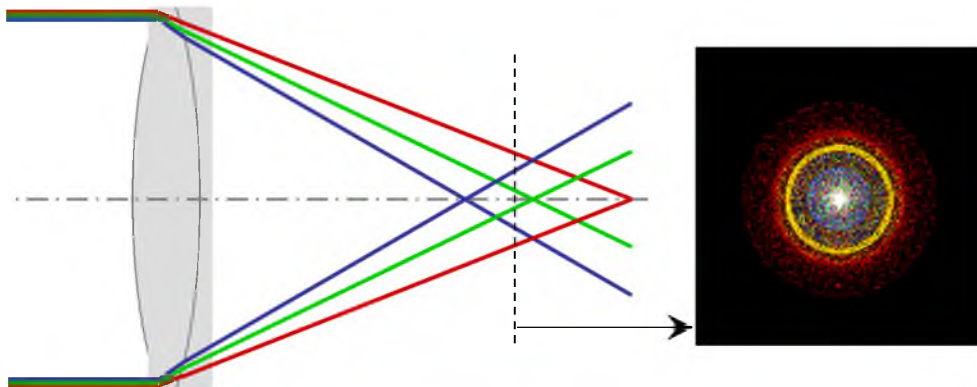
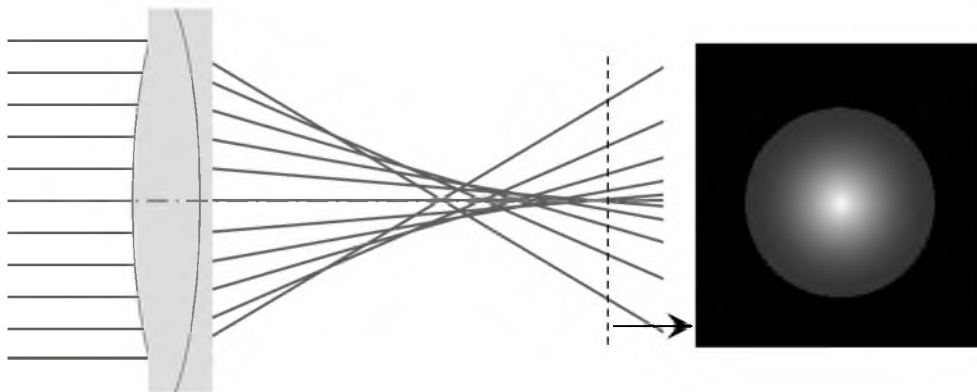


А.К.Дорош, Р.М.Мельник

ГЕОМЕТРИЧНА ОПТИКА. АБЕРАЦІЇ

- типи аберацій світла у лінзі
- знаходження показників хроматичної і сферичної аберацій
- дослідження геометричних типів аберацій



1.2 Аберації у тонкій лінзі

1.2.1 Типи абераций

Оптичну систему вважають ідеальною, якщо для неї виконується формула тонкої лінзи. Формула виконується з певним наближенням через ряд факторів:

- замінено тангенс малих кутів розкладом в ряд Тейлора $\tan i = i + i^3/3 + 2i^5/15 + \dots$ з точністю до членів першого порядку $\tan i = i$;
- знехтувана товщина лінзи;
- не враховано дисперсію світла $n(\lambda)$ — розходження значення показника заломлення матеріалу лінзи для різних довжин хвиль;
- знехтувано хвильовими властивостями світла, дифракцією на краях лінзи;
- суттєвим фактором якості зображень є висока якість матеріалу лінз, їх однорідність, відсутність мікропустот, а також якість сферичних поверхонь лінзи.

Відхилення ходу променів у реальних оптичних системах від ідеальних називають *абераціями* (лат. aberratio — відхилення). Аберації проявляються у спотворенні зображень отриманих за допомогою лінз, у нечіткості, викривленні чи відсутності зображення. Для подолання абераций використовують замість лінзи *об'єктив* (від лат. objectus — предмет) — система з набору лінз. В основному це склейка тонких лінз, або складніший набір лінз з рухомим регулюванням окремих елементів.

Один об'єктив не дає змоги подолати всі типи абераций. Зменшують типи абераций, які є прикрими для конкретного практичного застосування об'єктиву. Тим самим вдається істотно підвищити якість створення зображення, задовольнити специфічні, інколи прицеві, вимоги до якості зображень, роздільної здатності в оптичних системах. Знання основних чинників абераций і типів об'єктивів дає можливість користувачеві здійснювати

грамотний вибір оптичних засобів.

Розрізняють наступні типи аберацій:

- *Дифракційні аберації* (хвильова оптика) — неусувні, зумовлені хвильовою природою світла. Точка предмету у лінзі має спряжену у площині зображення не точку, а світну пляму. Розмір плями тим менший, ближчий до точки, чим більший розмір лінзи. Для побутових оптичних систем може не мати значення дифракційна світна пляма мікроскопічного розміру. Дифракційний чинник є основним в обмеженні роздільної здатності приладів великого збільшення (мікроскопів, потужних телескопічних систем), обмежує кратність збільшення, зменшує чітке поле зору видимої частини предмета.
- *Геометричні монохромні аберації* зумовлені наближенням кута параксіальних променів ($\tan i = i$) у геометричній (променевій) оптиці. Такою є *сферична аберация* — розмитий фокус для променів різної віддаленості від оптичної осі. В більшості випадків застосуванням об'єктивів сферичну аберацию успішно долають. Не можна повністю уникнути разом з сферичною інші геометричні аберації — дисторсію, кривину поля зору, астигматизм, кому.
- *Геометричні хроматичні аберації* зумовлені залежністю показника заломлення матеріалу лінзи від довжини хвилі світла $n_0(\lambda)$, що спричиняє розходження зображень у різних кольорах. Доволі ефективно усунути хроматичні аберації разом із сферичними можна склейкою лінз підібраних по матеріалу і радіусах кривини.

