CÁC DỤNG CỤ QUANG HỌC

TÁC GIẢ

Michael Smith: Đại học công nghệ Cape Peninsula

THẨM ĐỊNH

Dr B. Ralph Chou: Giáo sư danh dự, Trường khúc xạ nhãn khoa và khoa học thị giác, Đại học Waterloo

Dr Vincent Nourrit: Đại học Manchester

NỘI DUNG CỦA CHƯƠNG

GIỚI THIỆU ..... **Error! Bookmark not defined.**

MÁY ẢNH ..... **Error! Bookmark not defined.**

QUANG SAI CỦA THẤU KÍNH 7

KÍNH LÚP ĐƠN GIẢN 10

KÍNH HIỂN VI KÉP 13

KÍNH THIÊN VĂN 15

GIỚI THIỆU

Sự hiểu biết về quang học của các dụng cụ quang học cơ bản rất quan trọng bởi vì chúng được ứng dụng trong nhiều dụng cụ lâm sàng khác nhau cũng trong như các thiết bị điều trị được sử dụng bởi các cử nhân khúc xạ nhãn khoa đang hành nghề.

MÁY ẢNH

CẤU TẠO

Máy ảnh thấu kính đơn là một dụng cụ quang học đơn giản. Nó gồm có một hộp kín ánh sáng, một thấu kính hội tụ tạo ra một ảnh thực, và một phim ở sau ống kính để tiếp nhận hình ảnh. Khác với mắt, loại ống kính máy ảnh này có tiêu cự cố định. Tiêu cự được điều chỉnh (khi có thể) bằng cách thay đổi khoảng cách giữa thấu kính và phim. Để chỉnh đúng tiêu cự, làm cho ảnh rõ nét, khoảng cách từ ống kính tới phim sẽ phụ thuộc vào khoảng cách vật cũng như là tiêu cự của ống kính.

Cửa sập, nằm sau ống kính, là một thiết bị cơ học được mở ra trong những khoảng thời gian được chọn. Để chụp ảnh, đầu tiên chỉnh vị trí ống kính sao cho một ảnh thực, đảo ngược của vật vào đúng tiêu điểm ở mặt phẳng của phim. Sau đó, khi bạn bấm nút, cửa sập mở ra trong giây lát và một ảnh tạo thành trên phim. Ảnh này được giữ ở vật liệu nhạy sáng để xử lí hóa học sau đó và tái tạo lại hình ảnh. Máy ảnh kĩ thuật số thay thế phim ảnh bằng một dãy cảm biến điện tử mà độ nhạy của nó có thể được chỉnh để giống với đáp ứng của phim.

Khẩu độ thực tế của ống kính được điều khiển bằng một màng chắn con ngươi (iris diaphragm) trong đó kích thước của con ngươi có thể thay đổi. Sở dĩ có tên như vậy bởi vì nó thực hiện một chức năng tương tự mống mắt. Ở một số máy ảnh, màng chắn con ngươi cũng hoạt động như một cửa sập; bình thường màng chắn đóng kín, nhưng nó mở ra với một độ lớn đã định để làm lộ sáng phim.

ĐIỀU CHỈNH ÁNH SÁNG Ở MÁY ẢNH

Với máy ảnh hiện đại và đủ ánh sáng, cửa sập chỉ cần mở trong một phần nhỏ của một giây để ghi được hình ảnh trên phim. Nhiều máy ảnh có nhiều ***tốc độ cửa sập*** khả dụng, tức là những khoảng thời gian mà cửa sập được mở. Các tốc độ cửa sập tiêu chuẩn là 1/30, 1/60, 1/125, 1/250, 1/500, 1/1000, và 1/2000 giây. Chú ý rằng mỗi tốc độ này có thời gian xấp xỉ bằng một nửa tốc độ trước nó (trong thuật ngữ nhiếp ảnh gọi là "nhanh gấp đôi"). Tốc độ cửa sập càng nhanh, thì vật có thể chuyển động nhanh hơn mà vẫn cho ảnh rõ nét.

Với sự sắp xếp này, các vật chuyển động có thể được chụp khi dùng thời gian phơi sáng ngắn, và các cảnh tối (mức độ sáng thấp) khi dùng thời gian phơi sáng dài. Nếu không có sự điều chỉnh này thì không thể chụp các ảnh dừng cảnh. Thí dụ, một xe đua phóng nhanh sẽ đi quá xa trong khi cửa sập mở để tạo ra một ảnh nhòe. Các vật tĩnh có thể được chụp với tốc độ cửa sập 1/60 giây bởi vì không bị nhòe do chuyển động, mặc dù máy ảnh phải được giữ cố định. Các máy ảnh đời cũ có cửa sập hình bán nguyệt, nhưng các kiểu máy sau này thường có cửa sập diaphram.

Lượng ánh sáng tới phim phải được kiểm soát cẩn thận để tránh **thiếu sáng** (quá ít ánh sáng khiến cho không thể thấy rõ mọi vật, trừ những vật sáng nhất) hoặc **quá sáng** (quá nhiều ánh sáng, do đó tất cả các vật sáng trông như nhau, dẫn đến thiếu tương phản). Để kiểm soát lộ sáng, một màng chắn (có đường kính khẩu độ thay đổi) được đặt ở sau thấu kính. Kích thước khẩu độ được thay đổi để bù trừ cho các điều kiện sáng khác nhau, độ nhạy của phim được dùng, và các tốc độ cửa sập khác nhau.

Ảnh "phơi sáng đúng" tương ứng với một lượng ánh sáng thích hợp tới phim. Do đó "phơi sáng đúng" nghĩa là **năng lượng ánh sáng đúng trên một đơn vị diện tích** của phim. Lượng này khác nhau đối với các loại phim khác nhau. Lượng ánh sáng tới phim được quyết định không chỉ bởi thời gian mở của cửa sập mà còn bởi độ mở hiệu dụng của khẩu độ ống kính. Do đó, tương tự lượng nước chảy từ một vòi nước, nó phụ thuộc vào cả khoảng thời gian vòi nước mở và diện tích ngang của lỗ vòi. Chúng ta có thể suy ra mối quan hệ giữa "lượng ánh sáng" và các thông số của máy ảnh như sau: (xem phần trắc quang ở chương 8 để biết chi tiết về các thuật ngữ được dùng ở đây)

1. **Lượng ánh sáng rơi vào ảnh ở một máy ảnh tỉ lệ với diện tích của khẩu độ ống kính (hoặc d^2) trong đó d là đường kính của khẩu độ.** Điều này xuất phát từ thực tế là diện tích của một hình tròn được tính bằng πr^2 ($\pi d^2/4$).

2. **Diện tích của ảnh được tạo thành tỉ lệ với f^2, trong đó f là tiêu cự của ống kính**, bởi vì độ dài ảnh tạo ra tỉ lệ với tiêu cự.

Do đó, độ sáng trên đơn vị diện tích ảnh (hoặc ***độ rọi*** của ảnh) tỉ lệ với d^2/f^2. Thời gian lộ sáng (tốc độ cửa sập), **t**, để kích hoạt các hóa chất trên phim âm bản đã cho tỉ lệ nghịch với độ rọi (lượng ánh sáng lớn hơn rơi vào đơn vị diện tích trên đơn vị thời gian, sẽ cần thời gian ít hơn để có "lượng ánh sáng đúng" trên phim). Do đó:

$$t \propto f^2/d^2 \quad \text{hoặc } t \propto (f/d)^2$$

Kích thước lỗ ống kính, (thường gọi là khẩu độ hoặc khẩu độ tương đối), thường được đo bằng giá trị f (hoặc **số f).**

$$\text{số f} = \frac{\text{tiêu cự của ống kính}}{\text{đường kính của ống kính}} = \frac{f}{d}$$

Thí dụ, một ống kính với đường kính bằng 1/2 tiêu cự có số f là 2 (được ghi là f-2). Màng chắn con ngươi có thể được chỉnh để giảm khẩu độ ống kính hiệu dụng, do đó tăng số f. Số f càng lớn thì khẩu độ càng nhỏ, và lượng ánh sáng tới phim càng ít. f-stop điều chỉnh lượng ánh sáng qua ống kính bằng cách thay đổi diện tích lỗ mà ánh sáng đi qua.

Nếu khẩu độ được cho là f-4 thì nghĩa là đường kính ***d*** của khẩu độ là f/4, trong đó f là tiêu cự của ống kính. Khẩu độ f-8 nghĩa là đường kính ***d*** bằng f/8, khẩu độ này nhỏ hơn f/4.

Các số f tiêu chuẩn là: 0.7 1.0 1.4 2.0 2.8 4 5.6 8 11 16 22.

