SỰ KHÚC XẠ

TÁC GIẢ

Michael Smith: Đại học công nghệ Cape Peninsula

THẨM ĐỊNH

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

Ts. Vincent Nourrit: Đại học Manchester

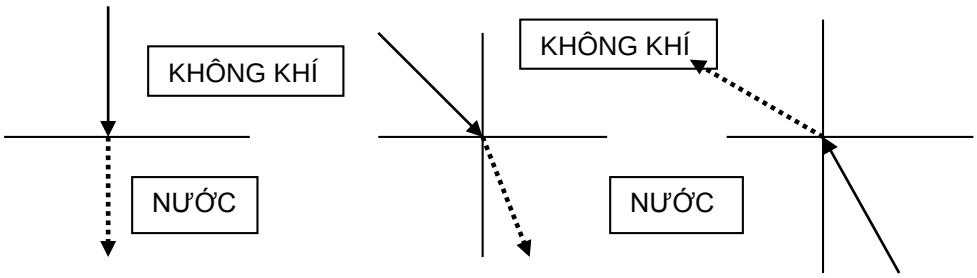
NỘI DUNG CỦA CHƯƠNG

KHÚC XẠ LÀ GÌ? 2
CÁC VẬT LIỆU KHÚC XẠ 2
CHIẾT SUẤT 3
CHIẾT SUẤT THAY ĐỔI THEO BƯỚC SÓNG 4
SỰ KHÚC XẠ Ở CÁC MẶT PHẲNG 4
ĐỘ SÂU THỰC TẾ VÀ ĐỘ SÂU BIỂU KIẾN 5
SỰ PHẢN XẠ TRONG TOÀN PHẦN 6
CÔNG DỤNG CỦA SỰ PHẢN XẠ TRONG TOÀN PHẦN 7
ÁNH SÁNG TRẮNG LÀ ĐA SẮC 8
SỰ TÁN SẮC 9
MÀU SẮC 12
ĐỘ DÀI QUANG TRÌNH ..... **Error! Bookmark not defined.**
SỰ KHÚC XẠ Ở CÁC MẶT CONG 15
ĐỒNG HỒ ĐO ĐỘ CONG II 16

KHÚC XẠ LÀ GÌ?

Khi một tia sáng trong không khí đi tới bề mặt của một môi trường trong suốt như thủy tinh, một phần ánh sáng bị phản xạ, trong khi phần còn lại được truyền qua. Góc tới càng lớn thì lượng ánh sáng bị phản xạ càng nhiều.

Không có môi trường nào là trong suốt hoàn hảo, bao giờ cũng xảy ra hấp thụ một phần ánh sáng trong đó năng lượng được chuyển thành nhiệt. Tác dụng chuyển thành nhiệt này sẽ không được xét đến. Hướng của tia sáng ở trong môi trường khác với hướng của tia tới, trừ trường hợp tia tới đi vuông góc với bề mặt. Tia truyền qua bị lệch khi nó đi qua mặt phân cách giữa một môi trường và một môi trường khác. *Sự đổi hướng này* của tia sáng ở mặt phân cách được gọi là *sự khúc xạ.*



Hình 3.1: *Khúc xạ ở các mặt phân cách không khí/nước và nước/không khí*

Các sơ đồ trên cho thấy một số khía cạnh quan trọng của sự khúc xạ. Khi một chùm sáng đi từ không khí vào nước **theo hướng vuông góc** với mặt phân cách 2 môi trường, nó đi thẳng mà không bị đổi hướng.

Khi tia sáng đi vào trong nước (**môi trường đặc hơn về mặt quang học**) theo bất kì góc nào, nó bị lệch **về phía pháp tuyến**.

Các đường đi có thể đảo ngược; do đó một chùm sáng đi ra khỏi nước để vào không khí (môi trường không khí **ít đặc hơn về mặt quang học**) thì nó bị lệch **ra xa pháp tuyến**. Hiệu ứng này sinh ra hiện tượng độ sâu biểu kiến của các vật.

CÁC VẬT LIỆU KHÚC XẠ

Các vật liệu khúc xạ phổ biến là thủy tinh (cụ thể là thủy tinh quang học chất lượng cao), thạch anh, và nhiều loại plastic. Các vật liệu này được chọn không chỉ do tác dụng của nó đối với hướng của các tia sáng đi qua chúng mà còn do độ trong suốt, tính đồng nhất, và độ bền của chúng đối với sự ăn mòn của khí quyển. Thủy tinh quang học thường được dùng để sản xuất lăng kính và mắt kính. Có 2 loại thủy tinh quang học chính là thủy tinh crao (crown) và thủy tinh flin (flint). Thủy tinh crao là một hợp chất silic oxit (cát, SiO_2) và các muối natri và kali. Ngoài ra, còn có thể có những lượng nhỏ các vật liệu khác như các oxit bari và kẽm. Thủy tinh flin, ngoài các thành phần trên, còn chứa các oxit chì, do đó đặc hơn thủy tinh crao.

Một số vật liệu plastic ngày nay đang được dùng nhiều hơn cho kính mắt, trong đó có vật liệu **nhiệt rắn** (thermosetting) allyl diglycol carbonat, thường gọi là CR-39 (CR là viết tắt của Columbia Resin). Các plastic này lúc đầu là những chuỗi polymer thẳng trở thành liên kết chéo trong khi ép khuôn. Do đó, **chúng không thể ép khuôn lần thứ hai**.

Polyethylen, polystyren, polyvinyl chlorit và polytetrafluoroethylen (PTFE) là các thí dụ **vật liệu nhiệt dẻo** (thermoplastic). Các plastic này không trải qua bất kì biến đổi hóa học nào trong quá trình ép khuôn, do đó **có thể ép khuôn lại** vài lần mà không bị thay đổi tính chất.