У оптичних приладах чи не найдошкульніше про себе дають знати сферичні і хроматичні аберації. Практично всі об'єктиви розраховані на подавлення хроматичних і сферичних відхилень. Інші геометричні відхилення ходу променів зменшують підбором компонент об'єктиву по мірі потреб використання оптики.

1.2.2 Хроматична аберація збиральної лінзи

Відношення швидкості світла у вакуумі до швидкості в матеріалі є показником його оптичної густини з позначенням n . Оптична густина залежить від частоти хвилі $n(\nu)$, частіше густину виражають через довжину хвилі у вакуумі $n(\lambda)$. Залежність $n(\lambda)$ для оптичних матеріалів різна. Для повітря можна вважати швидкість хвиль видимого діапазону рівною швидкості світла у вакуумі, однаковою для всіх довжин. Значення показника заломлення для повітря з точністю до четвертого розряду мантиси рівне одиниці $n \approx 1,0003 \approx 1$.

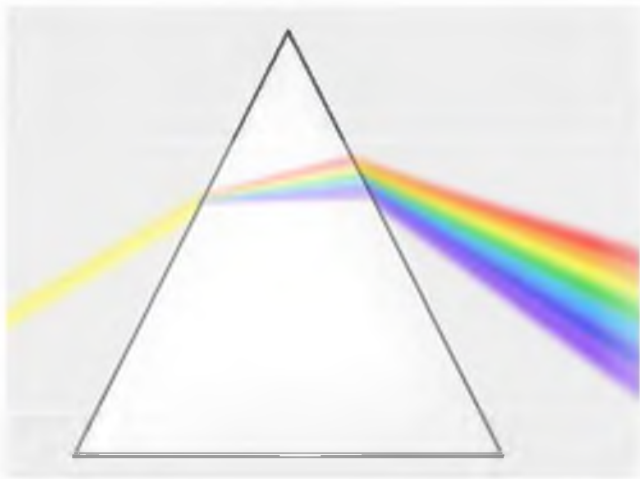


Рис. 1.16. (Вікіпедія) Розклад видимого світла у призмі.

Інакше для скла, дві оптичні хвилі різних довжин при падінні під однаковим кутом на межу оптичних середовищ, наприклад повітря-скло, відхиляться на різний кут $\beta(\lambda)$, зумовлений залежністю $n(\lambda)$. Відмінне відхилення хвиль різних довжин хвиль на межі середовищ назвали *дисперсією* (з лат. дисперсія — розкид). *Монохромне* випромінювання (від

гр. $mónos$ — один; $\chi\rho\omicron\mu\acute{\alpha}$, $chr\acute{o}ma$ — колір, у родовому відмінку $chr\acute{o}matos$) — це потік хвиль однакової частоти коливань. Більшість природних джерел дають світло широкого неперервного спектру випромінювання.

Різниця в кутах відхилення на склі здебільшого невелика, малопомітна оком. В плоскопаралельних скляних пластинах розкладене світло на одній поверхні практично знов збирається у один пучок за другою поверхнею. Більший розкид світла у призмах. Після заломлення на передній грані повітря-скло, світло падає на задню грань скло-повітря з іншим нахилом, дисперсія посилюється на другій грані призми, Рис. 1.16.

Довільну лінзу можна розглядати як систему призм. Під кутом між сферичними поверхнями потрібно розуміти двогранний

кут між дотичними поверхнями у точках заломлення світлового променя поверхнями лінзи. Чим далі від головної оптичної осі, тим більший кут між поверхнями лінзи, істотніше проявляється розходження променів різних довжин хвиль, Рис. 1.17, 1.18. *Хроматична аберация* у лінзі зумовлена немонохромністю світла, відмінністю дисперсій оптичних матеріалів лінзи і середовища. Оптична сила $\Phi \sim (n_0(\lambda) - n(\lambda))$ пропорційна різниці показників заломлень матеріалу лінзи $n_0(\lambda)$ і оточуючого середовища $n(\lambda)$.

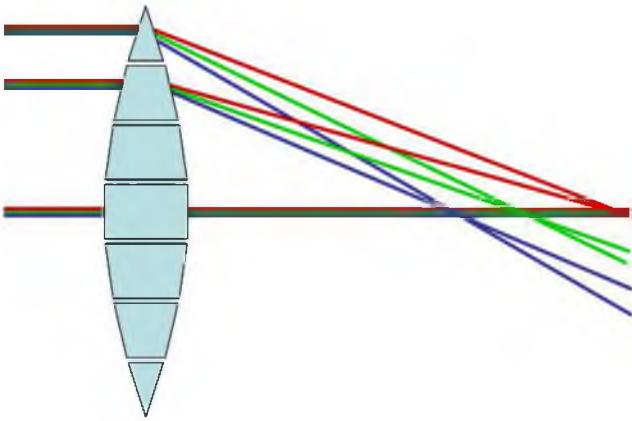


Рис. 1.17. Лінзу можна уявити як систему призм заломлюючих світло, дисперсія немонохромного світла ти більша, чим більший заломлюючий двогранний кут призми.

При хроматичних аберациях виникають проблеми *хроматизму зображення* — у різних кольорах розмір зображення різний, і *хроматизм положення* — фокусна відстань відрізняється для хвиль різної довжини. Якщо навести лінзу на чітке зображення в червоному світлі, то в синьому буде максимальною аберация - максимальний розмір синьої плями замість точки у спряженій площині. І навпаки, чітке фокусування в синьому світлі зумовить максимум розмитості у червоному світлі. Хроматичні аберации приводять до кольорових контурів зображення, знижують контраст зображення.

Для променів, що проходять по центру лінзи параксіальність променів найвища, тому для них найкраще виконується формула тонкої лінзи з характеристичним значенням фокусної відстані f' . Для світлових променів по краю лінзи відбувається фокусування променів, але так, ніби для оптичної системи з іншим значенням фокусної відстані. У формуванні зображення лінзою на різних довжинах хвиль λ застосовна формула тонкої лінзи з фокусною відстанню $f'(\lambda)$ залежною λ .