Chú ý rằng các số f-stop liên tiếp khác nhau theo hệ số khoảng √2. Do đó, nếu thay đổi số f của ống kính từ f-4 thành f-5.6 thì bạn đã giảm đường kính khẩu độ theo hệ số 1/√2. Diện tích khẩu độ giảm theo bình phương của hệ số này. Do đó, nếu tốc độ cửa sập không đổi thì lượng ánh sáng đi qua lỗ ống kính sẽ giảm một nửa. Sự thay đổi khẩu độ tương đương với đi từ một f-stop tới số kế tiếp được gọi là **thay đổi đủ một bậc**.

Tăng một số f sẽ **giảm lượng ánh sáng đi qua ống kính theo hệ số 2**. (giảm một nửa)

Thay đổi từ một số f sang **một số thấp hơn kế tiếp** sẽ tăng **lượng ánh sáng đi qua ống kính theo hệ số 2**. (tăng gấp đôi)

Do thời gian lộ sáng (t) tỉ lệ với f^2/d^2 nên **tốc độ cửa sập** cần thiết với khẩu độ f-8 (**d**= f/8) **lớn hơn 16 lần** so với tốc độ cần thiết với khẩu độ f-2 (**d**= f/2). (Chú ý rằng chúng ta đã di chuyển BỐN nấc từ f-2 sang f-8.)

Ngược lại, **độ sáng** qua ống kính đồng thời **nhỏ hơn 16 lần**.

Số f	Đường kính của khẩu độ (mm)	Bán kính của khẩu độ (mm)	Diện tích của khẩu độ (mm^2)
f-1.0	50.0	25.0	1963
f-1.4	35.7	17.9	1002
f-2.0	25.0	12.5	491
f-2.8	17.9	8.9	250
f-4	12.5	6.3	123
f-5.6	8.9	4.5	63
f-8	6.3	3.1	31
f-11	4.5	2.3	16
f-16	3.1	1.6	8
f-22	2.3	1.1	4
(được ghi ở ống kính)	*(50mm chia cho số f)*	*(1/2 đường kính)*	*(π x r^2)*

Bảng 9.1: *Diện tích khẩu độ của các số f-stop của ống kính 50 mm*

Đến đây, cần tóm tắt một số hệ thức mà chúng ta đã gặp:

- tốc độ cửa sập $\propto$ (số f)^2
- khẩu độ ống kính $\propto$ 1/số f
- các số f liên tiếp sẽ khác nhau bởi $\sqrt{2}$

  (Do đó thời gian phơi sáng sẽ chênh lệch bởi hệ số 2 cho các số f liên tiếp)
- lượng ánh sáng đi qua ống kính tỉ lệ nghịch với (f-stop)^2. (Do đó, độ sáng sẽ thay đổi theo hệ số 2 cho các số f liên tiếp)

Do có thể chỉnh được cả tốc độ cửa sập và số f nên người chụp ảnh có thể để cho phim phơi sáng thích hợp trong khi vẫn có lựa chọn sử dụng một tốc độ cửa sập riêng hoặc một độ ống kính riêng. Thí dụ, cùng một lượng ánh sáng tới phim của một máy ảnh trong các chế độ lộ sáng 1/50 giây với f-8; 1/100 giây với f-5.6; và 1/200 giây với f-4.
Nếu bây giờ chúng ta trở lại với thế nào là **"phơi sáng đúng"**, ở phần trước chúng ta đã lưu ý rằng đó là **năng lượng ánh sáng trên đơn vị diện tích.** Chúng ta đã cho thấy rằng lượng này có thể có được từ:

phơi sáng đúng = độ rọi x thời gian phơi sáng

Chúng ta cần kết hợp số f với tốc độ cửa sập để đạt được phơi sáng đúng. Có thể có nhiều lựa chọn kết hợp. Đối với các tình huống trong đó chúng ta cần thay đổi từ một kết hợp này sang một kết hợp khác thì hệ thức dưới đây cho phép có thể thực hiện dễ dàng.

$$f_1^2 \times \frac{1}{t_1} = f_2^2 \times \frac{1}{t_2}$$

a)

Thí dụ, nếu chúng ta đo sáng một cảnh và nó cho biết phơi sáng đúng là 1/125 giây với f-8 thì bất kì kết hợp nào dưới đây cũng đều có kết quả:

Tốc độ cửa sập (giây)	1/4	1/8	1/15	1/30	1/60	**1/125**	1/250	1/500	1/1000	1/2000
Số f	f-45	f-32	f-22	f-16	f-11	**f-8**	f-5.6	f-4	f-2.8	f-2

(**Kiểm tra kiến thức của bạn bằng cách kiểm tra một số những kết hợp này.)**

TỐC ĐỘ ỐNG KÍNH MÁY ẢNH

Tốc độ tạo ra ảnh (**tốc *độ*** ống kính máy ảnh) liên quan với các đại lượng đã gặp ở trên:

$$\textbf{tốc độ ống kính} \propto [d^2/f^2 = 1/(\text{số } f)^2]$$

Đối với hầu hết các mục đích, tốc độ ống kính chỉ phụ thuộc vào số f và không phụ thuộc vào tiêu cự riêng. Tốc độ ống kính cho biết độ tập hợp ánh sáng của nó, do đó số f cũng là một số đo độ tập trung ánh sáng của ống kính. Ống kính tốc độ nhanh có số f nhỏ, do đó có tiêu cự tương đối ngắn và đường kính lớn.

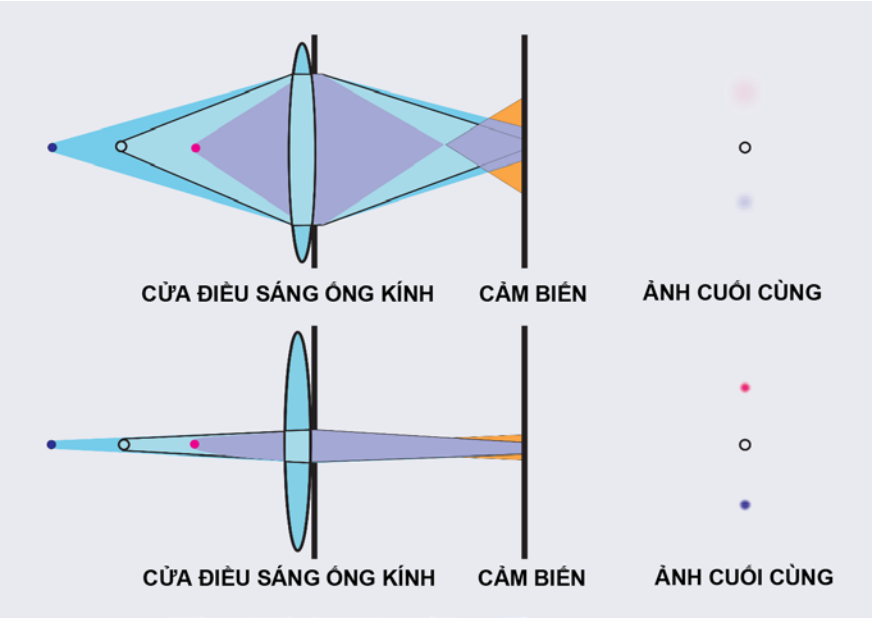
ĐỘ SÂU TRƯỜNG

Nếu ống kính được điều tiêu vào một vật ở gần thì sẽ tạo ra một ảnh rõ nét. Nhưng lúc này các tia từ một điểm của vật ở xa sẽ không đúng tiêu điểm và sẽ tạo thành một điểm mờ trên phim. Do đó vật ở xa sẽ tạo ra một ảnh gồm các điểm chồng nhau và sẽ bị mờ. Các vòng tròn này được gọi là **vòng mờ.** Nếu muốn có ảnh rõ nét của các vật ở xa và gần đồng thời, bạn có thể đặt tiêu điểm của ống kính ở vị trí trung gian. Lúc này cả vật ở gần lẫn vật ở xa đều không rõ hoàn toàn, nhưng các vòng mờ có thể nhỏ đến mức độ mờ trở thành không đáng kể. Đối với một khoảng cách đã cho, có một **giới hạn các khoảng cách vật mà ở đó** các vòng mờ sẽ đủ nhỏ để **các ảnh sẽ rõ nét ở mức độ chấp nhận được**. Giới hạn này được gọi là độ sâu trường.

Độ sâu trường bị ảnh hưởng bởi các yếu tố sau:

- khẩu độ của ống kính
- tiêu cự của ống kính
- khoảng cách từ máy ảnh tới vật

Với một đường kính vòng mờ ít nhất cụ thể (thường là 0.03 mm ở các máy ảnh 35-mm), độ sâu trường phụ thuộc vào khẩu độ ống kính. Nếu khẩu độ ống kính nhỏ hơn thì các vòng mờ sẽ nhỏ hơn, bởi vì chỉ có các tia đi qua phần giữa của ống kính được chấp nhận, và các tia này tạo thành một vòng mờ nhỏ hơn. Do đó, **với các khẩu độ ống kính càng nhỏ thì độ sâu trường càng lớn**.