CHIẾT SUẤT

Sự khúc xạ xảy ra là do ánh sáng đi với tốc độ khác nhau ở các môi trường khác nhau. Chúng ta đã thấy rằng tốc độ ánh sáng trong chân không (c) bằng 3 x 10^8 mét/giây, là tốc độ tối đa của ánh sáng. (Chúng ta sẽ giả sử rằng ánh sáng đi với cùng tốc độ này trong không khí.)

Trong một môi trường vật chất thì tốc độ ánh sáng (v) thấp hơn. Tỉ số của 2 tốc độ này là chiết *suất* (n) của môi trường.

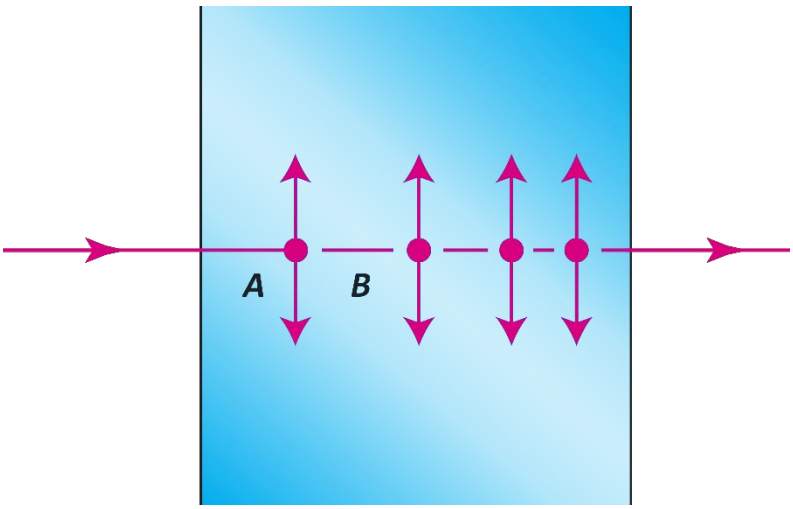
$$n = \frac{c}{v}$$

Do v không bao giờ lớn hơn c nên chiết suất (là một số không thứ nguyên) không bao giờ nhỏ hơn 1. Chiết suất đôi khi được gọi là số đo mật độ quang của vật liệu. Các vật liệu có chiết suất lớn hơn được gọi là *đặc hơn về mặt quang học*. Các phát biểu trước đây về hướng lệch của các tia sáng khi đi vào một môi trường khác giờ đây có thể được phát biểu lại dưới dạng mật độ quang.

Để giải thích cho sự chậm lại của ánh sáng, chúng ta hãy xem xét hình bên dưới minh họa một chùm sáng đi vào một tấm thủy tinh từ phía bên trái. Khi đã ở trong thủy tinh, ánh sáng có thể gặp một electron thuộc một nguyên tử, được biểu thị bằng điểm ***A*** trong hình. Giả định là ánh sáng bị hấp thụ bởi nguyên tử, làm cho electron dao động. Electron dao động lúc này đóng vai trò như một ăng ten và phát ra chùm sáng về phía một nguyên tử ở điểm ***B,*** ở đó ánh sáng lại bị hấp thụ bởi một nguyên tử tại điểm đó.

(Chúng ta không cần xem xét các chi tiết của sự hấp thụ và phát xạ này) Giờ đây, chỉ cần hình dung nó như là một quá trình trong đó ánh sáng đi từ một nguyên tử sang một nguyên tử khác qua tấm kính. (Tình huống này gần giống như một cuộc chạy thi tiếp sức trong đó gậy tiếp sức được truyền giữa những người chạy thi của cùng một đội).

Mặc dù ánh sáng đi từ nguyên tử này sang nguyên tử khác với tốc độ 3 x 10^8 mét/giây nhưng quá trình hấp thụ và phát xạ ánh sáng bởi các nguyên tử lại mất thời gian. Trong thực tế, cần có đủ thời gian để làm chậm tốc độ ánh sáng trong môi trường. Khi ánh sáng lại đi ra không khí thì sự hấp thụ và phát xạ dừng lại và tốc độ của nó trở lại như ban đầu.



Hình 3.2: *Chùm sáng đi vào một tấm thủy tinh*

Tần số của một sóng ánh sáng được quyết định bởi nguồn sáng và **không bị ảnh hưởng bởi môi trường**. Do đó, vì tốc độ giảm trong môi trường nên bước sóng cũng phải giảm.

Trong không khí, ánh sáng có bước sóng $\lambda_{\text{không khí}}$ và di chuyển với tốc độ c. Khi nó đi vào một môi trường mới có chiết suất n thì bước sóng của nó là λ_n và nó di chuyển với tốc độ v. Sử dụng định nghĩa chiết suất, chúng ta có thể rút ra hệ thức:

$$\lambda_n = \frac{\lambda_{\text{không khí}}}{n}$$

Tóm tắt:

	KHÔNG KHÍ	MÔI TRƯỜNG KHÁC
Chiết suất	1	n
Tốc độ ánh sáng	$c = 3 \times 10^8$ mét/giây	$v = \frac{c}{n}$
Tần số	$f_{\text{không khí}} = \frac{C}{\lambda_{\text{không khí}}}$	$f_n = \frac{V}{\lambda_n} = f_{\text{không khí}}$
Năng lượng	$E_{\text{không khí}} = hf_{\text{không khí}}$	$E_n = E_{\text{không khí}}$
Bước sóng	$\lambda_{\text{không khí}}$	$\lambda_n = \frac{\lambda_{\text{không khí}}}{n}$

Bảng 3.1: *Tóm tắt các thông số có thay đổi và không thay đổi khi thay đổi môi trường*