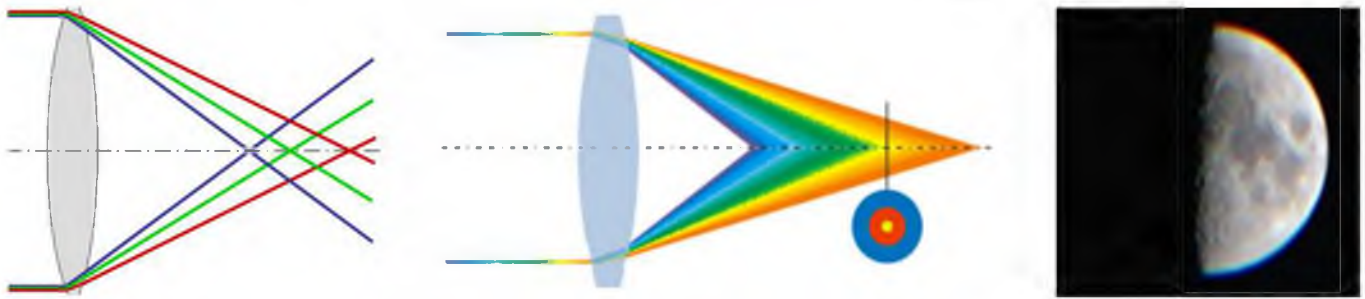


Рис. 1.18. Зліва: промені трьох довжин хвиль, червоного, зеленого і синього кольорів, мають різні фокуси. По центру (рис. з Вікіпедії): пучок світла замість фокусування у точці дає розмите різнобарвне забарвлення кругової плями відмінне для різних перерізів поблизу фокусу (тут не наведене продовження променів світла після проходження точки фокусування). Справа (рис. з Вікіпедії): світлина Місяця не чітка, має забарвлені контури через неприбрані хроматичні аберації використаної оптики.

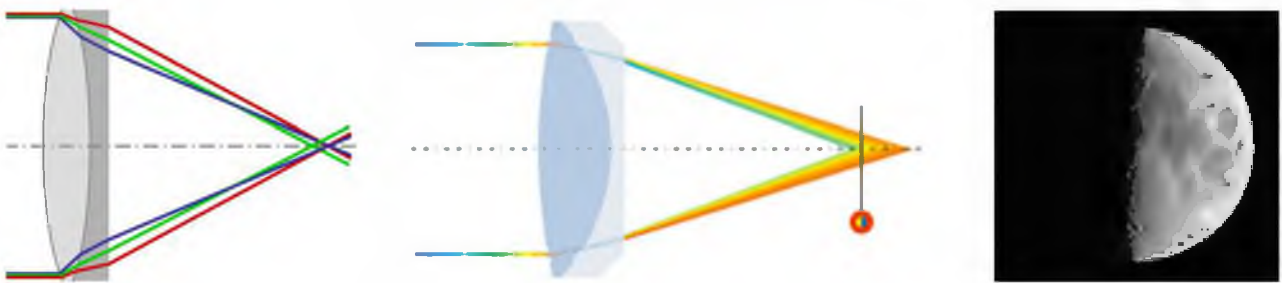


Рис. 1.19. Зменшення хроматичної аберації в ахроматичному дублеті склейки лінз підібраних матеріалів стекол. Зліва: червоний і синій промені мають однакове фокусування, зелений — невелике відхилення. По центру (рис. з Вікіпедії): хроматичні аберації зменшено. Справа (рис. з Вікіпедії): світлина місяця з об'єктивом-ахроматом має належну якість.

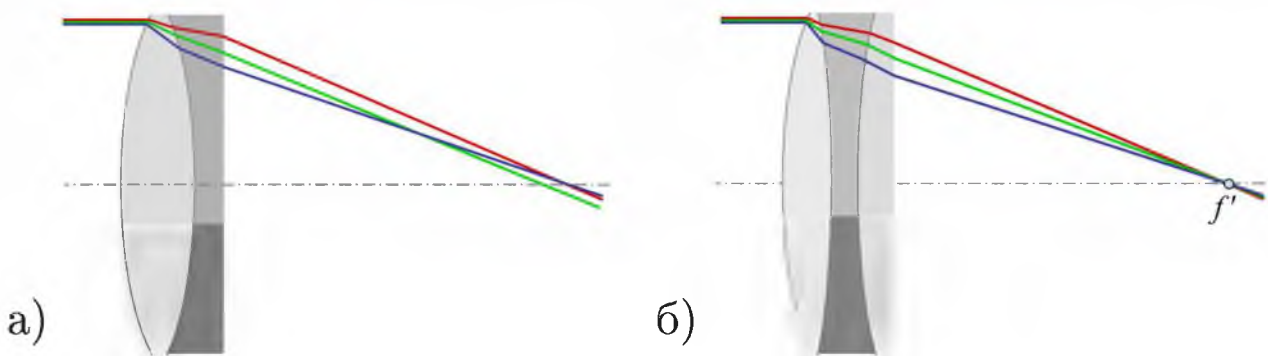


Рис. 1.20. а) Ахромат - виправлення фокусування для двох довжин хвиль. б) Апохромат - виправлення фокусування для трьох довжин хвиль.

Величина хроматичної аберації характеризується різницею фокусів для "червоного" ($\lambda_{red} \approx 650 \text{ нм}$) і "синього" ($\lambda_{blue} \approx 450 \text{ нм}$) світла $\delta f' = f'_{red} - f'_{blue}$.

Людське око розрізняє спектр видимого світла наближено від 400 нм до 700 нм, слабше сприймає фіолетовий і крайній червоний кольори. Межі сприйняття індивідуальні, можуть різнитися. На практиці у оптичних приладах візуального використання достатньо зменшити аберації у діапазоні 450-650 нм, або й меншому діапазоні.

Хроматичні аберації практично не піддаються комп'ютерному виправленню на світлинах цифрового формату. Дещо зменшується хроматизм застосуванням діафрагм. Виправляються хроматичні аберації використанням складних оптичних систем — склейкою підібраних лінз і матеріалів їх виготовлення.