Hình 9.1: *Hình biểu diễn độ sâu trường và ảnh hưởng của nó đối với tiêu điểm của các ảnh khác nhau*

Một cách khác để giảm độ sâu trường là dùng một tiêu cự khác. Khi **tăng tiêu cự của ống kính thì độ sâu trường giảm**. Đây là lí do tại sao việc chỉnh tiêu cự lại quan trọng đối với các ống kính dài.

SO SÁNH MÁY ẢNH VỚI MẮT

Mắt tinh vi và phức tạp hơn rất nhiều so với máy ảnh tốt nhất. Nhưng nói chung, do cả hai đều là hệ thống tạo ảnh nên có một số khía cạnh có thể làm cơ sở để so sánh.

Ở máy ảnh, có một thấu kính hội tụ đơn (hoặc một hệ thấu kính) hoạt động giống như thể thủy tinh hội tụ ở trong mắt. Tuy nhiên, ống kính máy ảnh có môi trường giống nhau ở 2 mặt, trong khi thể thủy tinh của mắt có các môi trường chiết suất khác nhau ở cả 2 mặt. Lớp phim nhạy sáng ở trong máy ảnh tương ứng với võng mạc cảm thụ ánh sáng ở đáy mắt, và cả 2 đều nhận được ảnh thực, đảo ngược, nhỏ hơn vật. Diaphram điều chỉnh lượng ánh sáng đi vào máy ảnh; mống mắt điều chỉnh lượng ánh sáng đi vào mắt.

Phần trong của máy ảnh được làm màu đen để các thành sẽ hấp thụ tất cả các tia sáng tán xạ. Tương tự, phần trong của mắt được bọc bao bằng một lớp áo màu đen cũng hấp thụ ánh sáng. Phim máy ảnh cho chúng ta một ảnh giữ được lâu với mọi chi tiết của vật, trong khi ảnh ở mắt chỉ tồn tại khoảng 1/16 giây trước khi một ảnh rõ ràng khác được ghi lại.

Mắt không có cửa sập giống như của máy ảnh. Cả máy ảnh và mắt đều điều chỉnh tiêu điểm, nhưng điều tiết của mắt hoàn toàn khác với cơ chế điều tiêu của máy ảnh. Nhắc lại rằng mắt thay đổi hình dạng của thể thủy tinh trong khi ở máy ảnh là thay đổi khoảng cách giữa ống kính và phim.

QUANG SAI CỦA THẤU KÍNH

Các bài học trước đã nói về sự tạo ảnh bởi thấu kính mỏng. Thí dụ, chúng ta đã thấy rằng tất cả các tia từ mỗi điểm của vật sẽ hội tụ vào một điểm đơn gọi là điểm ảnh. Những điều này, và các kết quả khác, đều dựa trên những phép xấp xỉ như là tất cả các tia đều tạo thành các góc nhỏ với nhau. Do những phép xấp xỉ này không đúng (ở các mức độ khác nhau) nên trong thực hành chúng ta có thể thấy những sai lệch so với lí thuyết đơn thuần. Những sai lệch này được gọi là quang sai của thấu kính. Chúng làm giảm chất lượng ảnh, thậm chí có thể thay đổi vị trí ảnh.

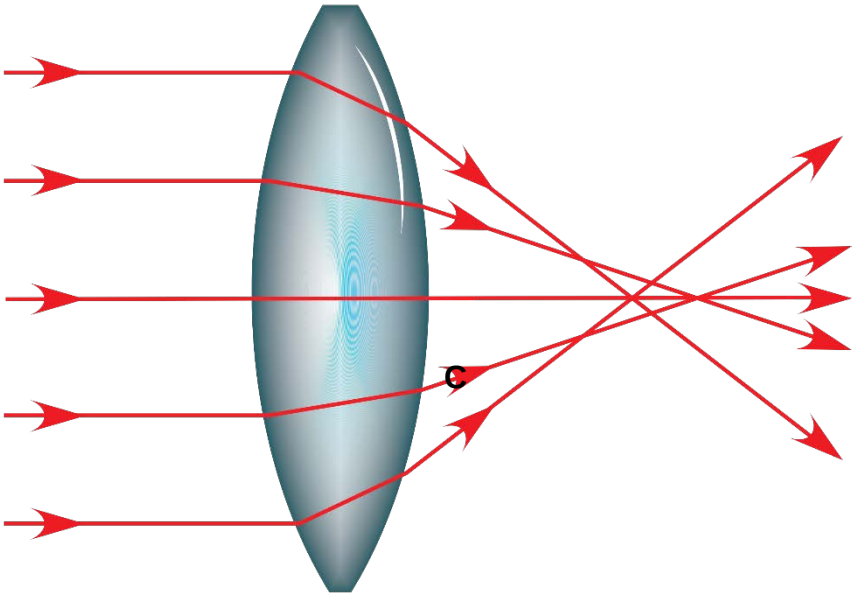
Một số quang sai là do vật liệu kính (chiết suất của nó), thí dụ sắc sai. Ảnh hưởng này không thấy được khi dùng ánh sáng đơn sắc.

Các quang sai khác là do hình dạng thấu kính, và thay đổi khi hình dạng thấu kính thay đổi, thí dụ coma và cầu sai.

CẦU SAI

Vấn đề này xuất hiện mỗi khi sử dụng các mặt cầu. Hãy xem xét một vật điểm nằm trên trục của một thấu kính. **Các tia** từ điểm này **đi qua các vùng ngoại vi thấu kính sẽ hội tụ vào một điểm khác so với các tia đi qua tâm thấu kính.** Hiện tượng này được gọi là cầu sai, và được minh họa cường điệu như trong hình. Bởi vậy, ảnh được thấy trên một tấm phim sẽ không phải là một điểm mà là một mảng sáng tròn nhỏ. Nếu phim được đặt ở điểm **C,** như trong hình, thì vòng tròn sẽ có đường kính nhỏ nhất, gọi là vòng mờ ít nhất.

Đôi khi người ta chủ ý dùng một ống kính máy ảnh không được chỉnh cầu sai để cho hiệu ứng tiêu điểm mềm (quầng).



Hình 9.2: *Cầu sai*

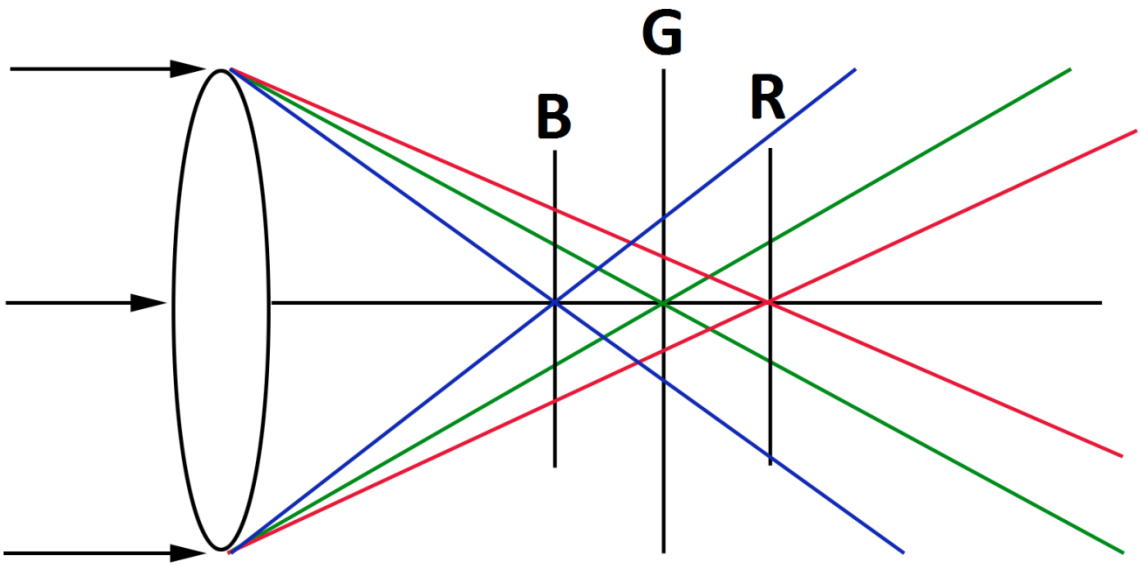
Cầu sai có thể:

- được giảm bằng cách đặt quanh thấu kính một đĩa mờ đục có một lỗ ở giữa để **ánh sáng tới chỉ ở phần giữa thấu kính**. Tuy nhiên, phương pháp này làm giảm độ rọi của ảnh bởi vì nó hạn chế lượng ánh sáng đi qua thấu kính. (Ở máy ảnh, người ta làm điều này bằng cách chọn các số f lớn hơn).

- được chỉnh bằng các thấu kính mặt phi cầu, nhưng việc mài các thấu kính này rất đắt tiền. (Điều này cũng áp dụng cho các gương).