CHIẾT SUẤT THAY ĐỔI THEO BƯỚC SÓNG

Như đã thấy ở Chương 1, chiết suất thay đổi theo bước sóng ánh sáng (khoảng 1 đến 2% của dải ánh sáng nhìn thấy). Dải chiết suất ở thủy tinh có thể thấy trong bảng 3.2

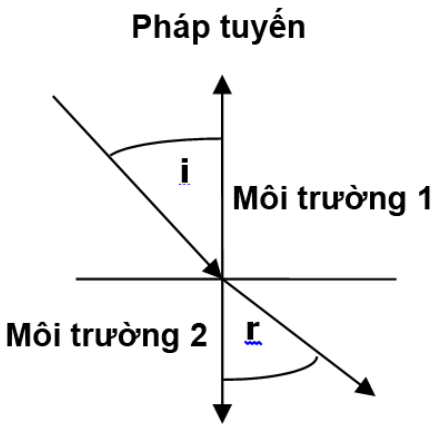
Màu	Bước sóng (nm)	n
Đỏ	660	1.520
Da cam	610	1.522
Vàng	580	1.523
Lục	550	1.526
Lam	470	1.531
Tím	410	1.538

Bảng 3.2: *Chiết suất của kính thủy tinh crao thay đổi theo bước sóng ánh sáng*

SỰ KHÚC XẠ Ở CÁC MẶT PHẲNG

Hình dưới đây cho thấy một tia sáng tới bị khúc xạ ở mặt phẳng ranh giới giữa 2 môi trường là không khí và thủy tinh. **i** là góc tới và **r** là góc khúc xạ. Chú ý rằng cả 2 góc đều được đo giữa pháp tuyến và tia phù hợp (tia tới hoặc tia khúc xạ).

Như đã đề cập ở phần đầu của chương này, cũng có một tia phản xạ mờ nhạt, nó trở thành rõ hơn khi i tăng.



Việc đo trên thực nghiệm sự khúc xạ ở một mặt phẳng đã được thực hiện từ thế kỉ thứ 2 sau công nguyên bởi Ptolemy và những người khác, nhưng không tìm ra được mối tương quan giữa góc tới và góc khúc xạ. Định luật 1 dưới đây được nêu ra ở thế kỉ 10 (Ibn Sahl), mãi tới năm 1621 Willebrord Snell, một giáo sư toán học ở Đại học Leiden, cuối cùng đã tìm ra hệ thức giữa góc khúc xạ và góc tới của các cặp môi trường khác nhau. Tuy nhiên, công trình của Snell đã không được xuất bản trong thời kì của ông. Các định luật này được công bố đầu tiên (1637) bởi René Descartes, người đã tìm ra chúng một cách độc lập. Nó được đưa ra ở dưới đây như là định luật 2.

Các định luật khúc xạ có thể được phát biểu như sau:

Định luật 1: Tia tới và tia khúc xạ nằm ở một mặt phẳng vuông góc với mặt khúc xạ tại điểm khúc xạ.

Định luật 2 (định luật Snell hoặc định luật Snell-Descartes): tỉ số giữa sin của góc tới và sin của góc khúc xạ bằng tỉ số đối nghịch của các chiết suất.

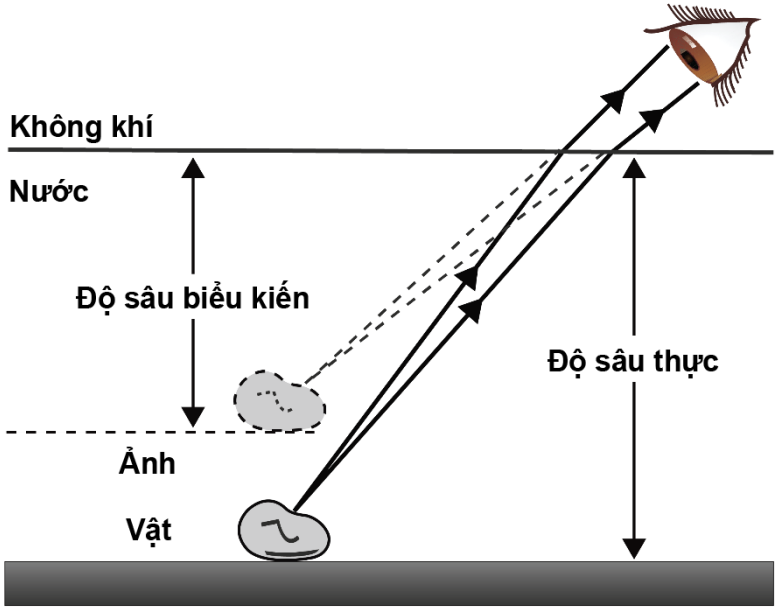
$$n_1 \sin i = n_2 \sin r$$

n_1 là môi trường chứa tia tới và n_2 là môi trường chứa tia khúc xạ.

Biểu thức này chỉ áp dụng cho các môi trường đẳng hướng (môi trường trong đó các đặc tính quang học không thay đổi ở các hướng khác nhau ở suốt môi trường) và cho ánh sáng chỉ có một màu (ánh sáng đơn sắc).

ĐỘ SÂU THỰC TẾ VÀ ĐỘ SÂU BIỂU KIẾN

Chúng ta thường thấy các hiệu ứng khúc xạ khi quan sát ánh sáng đến từ các vật sau khi đi qua một li nước hoặc khi quan sát các vật có một phần ngập trong nước. Hình kèm theo cho thấy quang hệ của mắt có thể bị đánh lừa bởi các hiệu ứng khúc xạ. Thực vậy, con cá ở dưới nước không nằm ở nơi mắt ta nhìn thấy. Hình vẽ cho thấy nón sáng đi từ một điểm ở trên con cá cuối cùng đi vào mắt. Nó lệch ra xa pháp tuyến ở bề mặt và mắt nhìn thấy như là phân kì từ một điểm lệch về bên phải và không sâu như điểm thực. Chúng ta nói rằng mắt nhìn thấy ảnh của con cá. Cũng như trong trường hợp gương, ánh sáng không thực sự phân kì từ điểm mà mắt ta nhìn thấy.