Найпростіший *ахромат* (від грец. *ἀχρoματός* — безкольоровий) є склейкою двох стекол — крон, "м'яке" скло з низьким показником заломлення, і флінт, "тверде" скло. Матеріали і характеристики лінз підібрані таким чином, щоб краї спектру, червоний і синій кольори, мали спільний фокус. Для інших довжин хвиль хроматичні аберації будуть, але істотно менші ніж для одної лінзи. Застосування пари підібраних лінз мінімізує і хроматичні аберації, і сферичні.

Апохромати складніші і дорожчі, у них сферичні і хроматичні аберації мінімізуються зведенням не менше трьох довжин хвиль, наприклад червоного, зеленого та синього кольорів у видимому діапазоні. Використовуються спеціальні стекла (курцфлінт), деякі кристали (флюорит, галуни). Полуапохромат — спрощені і дешевші варіанти апохроматів.

Суперахромати зводять чотири кольори, застосовуються лінзи з дорогих стекол і кристалів (курцфлінт, лангкрон, флюорит, галун тощо). Суперахромат-об'єктив розроблений Максом Херцбергером (нім. Maximillian J. Herzberger) має практично повністю усунену хроматичну аберацію, одночасно скореговані сферична аберация і кривизна поля зору. Недоліком є дорога флюоритова оптика і точні допуски виготовлення.

1.2.3 Дослідження аберацій збиральної лінзи

Знаходження показника позовжньої хроматичної аберації збиральної лінзи

На протилежних кінцях оптичної лави світильник з предметним склом і екран, між ними лінза, дає збільшене зображення предмету на екрані. Вся система осецентрована.

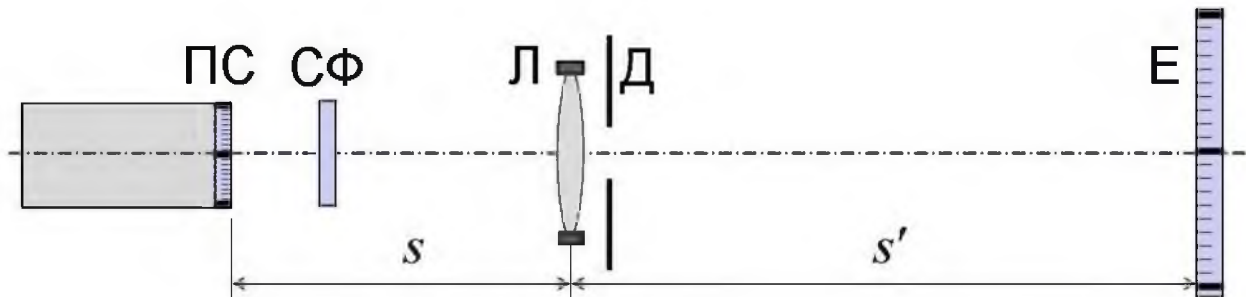


Рис. 1.21. На оптичній лаві знаходяться: світильник з предметним склом ПС, змінний світлофільтр СФ, лінза Л з обмежувачами Д, екран Е.

При потребі, для збільшення контрасту зображення можна виконати наступне: збільшити потік світла ручкою на блоці живлення світильника; затінити кімнату драпіруванням вікон; виключити загальне освітлення лабораторної кімнати; наблизити екран, але не ближче $4f'$ до світильника, f' — фокусна відстань лінзи, зображення буде меншим, але контраст збільшиться за рахунок збільшення інтенсивності світла (кількості світлового потоку на одиницю площі).

1. Лінзу виставляють в положення максимального контрасту зображення. Фіксують лінзу бічними гвинтами рейтера і більше її не переміщують. Нотують відстань від предмета до лінзи s , відстань від лінзи до екрана s' , координату положення екрана x по шкалі лави за міткою рейтера з екраном. Обчислюють фокусну відстань лінзи f' за формулою тонкої лінзи.
2. Встановлюють на світильник червоний світлофільтр, довжину хвилі λ_{red} спектрального максимуму пропускання

вказано на оправі ($\lambda_{red} \approx 650$ нм). Екран переміщують до максимального контрасту зображення в "червоному" світлі. Відмічають положення екрана x_{red} . Відстань $s'_{red} = s' + x_{red} - x$. Знаходять f'_{red} за формулою тонкої лінзи (відстань s не змінилася).

3. Знімають червоний, встановлюють на світильник синій світлофільтр ($\lambda_{blue} \approx 450$ нм). Повторюють попередній пункт, знаходять x_{blue} , $s'_{blue} = s' + x_{blue} - x$, f'_{blue} .
4. За отриманими даними знаходять показник позовжної хроматичної аберації $\delta f'_{chr} = |f'_{red} - f'_{blue}|$, і відносне спектральне значення аберації $\delta f'_{chr} / |\lambda_{red} - \lambda_{blue}|$.

Знаходження показника позовжної сферичної аберації збиральної лінзи

Паралельний пучок променів після заломлення лінзою має вигляд у просторі зображень каустичної поверхні не конуса, Рис. 1.22, а лійкоподібної фігури, Рис. 1.23. Замість "точки" зображення — світний диск з радіальним перепадом інтенсивності. Порушується гомоцентричність світлового пучка. Замість світної точки у ідеальному фокусі F' — розмита світна пляма. Пляма буде тим більша, чим більший діаметр лінзи і менша фокусна відстань f' . Точка фокусування F' найближчих до осі променів відповідає розрахунку по формулі тонкої лінзи. Найменший розмір перетяжки каустики знаходиться у деякій точці F'_v між крайніми положеннями фокусів F'_r і F' .

Сферична аберация - неспівпадання гомоцентричності паралельних світлових променів, які проходять на різній відстані від центру лінзи. Сферичну аберацию характеризують *поздовжнім показником* сферичної аберації $\delta f'$ — віддалю між фокусами для центральних приосьових променів і для найвіддаленіших від осі променів світла.