SẮC SAI

Ảnh của một vật được tạo thành bởi thấu kính đơn bị biến dạng do nhiều nguyên nhân. Thiếu sót chính của thấu kính là làm thay đổi màu ảnh mà nó sinh ra, hiện tượng này gọi là *sắc sai.*



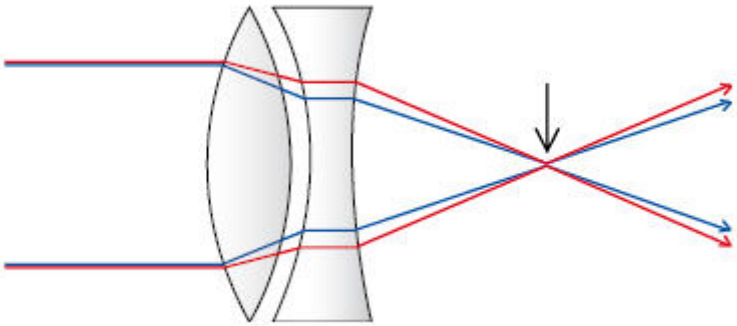
Hình 9.3: *Sắc sai (B: màu lam, G: màu lục, R: màu đỏ)*

Thí nghiệm cho thấy rằng nếu một chùm ánh sáng trắng song song đi tới một thấu kính hội tụ, các tia màu đỏ của ánh sáng sẽ hội tụ ở điểm **R**, và các tia màu lam sẽ hội tụ ở tiêu điểm **B** gần thấu kính hơn. (Xem hình 9.3.) [Cần nhắc lại là chiết suất của thấu kính tăng theo bước sóng. Do đó chiết suất của ánh sáng màu đỏ sẽ lớn hơn chiết suất của ánh sáng màu lam, làm cho ánh sáng hội tụ gần thấu kính hơn]. Do đó, một thấu kính đơn sinh ra các ảnh màu của một vật ở các vị trí hơi khác nhau. Do Newton không biết cách để loại trừ các sắc sai này nên cuối cùng ông quyết định không sử dụng các thấu kính cho kính thiên văn lớn.

Hệ thấu kính vô sắc

Thấu kính hội tụ làm cho tia sáng tới bị lệch về phía trục chính của nó. Tuy nhiên, thấu kính phân kì lại làm cho tia sáng lệch ra xa trục chính của nó (xem hình 9.4 dưới đây).

Do đó, sự tán sắc giữa 2 màu sinh ra bởi thấu kính hội tụ có thể được hủy bằng cách đặt một thấu kính phân kì thích hợp ở bên trong nó. Hình dưới đây minh họa một hệ thấu kính vô sắc, gọi là *thấu kính ghép đôi vô sắc* (*achromatic doublet).* Thấu kính hội tụ được làm bằng thủy tinh crao (crown), trong khi thấu kính phân kì được làm bằng thủy tinh flin (flint). Trong các dạng khác nhau, thấu kính phân kì thường là phẳng-lõm hoặc 2 mặt lõm, trong khi thấu kính hội tụ thì 2 mặt lồi hoặc phẳng-lồi. Do đó 2 thấu kính có thể được gắn với nhau bằng nhựa thơm Canada, bán kính cong của thấu kính lõm bằng bán kính cong của một mặt thấu kính hội tụ. Hệ thấu kính vô sắc tác dụng như là một thấu kính hội tụ khi được dùng như một vật kính ở kính thiên văn hoặc kính hiển vi bởi vì thấu kính crao dương được ghép với một thấu kính flin công suất thấp hơn. Cần chú ý rằng sắc sai sẽ xảy ra nếu thấu kính phân kì và thấu kính hội tụ được làm bằng *cùng một* vật liệu, bởi vì lúc này 2 thấu kính cùng nhau sẽ tạo thành một thấu kính đơn dày có cùng vật liệu.



Hình 9.4: Loại trừ sắc sai bằng một hệ thấu kính

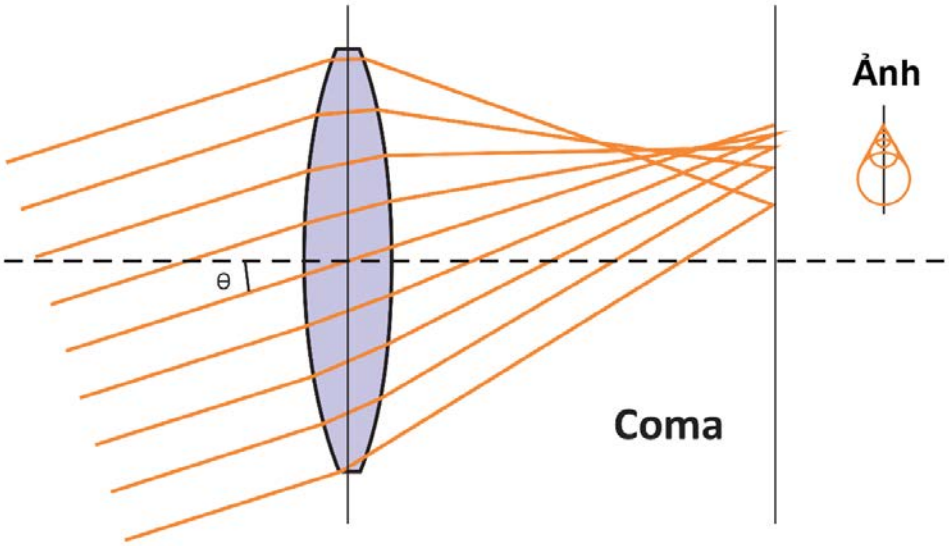
Sắc sai có thể được giảm bằng cách:

- Thay đổi chiết suất của thấu kính
- Thay đổi hình dạng của thấu kính
- Giảm kích thước khẩu độ (dẫn đến giảm các tia biên). (Tuy nhiên, cần nhớ rằng sắc sai trước tiên là do chiết suất của thủy tinh thay đổi theo bước sóng chứ không phải do hình học của bản thân thấu kính).

(Độ cầu sai tăng theo bình phương của khẩu độ).

COMA

Một loại quang sai khác là coma, tên gọi này bắt nguồn từ hình ảnh giống sao chổi của quang sai. Một điểm vật ngoài trục không phải là một điểm ảnh rõ nét, mà biểu hiện như là một hình nhòe dạng sao chổi đặc trưng bởi vì ảnh là một loạt các vòng tròn tạo thành một hình sao chổi. Coma là một quang sai làm cho các tia từ một điểm sáng ngoài trục ở mặt phẳng vật tạo ra một ảnh nhòe có đuôi "dạng sao chổi". Có thể định nghĩa Coma là **mất khả năng của thấu kính làm cho các nguồn sáng điểm ở ngoài quang trục trở thành ảnh tròn**.



Hình 9.5: *Coma*

Coma xảy ra khi một vật nằm ngoài quang trục của thấu kính được tạo ra ảnh, trong đó các tia đi qua thấu kính nghiêng một góc θ so với quang trục. Các tia đi qua tâm của thấu kính có tiêu cự f được hội tụ tại một điểm cách quang trục một khoảng cách f bằng tangθ. Đây là trường hợp mà bản chất là cầu sai với vật nằm ngoài trục. Các tia đi qua các rìa thấu kính ở phía ngoài (tia ngoại vi) hội tụ ở các điểm khác nhau. Do đó, mặc dù cầu sai được chỉnh và thấu kính đưa tất cả các tia vào một tiêu điểm rõ nét trên trục thì thấu kính vẫn có thể có coma ngoài trục. Một thấu kính như vậy có thể tạo ra một ảnh rõ nét ở trung tâm của trường, nhưng càng trở nên mờ hơn về phía rìa kính.

Nói chung, một chùm tia song song đi qua thấu kính ở một khoảng cách cố định đối với tâm thấu kính sẽ được hội tụ vào một ảnh hình vòng ở mặt phẳng tiêu, gọi là vòng coma (*comatic circle)*. Điều này sẽ gây ra mờ ở mặt phẳng ảnh của các điểm vật ngoài trục. Tổng cộng các vòng này gây ra một ánh sáng lóe hình chữ V hoặc hình sao chổi. Cũng như cầu sai, có thể làm giảm (và trong một số trường hợp là loại trừ) coma bằng cách chọn độ cong 2 mặt thấu kính phù hợp với việc sử dụng. Các thấu kính có giảm thiểu cả cầu sai và coma được gọi là thấu kính *dạng tối ưu (bestform*).

Đối với một thấu kính đơn, coma có thể được chỉnh một phần bằng cách uốn cong thấu kính.