Hình 3.3: *Độ sâu thực tế và độ sâu biểu kiến*

Độ sâu nhận thấy được gọi là độ sâu biểu kiến (**h'**) và độ sâu thực tế (**h**) được gọi là độ sâu thực. Các khoảng cách này liên quan với nhau theo hệ thức:

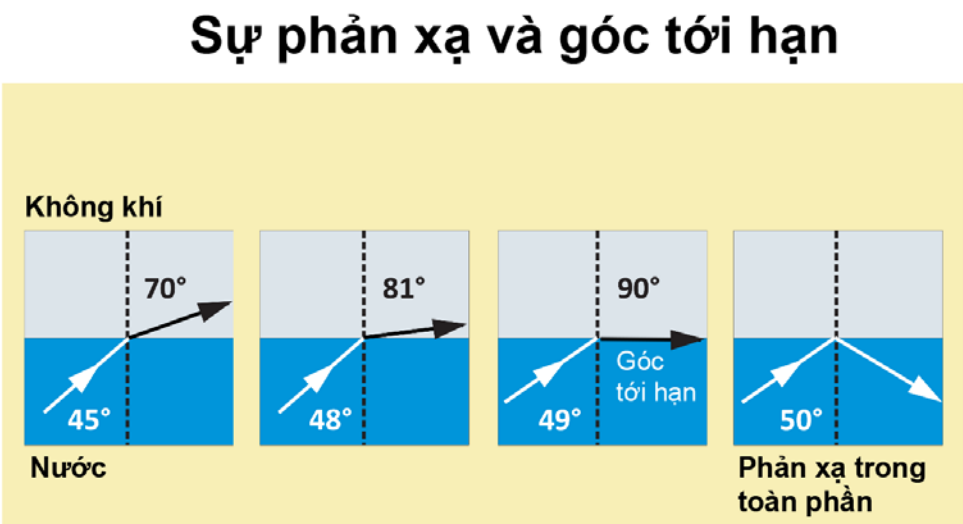
$$h = nh'$$

Ảnh do đó phải lệch một khoảng cách (**h-h'**) so với vật. Từ hệ thức trên, có thể rút ra kết luận rằng tỉ số giữa độ sâu thực và độ sâu biểu kiến bằng chiết suất của môi trường:

$$n = h/h'$$

SỰ PHẢN XẠ TRONG TOÀN PHẦN

Khi ánh sáng bắt nguồn từ một môi trường quang học đặc hơn, góc khúc xạ sẽ lớn hơn góc tới. Điều này gây ra một hiện tượng rất thú vị và hữu ích. Hãy xem xét các tia ở hình 3.4. Có thể thấy rằng các tia tới bề mặt với góc tới càng lớn dần sẽ bị khúc xạ càng nhiều đến khi tia khúc xạ hầu như lướt qua bề mặt nước. Điều này phù hợp với định luật Snell. Ở một góc tới nào đó, góc khúc xạ sẽ là 90°. Góc tới làm xảy ra hiện tượng này được gọi là **góc tới hạn** (critical angle) (θ_c).



Hình 3.4: *Các tia ở mặt phân cách nước/không khí có góc tới khác nhau.*

Chú ý rằng hiện tượng này chỉ xảy ra khi ánh sáng di chuyển từ một môi trường đặc hơn về mặt quang học sang một môi trường kém đặc hơn.

Điều gì xảy ra nếu ánh sáng đi tới một ranh giới với một góc lớn hơn góc tới hạn? Câu trả lời là ánh sáng bị phản xạ hoàn toàn ở mặt phân cách, vẫn ở trong vật liệu ban đầu, và không có phần nào được truyền qua. Hiện tượng này được gọi là **sự phản xạ trong toàn phần.** Như đã nói ở trên, một phần ánh sáng bị phản xạ ở mỗi ranh giới giữa các môi trường. Đối với những góc tới nhỏ, đây chỉ là một tỉ lệ nhỏ. Khi góc tới càng lớn thì tỉ lệ ánh sáng tới phản xạ càng nhiều. Vượt quá góc tới hạn thì 100% ánh sáng tới bị phản xạ.

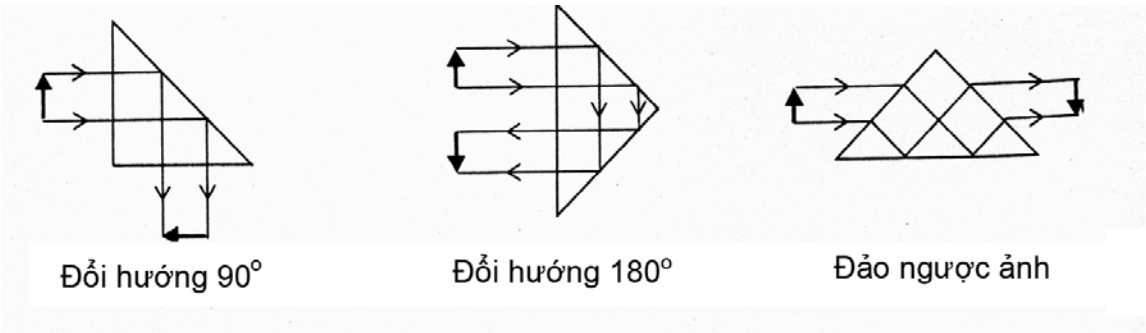
Do sự phản xạ trong toàn phần nên khi ở dưới nước người ta chỉ thấy phản xạ ở dưới mặt nước khi nhìn theo một hướng lớn hơn góc tới hạn.