Для променів, що проходять по центру лінзи параксіальність променів найвища, тому для них найкраще виконується формула тонкої лінзи з характеристичним значенням фокусної відста-

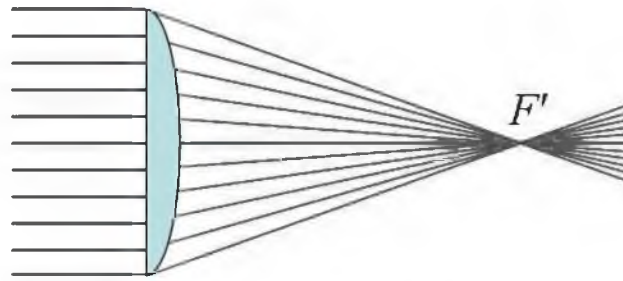


Рис. 1.22. Ідеальне фокусування.

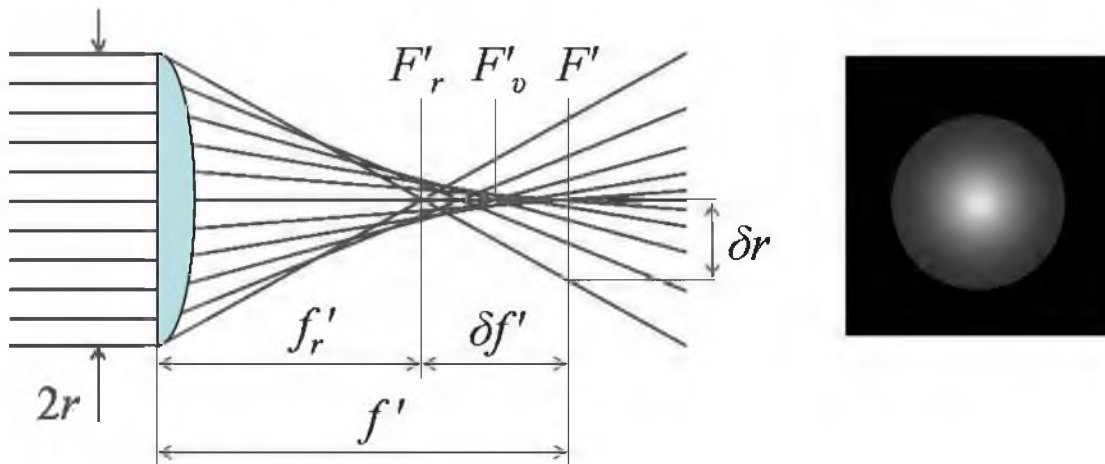


Рис. 1.23. Сферична аберація. r — радіус лінзи, f' — фокусна відстань для приосьових променів, f'_r — фокусна відстань для променів, що проходять на краю лінзи, $f' - f'_r = \delta f'$ — показник сферичної аберації, δr — радіус реальної світної плями замість світної точки ідеального фокусування. Справа подано її зображення у площині F' .

ні f' . Для світлових променів по краю лінзи відбувається фокусування променів, але так, ніби для оптичної системи з іншим значенням фокусної відстані f'_r . Тому у формуванні зображення крайніми променями світла застосовна формула тонкої лінзи із значення f'_r відмінним від f' ідеальної системи.

1. Світильник з предметним склом (без світлофільтра) на одному краю лави, екран — на протилежному краю, фіксують їх положення.
2. Встановлюють лінзу 5 з діафрагмою, що пропускає світло по центру лінзи. Рейтер з лінзою переміщують до положення чіткого збільшеного зображення на екрані. Фіксують рейтер. Регулюють візуально зручну потужність світла ру-

чкою на блоці живлення. Міряють відстань s від предмета до лінзи, відстань s' від лінзи до екрана. Обчислюють фокусну відстань f' застосуванням формули тонкої лінзи.

3. Міняють діафрагми. Відпускають гвинт на оправі відхиляють пластинку з отвором по центру. Встановлюють і фіксують гвинтом круглу пластинку, що перекриває хід променів світла по центру лінзи, пропускає тільки промені по краю лінзи. Міряють радіус діафрагми r лінійкою або штангенциркулем.
4. Лінза залишається у тому самому положенні, на віддалі s від предмета. Екран переміщують ближче до лінзи до отримання чіткого збільшеного зображення. Міряють відстань s'_r від лінзи до екрана, обчисліть фокусну відстань f'_r застосуванням формули тонкої лінзи, знаходять значення поздовжньої сферичної аберації $\delta f' = |f' - f'_r|$.
5. На лінзі відпускають гвинт, відвертають обидві діафрагми, щоб не обмежували проходження світла через лінзу, фіксують таке положення діафрагм гвинтом. Повертають лінзу на попереднє місце на віддалі s від предмета. Переміщуючи екран від лінзи, знаходять положення максимальної чіткості зображення. Міряють відстань s'_v від лінзи до екрана. Обчислюють f'_v , порівнюють з f' та f'_r . Роблять висновки.

Крім сферичної є інші типи геометричних аберацій. Ми їх можемо спостерігати навколо нас у прозорих предметах наближено сферичної форми, у не достатній якості світлин з вигином загальнопланових ліній, викривленими рисами обличчя при малій відстані фотографування. В репродукціях журналів все більшу популярність мають світлини з навмисними панорамними аберациями виконаними цифровими засобами або за допомогою спеціальних фільтрів чи "фіш-ай"-об'єктивів.

Спостереження геометричних аберацій у тонкій лінзі

Кривизна поля зору Площині предмету у сферичній лінзі спряжена поверхня з невеликою випуклістю. Якщо навести вищу чіткість зображення поблизу оптичної осі, то край буде розмитим. І навпаки добитися чіткого зображення на краю можна при розмитому зображенні у центральній частині.

1. Розміщують світильник і екран на протилежних краях лави. Лінзою отримують збільшене зображення чітко по центру. Закріплюють лінзу і наближають екран до різкого зображення на краях. Що при цьому відбувається з центральною частиною зображення?
2. Повторюють дослід з встановленим екраном на середині лави.