Quang sai này là do các tia ngoại vi, vì vậy nó chỉ là vấn đề đối với các quang hệ có khẩu độ lớn và có thể bỏ qua ở kính mắt nhờ tác dụng hạn chế của đồng tử. Nếu tăng kích thước khẩu độ thì coma sẽ nhiều hơn (coma tăng theo bình phương của kích thước khẩu độ). Các vật ngắn có ít coma. Các vật xa trục có nhiều coma hơn. Hình dạng thấu kính sẽ giảm thiểu cầu sai, nhưng không hoàn toàn loại trừ được coma. Khẩu độ càng gần thấu kính thì càng nhiều coma.

Cũng như với cầu sai, có thể chỉnh được coma bằng cách sử dụng nhiều mặt. Cũng có thể tạo ra ảnh rõ hơn bằng cách đặt một khẩu độ chắn (stop) vào một quang hệ để loại trừ các tia ngoài rìa.

Thuật ngữ hệ tương phẳng (aplanatic system) được dùng để chỉ một quang hệ không có cầu sai và coma.

KÍNH LÚP ĐƠN GIẢN

Kính lúp/kính hiển vi đơn giản là một trong số những dụng cụ quang học cơ bản nhất, bởi vì nó chỉ có một thấu kính hội tụ đơn. Như tên gọi của nó, thiết bị này được dùng để làm tăng độ lớn biểu kiến của vật.

ĐỘ PHÓNG ĐẠI GÓC

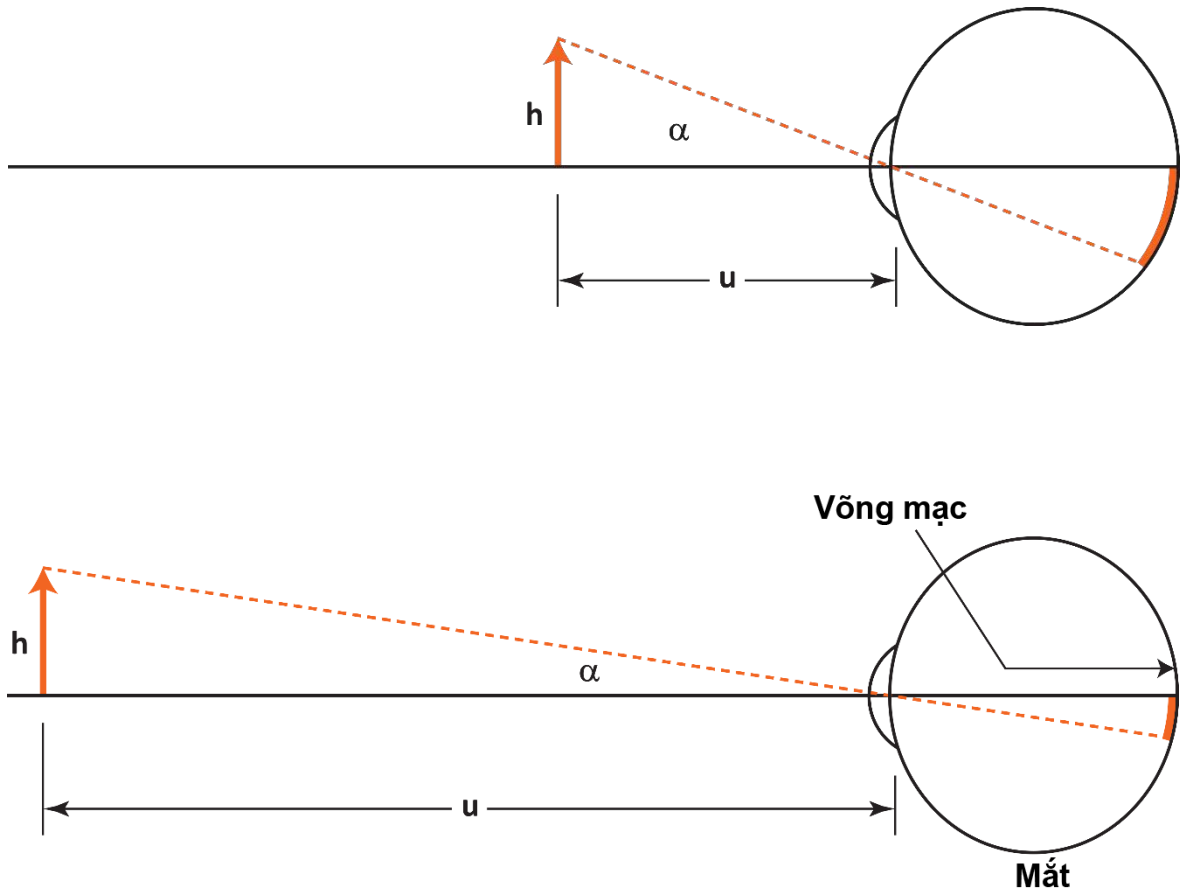
Độ lớn của ảnh ở võng mạc của người quan sát phụ thuộc vào

(i) độ lớn thực của vật (**h**)

(ii) khoảng cách từ vật đến người quan sát (**u**).

2 yếu tố này (**h** và **u**), quyết định độ lớn của góc đối diện với mắt bởi vật (α trong sơ đồ dưới).

Độ lớn biểu kiến của một vật tỉ lệ với góc này.

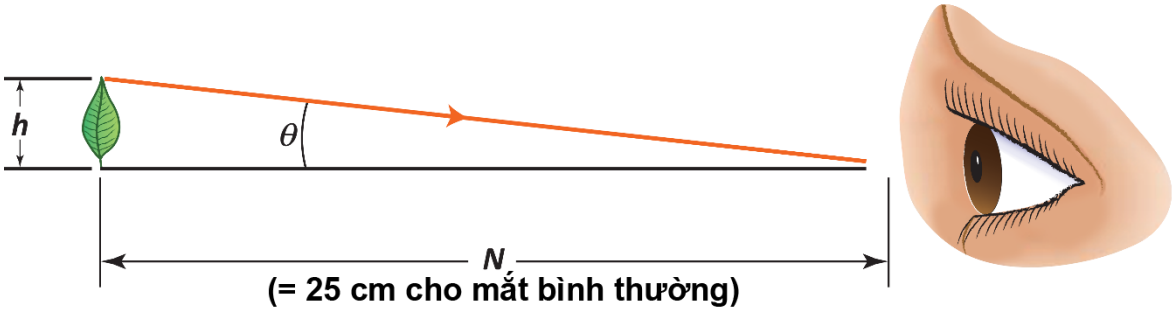


Hình 9.6: *Độ phóng đại góc*

α nhỏ hơn, ảnh ở võng mạc nhỏ hơn

Các dụng cụ quang học tạo ra phóng đại bằng cách tăng độ lớn của góc nhìn của mắt.

Giả sử một vật được nhìn cách mắt một khoảng nhất định. Rõ ràng là độ lớn của ảnh tạo ra ở võng mạc phụ thuộc vào góc (θ) ứng với vật. Khi vật di chuyển lại gần mắt thì góc θ tăng và ảnh lớn hơn. Tuy nhiên, mắt bình thường không thể hội tụ vào một vật gần hơn khoảng 25 cm (cận điểm). Do đó, góc **θ là tối đa ở cận điểm**.



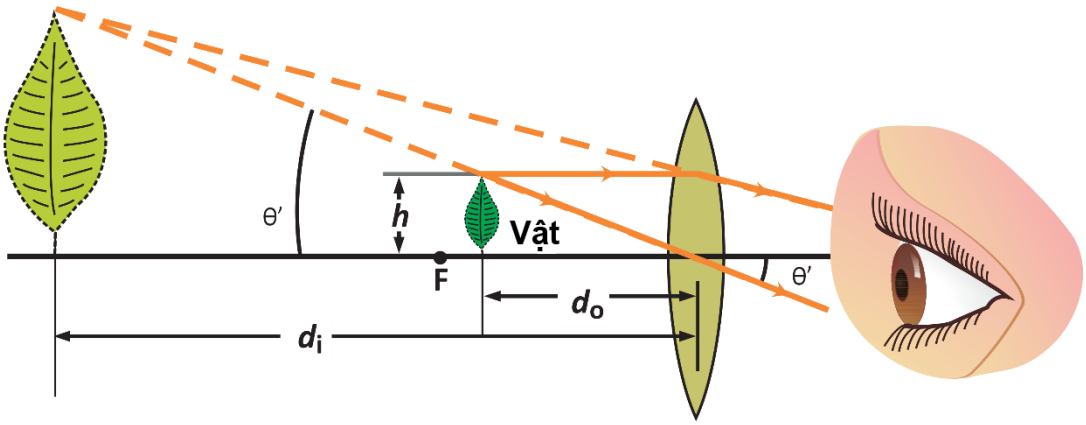
Hình 9.7: *Độ phóng đại góc ở mắt người*

Để tăng hơn nữa độ lớn góc biểu kiến của một vật, có thể đặt một thấu kính hội tụ ở trước mắt. Kính lúp được cầm sao cho vật nằm ở ngay sát phía trong tiêu điểm của thấu kính. Ở vị trí này, thấu kính tạo thành một ảnh ảo thuận chiều được phóng đại lớn nhất có thể.