CÔNG DỤNG CỦA SỰ PHẢN XẠ TRONG TOÀN PHẦN

Độ nét và độ sáng của một chùm sáng được duy trì tốt hơn bởi sự phản xạ trong toàn phần so với phản xạ từ một gương bình thường. Do đó, nhiều dụng cụ quang học, như ống nhòm, thường sử dụng phản xạ trong toàn phần mỗi khi cần thay đổi hướng ánh sáng.

Ưu điểm là gần như 100% ánh sáng bị phản xạ, trong khi ngay cả những gương tốt nhất cũng chỉ phản xạ dưới 100%. Do đó ảnh sáng hơn. Đối với thủy tinh có n = 1.50, góc tới hạn là 41.8°. Do đó, các lăng kính 45° sẽ phản xạ trong toàn bộ ánh sáng.

Như minh họa dưới đây, lăng kính phản xạ toàn phần còn được sử dụng cho các mục đích khác:



Hình 3.5: *Sự đổi hướng và sự đảo hướng ở các lăng kính phản xạ toàn phần*

Phản xạ trong toàn phần là nguyên lí của **cáp quang.** Ngày nay, các sợi thủy tinh và plastic có thể được làm với đường kính nhỏ chỉ vài micro mét. Một bó các sợi nhỏ như vậy được gọi là **ống quang**, và ánh sáng có thể được truyền qua ống quang mà hầu như không bị tổn thất do phản xạ trong toàn phần. Dù ống quang bị uốn theo hình dạng phức tạp đến đâu thì cũng không bị vượt quá góc tới hạn, do đó ánh sáng được truyền tới đầu kia mà hầu như không bị suy giảm.

Ống quang có thể dùng để chiếu sáng các vị trí khó tiếp cận, như bên trong cơ thể người hoặc để truyền các cuộc gọi điện thoại và các tín hiệu thông tin khác (90% trao đổi thông tin đường dài là qua cáp quang); tín hiệu là một chùm sáng điều biến (chùm sáng có cường độ khác nhau) và được truyền với độ suy giảm ít hơn tín hiệu điện trong một sợi đồng. Một ứng dụng tinh vi của cáp quang, đặc biệt trong y học, là để truyền hình ảnh rõ nét.

Thí dụ, có thể khám dạ dày của một bệnh nhân bằng cách luồn một ống quang qua miệng. Ánh sáng được truyền xuống một nhóm sợi để chiếu sáng dạ dày. Ánh sáng phản xạ quay trở lại một nhóm sợi khác. Ánh sáng trực tiếp trước mỗi sợi truyền đi theo sợi đó. Ở đầu đối diện, người quan sát thấy một loạt các chấm sáng và tối, giống như ở màn hình TV; tức là hình ảnh ở đầu bên kia. Các sợi phải cách li với nhau về mặt quang học, thường bằng một lớp mỏng vật liệu có chiết suất thấp hơn chiết suất của sợi. Các sợi phải được sắp xếp song song với nhau một cách chính xác để hình ảnh được rõ ràng. Càng có nhiều sợi và các sợi càng nhỏ thì hình ảnh càng chi tiết. Đèn nội soi này hữu ích để quan sát dạ dày hoặc các vị trí khó tiếp cận khác để phẫu thuật hoặc tìm những tổn thương mà không phải phẫu thuật.

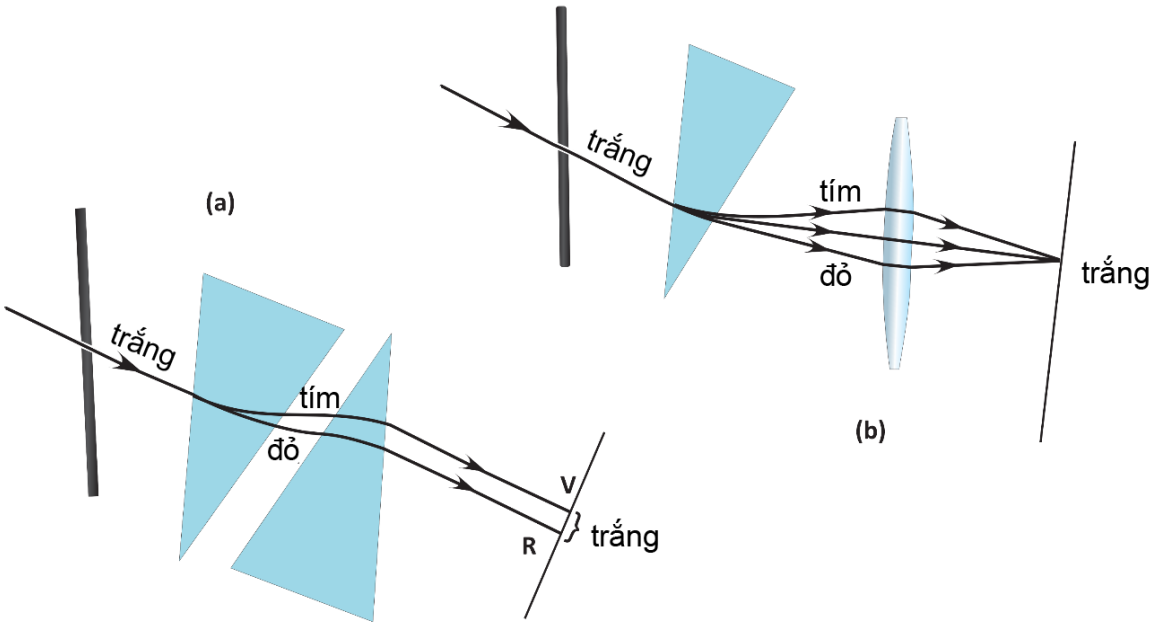
ÁNH SÁNG TRẮNG LÀ ĐA SẮC

Ánh sáng trắng bình thường, như ánh sáng từ mặt trời, thực tế là đa sắc: nó gồm một số màu/bước sóng. Ý niệm này về bản chất phức hợp của ánh sáng trắng lần đầu tiên được chứng minh bởi nhà thiên văn học người Đức là Kepler. Nó được nghiên cứu kĩ hơn bởi Isaac Newton trong một loạt các thí nghiệm được mô tả dưới đây.