Коматична аберація, астигматизм

1. Встановлюють світильник на одному краю лави, на протилежному краю екран, фіксують їх положення. Поміщають між ними лінзу 5 з діафрагмою круглого отвору по центру. Лінзу наближають до екрана з отриманням чіткого зменшеного зображення світильника. Через те, що світильник круглий і знаходиться на відстані більшій за подвійну фокусну відстань, зображення буде також круглим

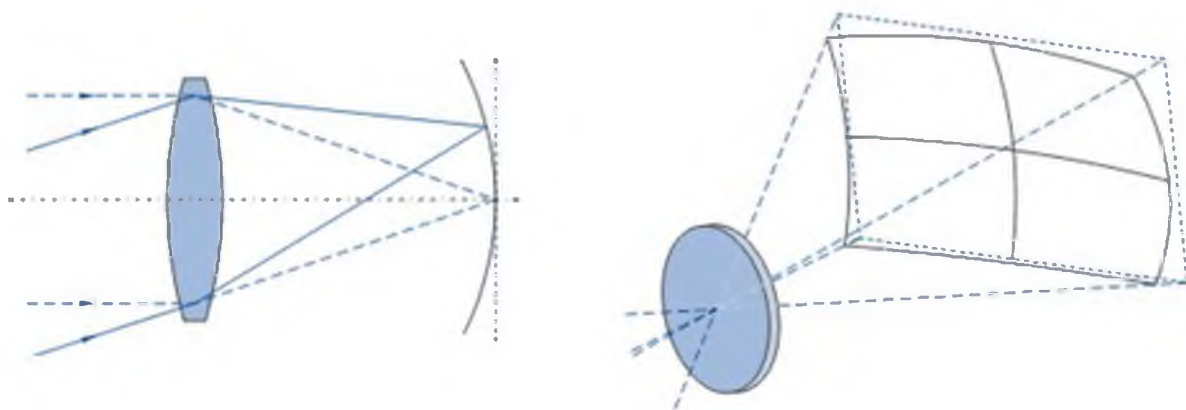


Рис. 1.24. (Вікіпедія) Пунктирні лінії — ідеальний хід променів і відповідне плоске поле зображення. Суцільні лінії — реальний хід променів і ввігнуте поле зображення.

і зменшеним — невеличка світна пляма з чітким контуром. Закріплюють рейтер з лінзою на лаві, відпустіть штатив з лінзою гвинтом у верхній частині рейтера, повертають навколо вісі штатива. Чим більший буде кут повороту лінзи, тим довшим буде кометоподібний "хвіст". Це вияв аберацій названої *комою*.

2. Отримують кому з поворотом лінзи на $5-10^\circ$ навколо осі штатива. Переміщують рейтер з лінзою на декілька сантиметрів далі від екрана. Зображення світної плями набуває овальної форми, а далі набуває вигляду вертикальної світної плями. Це *сагітальний* прояв *астигматизму*. Зміщують рейтер з лінзою ближче до екрана до прояву *меридіального* вияву астигматизму з вертикальним овалом чи світним відрізком.

Коматична аберация або *кома* (від дав.-гр. *κόμη* — волосся, дав.-гр. *κόμητις*, *kom 'ētēs* — волосатий, косматий). Має вигляд подібний до комети, до коми, до ореолу з волосся закинутого над головою.

Проявляється кома у нахилених до головної оптичної осі пучках, Рис. 1.25. Паралельний пучок світла уявно розділимо на кругові зони. Центральна зона у фокальній площині буде давати світну точку. Кожна наступна зона має зображення кільця все далі від зображення центральної зони і все більшого діаметру. Кома має вигляд несиметричної плями розсіювання.

Кома є основним чинником обмеження роботи параболічних телескопів-рефракторів, проявляється у оптичних нецентрованих системах. Використовують інколи кому у фотографії для створення художніх ефектів розмивання "іскринок", спалахів.

У світлі паралельному головній оптичній осі лінзи зображення віддаленого світильника має стигматичне зображення (грец. *στιγμα* — цятка). У нахиленому до оптичної осі пучку утворюються дві фокальні площини з астигматичним відхиленням: *меридіальний астигматизм* для променів у площині повороту лінзи; далі від лінзи, у площині перпендикулярній до осі повороту, *сагітальний астигматизм*. Якщо вікно світильника зменшити до