Thấu kính do đó tăng kích thước góc của vật. Để tạo ra một ảnh như vậy, cần đặt vật ở tiêu điểm hoặc ở ngay sát phía trong tiêu điểm. Nếu mắt không điều tiết thì ảnh sẽ ở vô cực, và trong trường hợp này vật nằm đúng tiêu điểm. Nếu mắt điều tiết thì ảnh nằm ở cận điểm và vật ở ngay bên trong tiêu điểm. (Bạn tự điều chỉnh nhẹ khi "hội tụ" vào vật bằng cách di chuyển kính lúp.)

Cần chú ý rằng trong lí thuyết của dụng cụ quang học, chúng ta quan tâm đến các góc thị giác chứ không phải là các kích thước vật lí thu được của vật và ảnh.

Độ phóng đại góc hoặc năng suất phóng đại (M) của thấu kính là tỉ số giữa góc đối diện (ở mắt) với ảnh tạo ra bởi một dụng cụ quang học (góc θ' trong hình) và góc đối diện (ở mắt) với vật nhìn.



Hình 9.8: *Năng suất phóng đại*

$$M = \frac{\theta'}{\theta}$$

Độ phóng đại góc là tối đa khi ảnh được tạo thành bởi thấu kính ở cận điểm của mắt; tức là khi $d_i = -25$ cm. Khoảng cách vật (d_o) tương ứng với khoảng cách ảnh này có thể được tính bằng phương trình thấu kính mỏng:

$$\frac{d}{d_o} + \frac{1}{-25} = \frac{1}{f}$$

trong đó f là tiêu cự tính bằng cm.

Nếu chúng ta áp dụng phép tính xấp xỉ góc nhỏ thì được kết quả:

$$\tan\theta_0 \gg \theta_0 \gg \frac{h}{25} \quad \text{và} \quad \tan\theta \gg \theta \gg \frac{h}{d_o}$$

Do đó, độ phóng đại trở thành:

$$M = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{h/d_o}{h/25} = \frac{25}{d_o} = \frac{25}{25f/(25+f)}$$

Rút gọn phương trình này sẽ được:

$$M = 1 + \frac{25\text{ cm}}{f}$$

Trong thực hành khúc xạ nhãn khoa, thấu kính thường được định rõ bằng công suất đỉnh sau, trong khi một số kính lúp có thể được định rõ bằng công suất tương đương. Trong những trường hợp này, phương trình độ phóng đại có thể được viết là:

$$M = 1 + \frac{F}{4}$$

Một lần nữa độ phóng đại góc được cho bởi phương trình trên lại là tỉ số của độ lớn góc nhìn với kính với độ lớn góc nhìn không kính, với vật ở cận điểm của mắt. **Mắt** thực tế có thể hội tụ vào một ảnh được tạo thành ở bất kì vị trí nào giữa cận điểm và vô cực, và **giãn điều tiết nhất khi ảnh ở vô cực.**

BẠN KHÔNG CẦN PHẢI BIẾT CÁC NGUỒN GỐC NÀY.

Để cho ảnh tạo thành bởi kính lúp xuất hiện ở vô cực, vật phải được đặt ở tiêu điểm của thấu kính; tức là, $d_o = f$. Trong trường hợp này, phép tính xấp xỉ góc nhỏ cho:

$$\theta_0 \gg \frac{h}{25} \quad \text{và} \quad \theta \gg \frac{h}{f}$$

Độ phóng đại góc lúc này là:

$$M = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{25\ \text{cm}}{f}$$

Khi công suất thấu kính được nêu rõ:

$$M = \frac{F}{4}$$

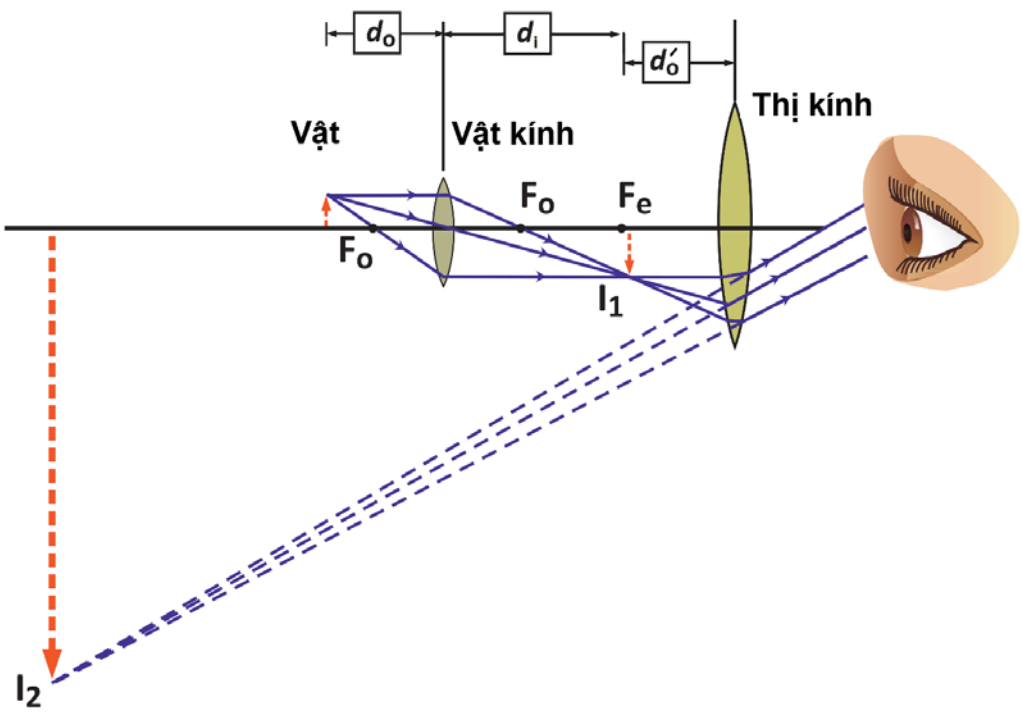
Với một thấu kính đơn, có thể đạt được các độ phóng đại góc tới khoảng 4 mà không có quang sai nghiêm trọng. Chúng ta thấy rằng khi mắt hội tụ vào cận điểm thì độ phóng đại hơi lớn hơn so với khi mắt giãn điều tiết. Cũng có thể thấy rằng tiêu cự của thấu kính càng ngắn thì độ phóng đại càng lớn. Nó phụ thuộc vào việc mắt có giãn điều tiết hay không khi dùng kính lúp.

KÍNH HIỂN VI KÉP

Kính hiển vi là một dụng cụ để quan sát các vật nhỏ. Chúng ta đã thấy rằng có thể tăng độ phóng đại của một kính lúp đơn giản bằng cách dùng một thấu kính có tiêu cự ngắn hơn. Trong thực tế, không thể giảm f quá một giới hạn nhất định. Thứ nhất, có những khó khăn cơ khí gắn với việc mài một thấu kính tiêu cự ngắn (độ cong lớn). Thứ hai, quang sai của thấu kính làm cho ảnh trở thành kém chất lượng.

Để tăng độ phóng đại trên mức có thể bằng một kính phóng đại đơn giản, có thể dùng 2 thấu kính riêng rẽ để đạt được độ phóng đại góc cao, và tạo thành một **kính hiển vi kép**. Trong trường hợp này kính lúp được gọi là ***thị kính*** và thấu kính thêm vào được gọi là ***vật kính***. Vật kính điển hình có tiêu cự ($\mathbf{f_o}$) khoảng 1 cm trong khi thị kính có tiêu cự ($\mathbf{f_e}$) vài cm. 2 thấu kính cách nhau một khoảng **L**, khoảng cách này lớn hơn nhiều so với $\mathbf{f_o}$ hoặc $\mathbf{f_e}$.

Vật được đặt ở ngay bên trong tiêu điểm $\mathbf{F_o}$ của vật kính. Thấu kính này tạo thành ảnh thực phóng đại nằm ở tiêu điểm hoặc ngay bên trong tiêu điểm của thị kính. Thị kính lúc này tác dụng như một kính lúp đơn và tạo ra một ảnh ảo lớn hơn nhiều nằm ở vô cực của ảnh thực được tạo bởi vật kính. Ảnh này đảo ngược, bởi vì ảnh tạo thành bởi vật kính là ngược. Ảnh ảo này lại trở thành vật của mắt, nó tạo ra ảnh thực cuối cùng trên võng mạc như trong hình vẽ.