Trong thí nghiệm thứ nhất của Newton, ánh sáng mặt trời, đi vào căn phòng qua một lỗ nhỏ ở một cửa sổ chớp, được cho chiếu vào một lăng kính thủy tinh hình tam giác. Ánh sáng khúc xạ được thấy ở bức tường đối diện. Một dải ánh sáng màu được thấy thay vì ánh sáng tới màu trắng.

Quang phổ thu được chứa tất cả các màu sắc của cầu vồng. Ngoài ra, các màu cũng theo trật tự như ở cầu vồng. Tuy nhiên, cần chú ý rằng các màu có nhiều phần chồng nhau và sự bố trí các màu như đỏ, da cam, vàng, lục, lam, chàm và tím không thể tách biệt rõ ràng.

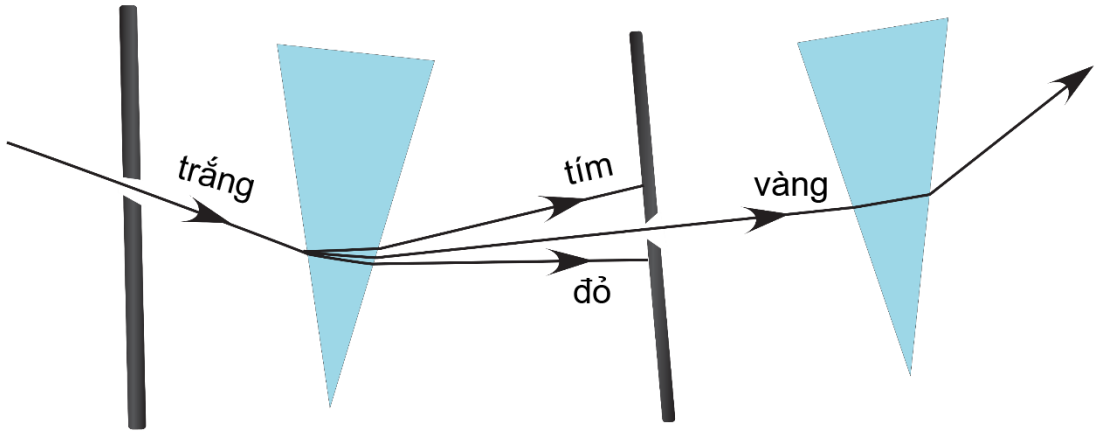
Newton kết luận rằng ánh sáng mặt trời màu trắng thực tế có bản chất phức hợp gồm các màu khác nhau. Để kiểm tra kết luận của mình về bản chất phức hợp của ánh sáng trắng, Newton đã thử tái hợp ánh sáng màu bằng cách để nó chiếu vào một lăng kính thứ 2 (a) giống hệt lăng kính thứ nhất (nhưng đảo ngược) hoặc một thấu kính hội tụ (b) (Hình 3.6).



Hình 3.6: *Thí nghiệm tái hợp màu của Newton*

Trong mỗi trường hợp này, ánh sáng đã được tái hợp thành ánh sáng trắng, tương tự ánh sáng mặt trời ban đầu. Điều này khẳng định rằng ánh sáng trắng thực ra là đa sắc.

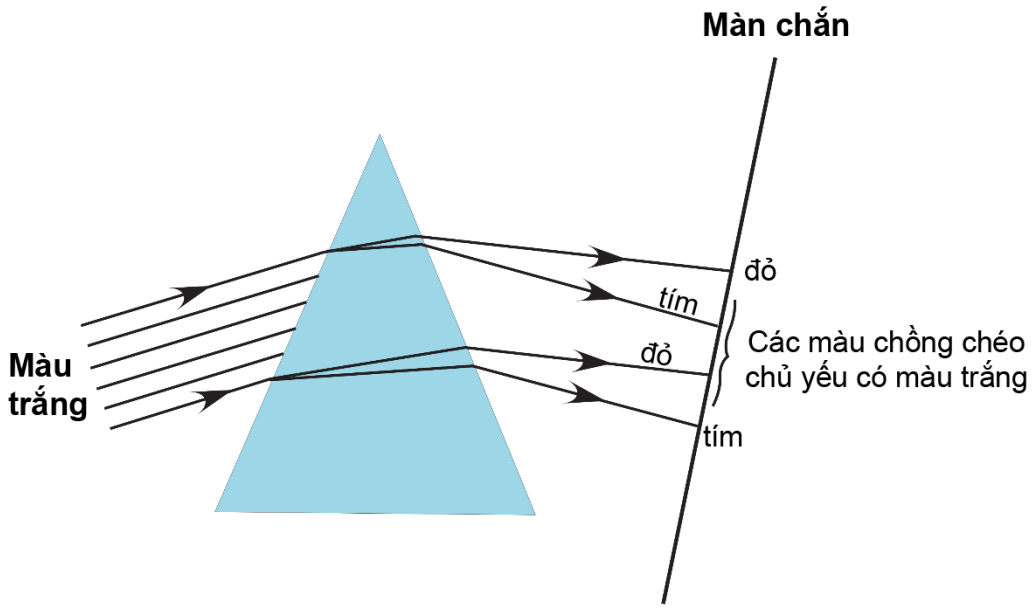
Sau đó, Newton bố trí để cho mỗi màu của quang phổ lần lượt đi qua một lăng kính thứ 2, bằng cách đặt một khe ở vị trí thích hợp (Hình 3.7).