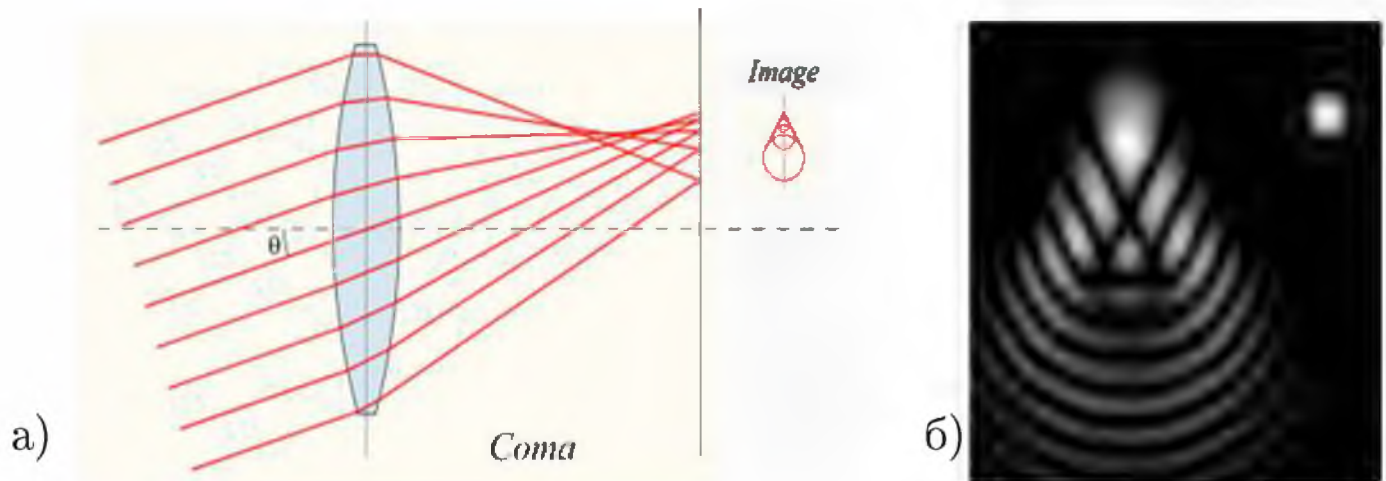


Рис. 1.25. а) Геометричний хід променів коматичної аберації. б) Коматична аберация у телескопі в поєднанні з хвильовими аберациями. Для порівняння справа дифракційний круг Ейрі властивий для зображення у когерентному світлі далекої зорі без коми.

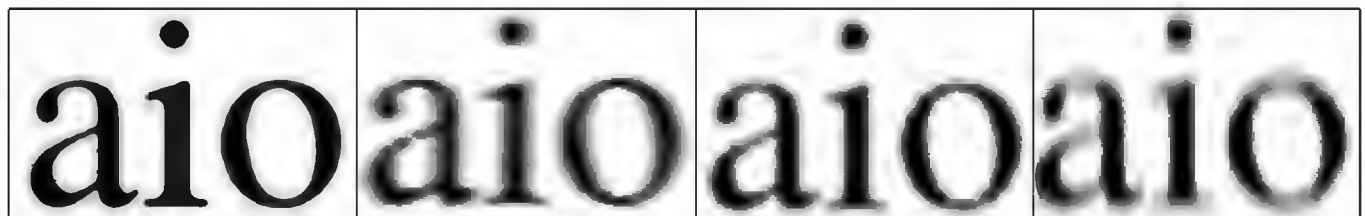


Рис. 1.26. Предмет і його зображення з меридіальною розмитістю дефокусування, розмите проміжне зображення, зображення предмету з проявом сагітального астигматизму.



Рис. 1.27. Астигматизм зорі з накладанням інтерференційних ефектів у телескопічному зображенні: сагітальний, проміжний ("міжфокусний"), меридіальний.

малого розміру, то замість овалів будуть спостерігатися світні риси меридіального і сагітального фокусів нахилених (косих) пучків світла до оптичної осі лінзи.

Астигматизм зображення в прямих пучках спостерігається у лінзах, в яких замість правильної сферичної кривини поверхонь присутня еліпсоїдальність — радіус кривини в одній площині відмінний від радіуса кривини поперечної площини перерізу лінзи. Відповідно фокусування паралельного пучка променів у цих площинах має різну фокусну відстань. Через те, що координата фокуса залежить від радіуса кривизни поверхні, для еліптичних поверхонь буде спостерігатися аберация подібна астигматизму в променях нахилених до оптичної осі лінзи.

Дисторсія (від лат. *distorsio*, *distortio* — викривлення) — аберация із зміною коефіцієнта лінійного збільшення по полю зору. Від'ємна дисторсія дає зображення квадрата у вигляді "подушки", додатна — "бочки" ("риб'ячого ока"). У подушкоподібній дисторсії на краю зображення кратність збільшення вища, тому кутики квадрата витягуються. У подушкоподібній навпаки — кратність збільшення на краю менша, "випинається" центр.

1. Встановлюють замість світильника лазерний випромінювач з напрямком пучка вздовж лави. Лазер випромінює хвилі у вузькому інтервалі частот, має високу ступінь монохромності.
2. Впритул до лазера встановлюють мультиплекс² на юстувальному штативі. За мультиплексом розходить велика кількість пучків світла.
3. За мультиплексом встановлюють екран, на екрані утвориться правильна ґратка світних точок на перетині уявної

²Назва "мультиплекс" має декілька значень в оптиці і техніці. Слово "мультиплекс" означає багатократне повторення, помноження. Тут під мультиплексом розуміють схрещені дифракційні ґратки (принцип роботи вивчається в розділі хвильової оптики).

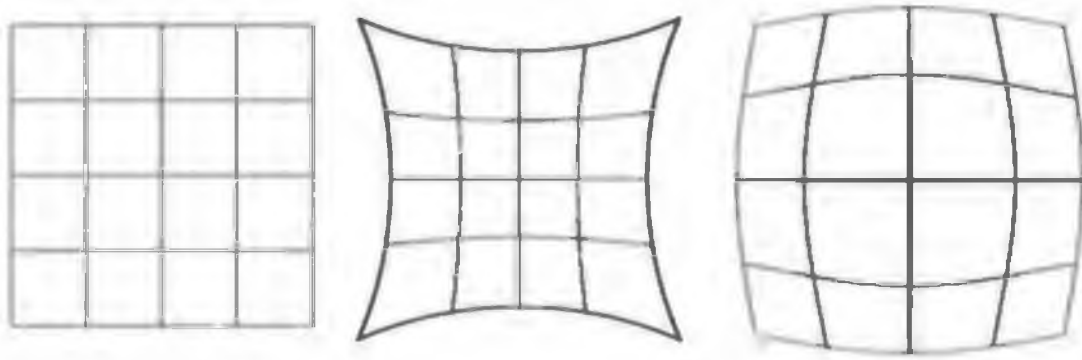


Рис. 1.28. Зліва — предмет у вигляді правильної ґратки. Таку саму правильну ґратку, збільшену чи зменшену, повинні отримати у площині зображення ідеальної оптичної системи. По центру — зображення ґратки з аберацією подушкоподібної дисторсії. Справа — зображення з бочкоподібною дисторсією.



Рис. 1.29. Огляд торгового залу у сферичне дзеркало, дешевий і ефективний спосіб контролю прилавків. Дисторсійні аберації тут не мають особливого значення.

квадратної сітки. Переміщенням екрана спостерігають гомотцентричне розходження пучків світла. Екран встановлюють далі від випромінювача на відстань не менше 60 см.

