія

Закон Ламберта

$$dI_{e\alpha} = B_e \cdot dA_1 \cos \alpha = dI_{e0} \cos \alpha$$

Закон обернених квадратів

$$E = \frac{d\Phi}{dA_1} = \frac{I}{R^2} \cos \alpha$$

Задача

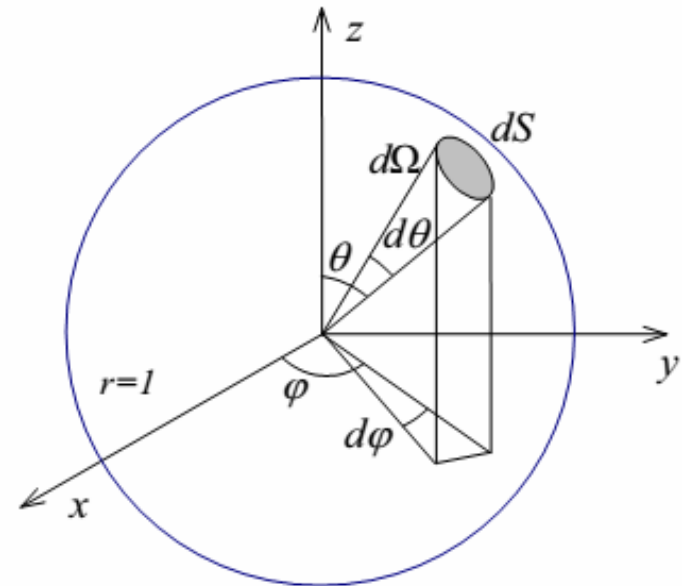
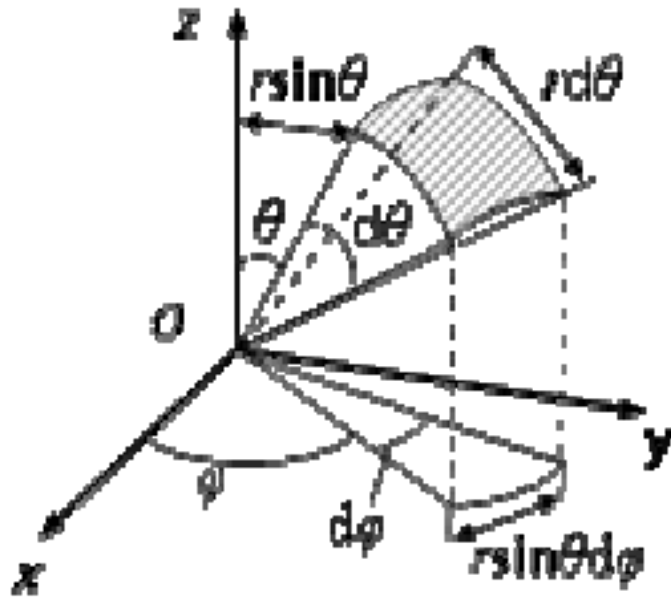
Люмінесцентна циліндрична лампа діаметром $d = 2,5$ см і довжиною $l = 40$ см створює на відстані $r = 5$ м у напрямку, перпендикулярному осі лампи, освітленість $E_v = 2$ лк. Приймаючи лампу за косинусний випромінювач, визначити:

- 1) силу світла I у даному напрямку;
- 2) яскравість B ; 3) світність M лампи.

Фотометрія

Задача

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



Фотометрія

Задача

Світильник з матового скла має форму кулі діаметром $d=20$ см. Сила світла I кулі дорівнює 80 кд. Визначити повний світловий потік Φ , світність M та яскравість L світильника.