Hình 3.7: *Thí nghiệm tách màu của Newton*

Ngoài việc đo định lượng độ lệch của các màu riêng rẽ, ông đã cho thấy rằng lăng kính thứ 2 không gây ra tán sắc thêm. Newton kết luận rằng các ánh sáng màu được chứa ở trong ánh sáng trắng gốc chứ không phải là lăng kính tạo ra các màu. Chúng xuất hiện bởi vì có độ lệch khác nhau khi đi qua lăng kính.

Hình 3.8 dưới đây cho thấy sự tách màu không hoàn hảo mà Newton đã đạt được.



Hình 3.8: *Sự tách màu không hoàn hảo*

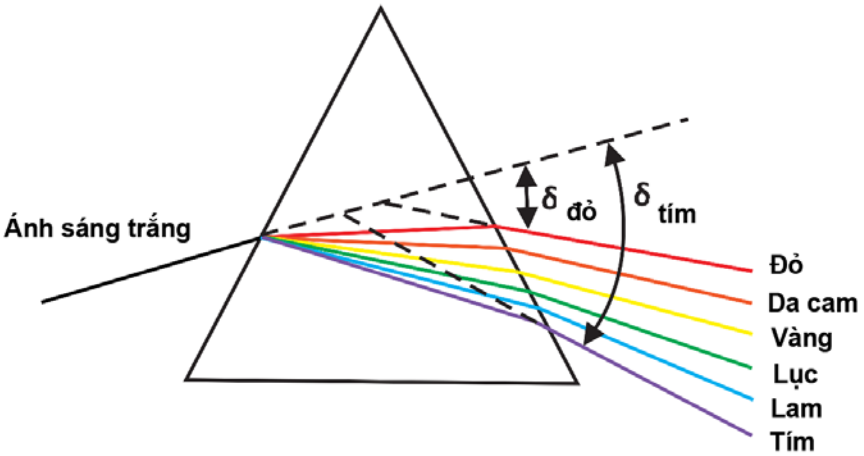
Chỉ có chùm tia ló màu đỏ và chùm tia ló màu tím từ các tia ở rìa của chùm tia tới được vẽ ra, và có thể thấy rằng sẽ có chồng chéo đáng kể các ảnh màu khác nhau trên màn chắn. Phổ của các màu chồng chéo này được gọi là **phổ không thuần** (impure spectrum) bởi ảnh hưởng màu chỉ có ở gần các rìa. Hầu hết phổ Newton là không thuần.

SỰ TÁN SẮC (DISPERSION)

Sự tách ánh sáng trắng thành các thành phần màu khác nhau là một hiệu ứng được gọi là **tán sắc**. Hiện tượng này là do các màu khác nhau đi với tốc độ khác nhau trong một môi trường trong suốt như là thủy tinh. (Tốc độ ánh sáng

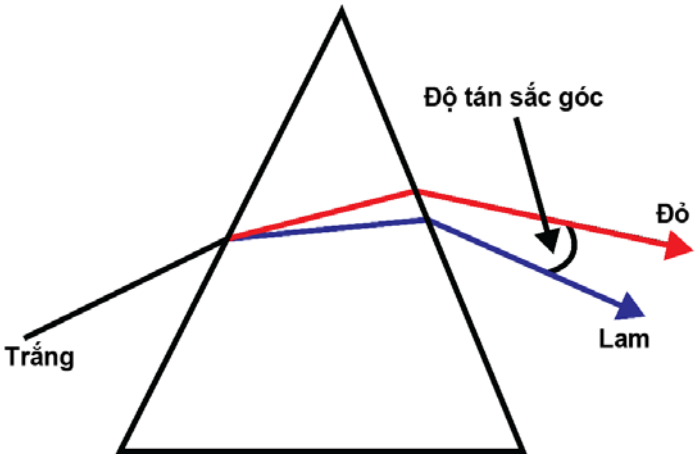
trong không khí hầu như độc lập với màu sắc). Thí dụ, ánh sáng màu lam đi trong thủy tinh chậm hơn so với ánh sáng màu đỏ. Do đó, ánh sáng màu lam có chiết suất cao hơn và bị khúc xạ nhiều hơn ánh sáng màu đỏ. (Hình ảnh này được minh họa rất quen thuộc ở bìa album "Dark Side of the Moon" của ban nhạc Pink Floyd).

Chúng ta đã thấy rằng sự tán sắc xảy ra ở một môi trường trong suốt bởi vì chiết suất của môi trường thay đổi theo màu sắc của ánh sáng. Điều này dựa theo định luật Snell, bởi vì n là một hàm của bước sóng. Do đó, ánh sáng có các bước sóng khác nhau sẽ bị bẻ cong ở các góc khác nhau. Các nhà sản xuất thủy tinh quang học, nơi sản xuất thấu kính và lăng kính, cung cấp số liệu về đặc tính tán sắc của các vật liệu này. Các thấu kính đơn và, tất nhiên, các lăng kính đơn đều có tán sắc, và có thể tạo ra các lăng kính ghép trong đó hiệu ứng tán sắc là không đáng kể.
Một tia sáng đơn đi tới một lăng kính bị lệch khỏi hướng đi ban đầu một góc δ (được gọi là góc lệch) khi ra khỏi lăng kính. Độ lệch của mỗi màu cụ thể được biểu thị bằng góc giữa tia không lệch và tia của màu đó khi ra khỏi lăng kính. Newton đã cho thấy rằng mỗi màu có một góc lệch cụ thể, góc lệch lớn nhất là của ánh sáng tím và nhỏ nhất là của ánh sáng đỏ.