4. Лінзу 5 без діафрагм встановлюють між мультиплексом і екраном так, щоб пучки променів збиралися в точку на екрані.
5. Переміщенням лінзи далі від екрану спостерігають по-

душкоподібну дисторсію замість правильної квадратної структури. І навпаки віддаленням від екрана лінзи отримують *бочкоподібну дисторсію*. Які будуть вияви дисторсії при поворотах лінзи навколо вертикальної осі?

Найдошкульніша дисторсія напевне в картографії. Зменшують дисторсію цифровими засобами обробки світлин. На інтернет-сторінках фотографів-любителів і професійних зйомок не мало інформації подолання чи використання аберацій. Особливо дисторсія відчутна, якщо на фотографії багато прямих ліній через весь кадр, Рис. 1.30. Найменша прояв дисторсії в об'єктивах симетричної конструкції. При ширококутному об'єктиві її обов'язково доведеться виправляти. Або навпаки використати ширококутний об'єктив для використання явної дисторсії у художній чи спеціальній техніці фотографії. Близько від обличчя виконані портретні світлини можуть бути основною причиною низької їх якості, Рис. 1.31, 1.32. Дисторсія властива для довільних викривлених оптичних поверхонь, Рис. 1.33, 1.34. Існує спеціальна техніка, об'єктиви "риб'яче око" (fisheye lens), з посиленням дисторсії.



Рис. 1.30. Зліва світлина має "зручний" фон вияву бочкоподібною дисторсії у вигляді правильної квадратної структури; справа — демонстрація виправлення аберації у графічному пакеті. (<http://funphoto.ua/rus/distorsio.php>)



Рис. 1.31. Серія портретів людини виконаних одним і тим самим 50-ти міліметровим об'єктивом з різної відстані 2 м, 85 см, 40 см, 30 см, 20 см. (<http://photo.stackexchange.com/questions/76321>)



Рис. 1.32. Дисторсію заднього плану, добре помітну на світлинці зліва, можна виправити програмними засобами, світлинці справа. Портретні роботи програмній обробці не піддаються, "портрет" осла залишився не пропорційним як в частинах голови, так і в порівнянні з тулубом. (<http://pavelbogdanov.ru/tag/azbuka>)

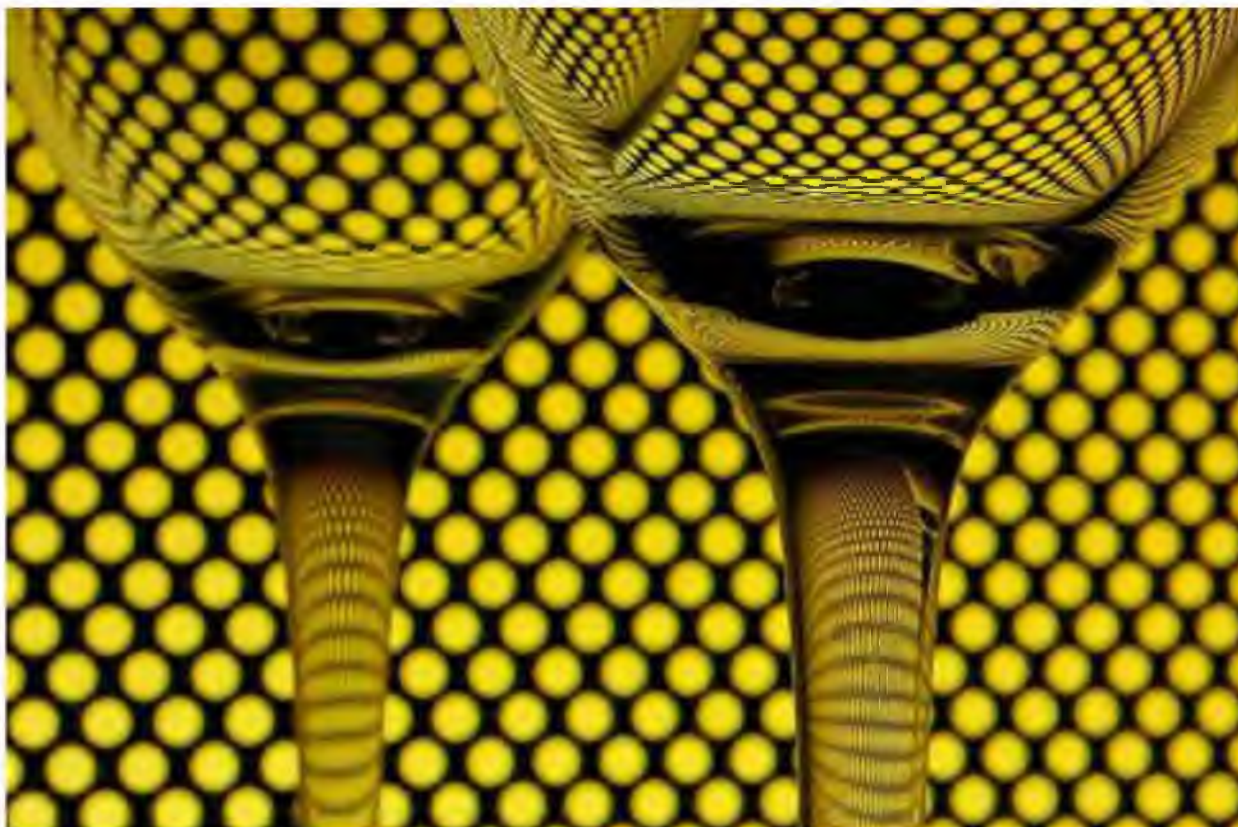


Рис. 1.33. Дисторсія поширена у випуклих і ввігнутих поверхнях навколо нас. (Вікіпедія)



Рис. 1.34. Дивовижні перетворення зумовлені дисторсією використовують фотохудожники (<http://mylovefoto.clan.su/>; <http://rebrn.com/re/sunset-refraction-773220/>)