Hình 9.9: *Kính hiển vi kép: vật kính tạo ra một ảnh thực phóng đại I_1, ảnh này sau đó lại được phóng đại hơn nữa bởi thị kính.*

Độ phóng đại của kính hiển vi kép đơn giản bằng tích của các độ phóng đại sinh ra bởi 2 thấu kính. Độ phóng đại ngang (M_o) của ảnh thứ nhất là $-d_i/d_o$. Chú ý từ hình vẽ rằng $\mathbf{d_i}$ xấp xỉ bằng **L**. Điều xảy ra là do vật được đặt gần tiêu điểm của vật kính, để đảm bảo rằng ảnh được tạo thành sẽ ở xa vật kính. Hơn nữa, vì vật ở rất gần tiêu điểm của vật kính, $\mathbf{d_o \approx f_o}$.

Điều này cho một độ phóng đại ngang của vật kính

$$M_o = \frac{d_i}{d_o} \approx -\frac{L}{f_o}$$

Độ phóng đại góc của thị kính cho một vật (tương ứng với ảnh ở I_1) đặt ở tiêu điểm được tính từ phương trình rút ra ở phần trên:

$$M_e = \frac{25\text{ cm}}{f_e}$$

Do đó, độ phóng đại tổng cộng của kính hiển vi kép là

Khi cần thiết, giả định một độ dài tiêu chuẩn (L) là 16 cm. Độ dài này được dùng bởi nhiều nhà sản xuất, nhưng chắc chắn không phải tất cả. Một độ dài khác thường được dùng là 18 cm, thí dụ.

$$M = M_o M_e = -\frac{L}{f_o}\left(\frac{25\text{ cm}}{f_e}\right)$$

Dấu trừ cho biết là ảnh đảo ngược so với vật. Cũng như trước, tiêu cự của thấu kính càng ngắn thì độ phóng đại càng lớn. Tất nhiên, độ phóng đại lớn hơn nghĩa là thấu kính dày hơn và do đó quang sai nhiều hơn. Vì lí do này, hầu hết các thấu kính của kính hiển vi là các cấu trúc đa thấu kính phức tạp được thiết kế để giảm tối đa quang sai.

Các vật mờ đục thường được chiếu sáng bởi một nguồn sáng đặt ở phía trên. Nếu các vật được nhìn là trong suốt (như tế bào hoặc mô) thì ánh sáng bình thường đi qua vật từ một nguồn sáng ở dưới đĩa đặt vật kính. Hệ thống chiếu sáng phải được thiết kế cẩn thận để đạt được độ rõ nét và tương phản tối đa. Thông thường, người ta dùng một *cái tụ sáng* (condenser), là một bộ 2 hoặc 3 thấu kính, mặc dù các tụ sáng rẻ tiền có thể là một thấu kính đơn hoặc gương cong. Mục đích của tụ sáng là để tập hợp ánh sáng qua một góc rộng từ nguồn sáng, và để làm cho ánh sáng "tụ" vào một chùm hẹp để chiếu sáng vật với cường độ mạnh và đồng đều. Một số thiết kế khác nhau được sử dụng. Nguồn sáng thường được đặt ở mặt phẳng tiêu của tụ sáng để cho ánh sáng từ mỗi điểm trên nguồn sáng là song song khi nó đi qua vật.

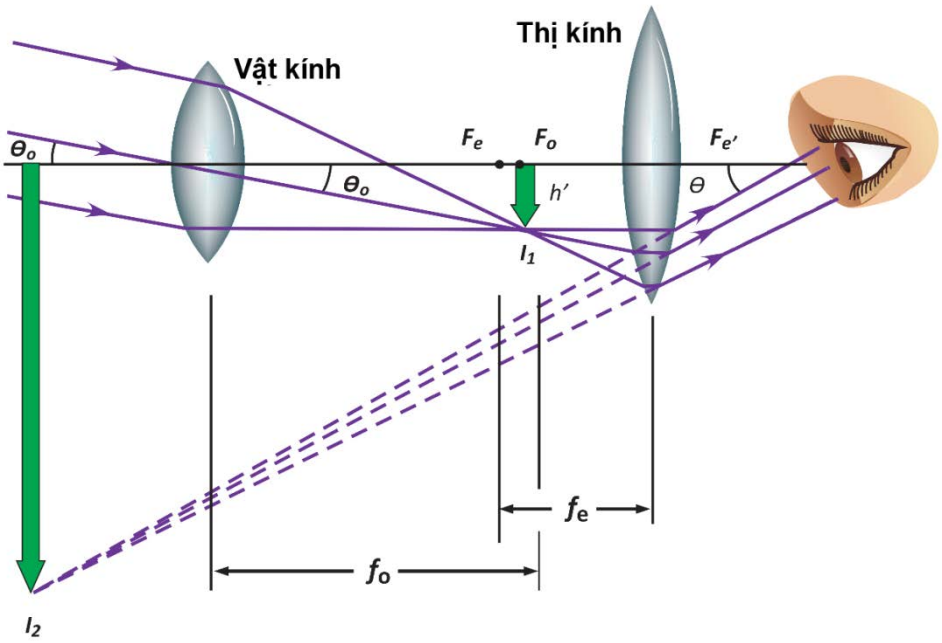
KÍNH THIÊN VĂN

Mặc dù hệ thấu kính tương tự như kính hiển vi nhưng vẫn có những điểm khác bởi vì các dụng cụ được dùng cho các mục đích khác nhau. Trong trường hợp kính hiển vi, các khoảng cách vật rất ngắn. Mặt khác, các kính thiên văn được dùng để phóng đại các vật ở rất xa. Trong hầu hết các trường hợp, vật có thể được coi là ở vô cực.

KÍNH THIÊN VĂN KHÚC XẠ

Kính thiên văn này sử dụng một hệ thấu kính để tạo ảnh. Trong loại kính thiên văn này, vật kính có tiêu cự tương đối dài (0.5 m trở lên) và vật được nhìn ở xa so với tiêu cự này. Kết quả là các tia từ vật đi tới gần như song song và một ảnh thực tạo thành ở tiêu điểm của vật kính. Tuy nhiên, cần chú ý rằng trong trường hợp này ảnh được tạo thành bởi vật kính thì nhỏ hơn kích thước vật lí của vật. Vật kính tạo thành một ảnh thực, đảo ngược của vật ở xa, rất gần (ở trong) tiêu điểm của thị kính. Thị kính có tiêu cự vài cm.

Do đó 2 thấu kính cách nhau bởi tổng các tiêu cự của chúng, nó tương ứng với độ dài của ống kính thiên văn. Thị kính cuối cùng tạo thành (ở I_2) một ảnh phóng đại, cùng chiều của vật nằm ở I_1. **I_2** (được tạo thành ở vô cực) là một **ảnh phóng to, đảo ngược của vật ban đầu**.



Hình 9.10: *Kính thiên văn khúc xạ*

Độ phóng đại của một kính thiên văn như vậy được tính bằng:

$$M = \frac{f_o}{f_e}$$

Dấu trừ một lần nữa cho biết là ảnh đảo ngược. Để đạt được một độ phóng đại lớn thì vật kính cần có tiêu cự dài và thị kính cần có tiêu cự ngắn.

KÍNH THIÊN VĂN PHẢN XẠ

Để kính thiên văn có thể tạo ra các ảnh sáng của các vì sao mờ nhạt thì vật kính phải lớn để cho ánh sáng đi vào càng nhiều càng tốt. Thực vậy, đường kính của vật kính (do đó "khả năng tập trung ánh sáng" của nó) là thông số quan trọng nhất của một kính thiên văn, điều này giải thích tại sao các kính thiên văn lớn nhất (36 inch) được chỉ rõ bằng đường kính của thấu kính.

Tuy nhiên, các kính thiên văn khúc xạ có thấu kính lớn như vậy lại sinh ra một số vấn đề.

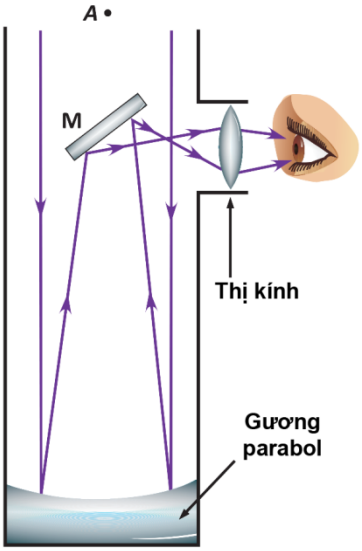
1. Chúng dễ bị sắc sai. Chúng ta đã thấy rằng có thể giảm quang sai này bằng cách dùng một thấu kính vô sắc có tác dụng chỉnh ánh sáng đỏ và lam, hoặc một thấu kính tiêu sắc phức (apochromatic lens) có tác dụng chỉnh màu đỏ, lam, và lục.
2. Việc thiết kế và mài các thấu kính lớn rất khó khăn.
3. Một thấu kính lớn (chỉ có thể được đỡ ở rìa) sẽ võng xuống theo trọng lượng, do đó làm biến dạng ảnh.
4. Chúng dễ bị cầu sai.

Để tránh những vấn đề này, các kính thiên văn lớn nhất là kính thiên văn **phản xạ** sử dụng một gương cong như là vật kính. Các dụng cụ này mặc dù cũng có cầu sai (xem phần dưới), nhưng có một số ưu điểm.

A. Gương chỉ có một mặt cần mài.
B. Tránh được sự võng xuống bởi vì gương được đỡ ở toàn bộ mặt sau.
Các gương rất lớn có thể được uốn cong cục bộ bằng các bộ phận truyền động ở mặt sau để bù trừ biến dạng do khí quyển; điều này được gọi là quang học thích ứng. Các bộ phận truyền động cũng có thể bù trừ biến dạng gương do trọng lực, một quá trình được gọi là quang học chủ động. Quang học thích ứng đã được áp dụng trong các máy khám đáy mắt bằng laser quét đồng tiêu (scanning laser ophthalmoscopes) để chụp ảnh những tế bào quang thụ ở mắt người sống.
C. Không cần vật liệu quang học chất lượng tốt bởi vì ánh sáng không đi qua nó.
D. Vì ánh sáng không đi qua gương nên không có sắc sai.
E. Ảnh cũng sáng hơn. Ở kính thiên văn khúc xạ có một phần ánh sáng tổn thất do phản xạ ở các mặt thấu kính và do hấp thụ.

Các gương được mài theo hình parabol để chống cầu sai.

Sơ đồ kèm theo cho thấy một thiết kế điển hình. Các tia sáng tới đi xuống ống kính của kính thiên văn và bị phản xạ bởi một gương parabol ở đáy. Các tia này hội tụ vào điểm **A** trong hình, nơi ảnh sẽ được tạo thành trên tấm phim hoặc một bộ dò khác. Tuy nhiên, trước khi tạo thành ảnh này, một gương phẳng nhỏ ở điểm **M** phản xạ ánh sáng về phía một lỗ ở thành của ống để đi vào một thị kính.



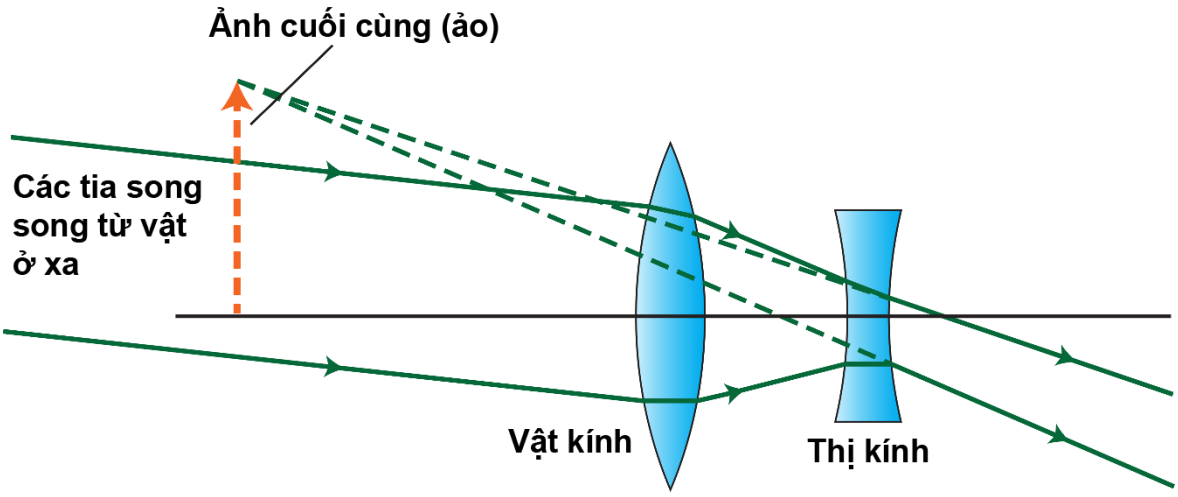
Hình 9.11: *Kính thiên văn phản xạ*

Thiết kế này được gọi là có một tiêu điểm Newton, đặt theo tên của người làm ra nó. (Ngoài ra cũng có các hệ thống khác như kính Cassegrain sử dụng một gương lồi.)

KÍNH ĐỊA VỌNG (TERRESTRIAL TELESCOPE)

Kính địa vọng (dùng để quan sát các vật trên mặt đất), khác với kính thiên văn, phải cho ảnh cùng chiều. Chúng ta sẽ xem xét 2 cách để có được ảnh cùng chiều.

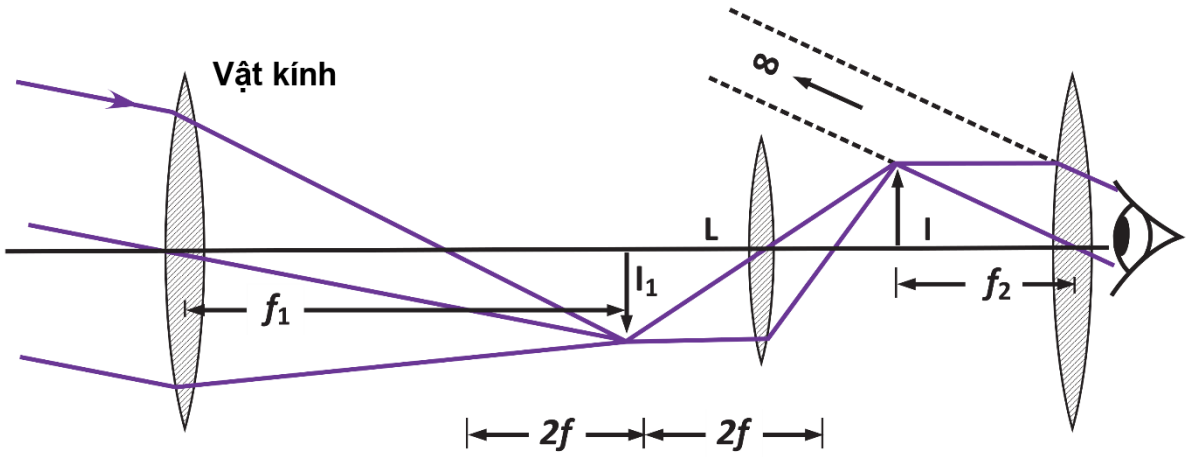
A. Kiểu Galile, được Galileo dùng cho những khám phá thiên văn vĩ đại của mình, có thị kính là một thấu kính phân kì. Nó chặn các tia hội tụ từ vật kính trước khi chúng tới một tiêu điểm, và tác dụng để tạo ra một ảnh ảo cùng chiều.



Hình 9.12: *Kính địa vọng: Kiểu Galile*

Khoảng cách giữa vật kính và thị kính ở kính thiên văn Galile là (fo-fe), nó ngắn hơn nhiều so với ở kính thiên văn lật hình (erecting telescope) được mô tả ở đoạn sau. Do đó, loại kính viễn vọng này tiện lợi cho việc sử dụng ở các sự kiện như xem hát và đua ngựa. Một nhược điểm là dụng cụ này có trường nhìn hạn chế.

B. Một giải pháp khác là đặt một thấu kính hội tụ phụ (L) có tiêu cự f nằm giữa vật kính và thị kính. Thấu kính phụ này được gọi là thấu kính **lật hình** (erecting lens) hoặc thấu kính **đảo ngược** (inverter lens) hoặc thấu kính **trường (**field lens). (Xem hình 9.13 ở dưới). L được đặt ở một khoảng cách 2f trước ảnh thực đảo ngược I_1 tạo thành bởi vật kính. Có thể thấy rằng ảnh I được tạo thành bởi thấu kính L là (i) ảnh ngược, thực, cùng kích thước với I_1 và (ii) cũng ở một khoảng cách 2f đối với L. Chức năng duy nhất của L là đảo ngược ảnh I_1. Do ảnh I tạo ra bởi L có cùng kích thước với I_1, sự có mặt của L không ảnh hưởng đến độ phóng đại góc của kính thiên văn.



Hình 9.13: *Kính địa vọng (loại khác)*

Do đó ảnh I bây giờ cùng chiều với vật ở xa. Nếu I ở tiêu điểm của thị kính (như trong hình vẽ) thì ảnh cuối cùng được tạo thành ở vô cực và cũng cùng chiều.

Tuy nhiên, thấu kính trường này làm giảm cường độ ánh sáng đi ra qua thị kính, vì ánh sáng bị phản xạ ở các bề mặt thấu kính và được hấp thụ bởi vật liệu thấu kính. Ngoài ra, một nhược điểm khác là độ dài của kính thiên văn tăng lên. Khoảng cách từ vật kính tới thị kính bây giờ là ($f_o + f_e + 4f$), so với ($f_o + f_e$) ở kính thiên văn và khoảng cách thậm chí ngắn hơn ở kính thiên văn Galile.