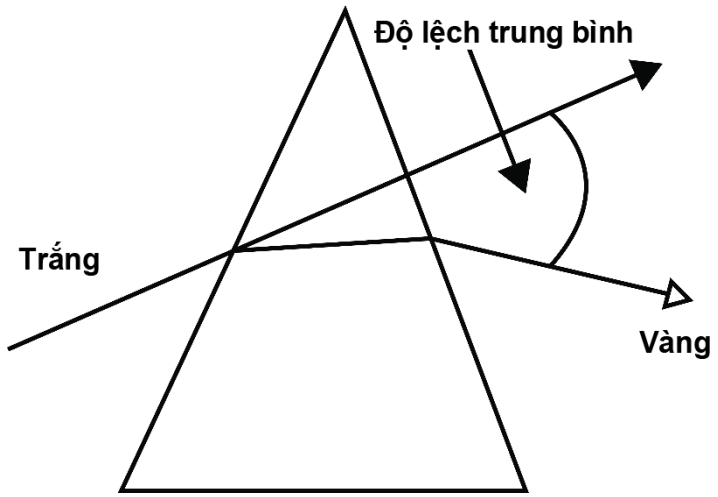
Hình 3.9: *Góc lệch của mỗi màu*

Trong hình tiếp theo, một tia sáng trắng đi tới một mặt của một lăng kính hình tam giác. Góc giữa tia màu đỏ và tia màu lam ló ra từ lăng kính được gọi là **độ tán sắc góc** (*hoặc* đôi khi đơn giản gọi là **độ tán sắc**) của lăng kính. Nó được biểu thị bằng kí hiệu α.



Hình 3.10: *Độ tán sắc góc*

Do sự thuận tiện, người ta cũng xem xét độ lệch của ánh sáng màu vàng, ánh sáng này ở gần phần giữa của quang phổ. Vì lí do này, tia sáng màu vàng được gọi là **tia trung bình** (mean ray), và độ lệch của nó được gọi là **độ lệch trung bình**.



Hình 3.11: *Độ lệch trung bình ở một thấu kính*

Để định nghĩa chính xác đặc tính tán sắc của các vật liệu quang học, người ta sử dụng 3 màu đặc trưng của ánh sáng đã được xác định chính xác. Đó là:

(a) Ở vùng màu đỏ của quang phổ: bước sóng ánh sáng đỏ đặc trưng ở phổ của đèn hơi cadmi (được gọi là vạch C) có bước sóng 643.8 nm.

(b) Ở vùng màu vàng của quang phổ: bước sóng ánh sáng vàng đặc trưng ở phổ của đèn heli (được gọi là vạch d) có bước sóng 587.6 nm.

(c) Ở vùng màu lam của quang phổ: bước sóng ánh sáng màu lam đặc trưng ở phổ của đèn hơi cadmi (được gọi là vạch F) có bước sóng 480.0 nm.

Chiết suất của các chất cho 3 màu chính xác này được kí hiệu lần lượt là n_C, n_d, và n_F. Đặc biệt, n_d được gọi là **chiết suất trung bình** của một chất, và là giá trị được hiểu bằng thuật ngữ chiết suất, trừ khi nói khác.

Góc tán sắc (hay **độ tán sắc góc**) α là góc giữa hướng của tia C (đỏ) và tia F (lam) ở chùm tia ló. Giá trị α (phụ thuộc vào góc tới của ánh sáng đa sắc) là một số đo hiệu ứng màu của lăng kính. Nó thường được gọi là **sắc sai** của lăng kính.

Năng suất tán sắc (ω) của một chất khúc xạ là tỉ số của góc tán sắc trên độ lệch của tia trung bình (d), tức là:

$$\text{năng suất tán sắc } \omega = \frac{\text{góc tán sắc}}{\text{độ lệch trung bình}}$$

Nếu xét một lăng kính vật liệu có góc nhỏ (mỏng), có thể suy ra hệ thức giữa năng suất tán sắc của vật liệu và các chiết suất của 3 bước sóng tiêu chuẩn.

SUY DIỄN DƯỚI ĐÂY KHÔNG PHẢI CHO MỤC ĐÍCH KIỂM TRA.

Nhớ lại rằng độ lệch của một tia sáng cụ thể, bởi một lăng kính có góc nhỏ ở trong không khí, được tính bằng:

$$d = (n-1)a$$

trong đó n là chiết suất của lăng kính, a là góc đỉnh, và d là độ lệch, nó không phụ thuộc vào góc tới nếu góc tới nhỏ (dưới 10°).

Do đó, đối với tia F (màu lam), độ lệch là

$d_F = (n_F - 1)a$

và đối với tia C (màu đỏ), độ lệch là

$d_C = (n_C - 1)a$

Vì α là góc giữa 2 tia này ở chùm tia ló, α được tính bằng

$\alpha = d_F - d_C = (n_F - 1)a - (n_C - 1)a = (n_F - n_C)a$

Bây giờ, độ lệch của tia trung bình là

$d_d = (n_d - 1)a.$

Từ định nghĩa ω, chúng ta có

$$\omega = \frac{\text{góc tán sắc}}{\text{độ lệch trung bình}} = \frac{\alpha}{d_d} = \frac{(n_F - n_C)a}{(n_d - 1)a}$$

Loại bỏ số hạng a ở phương trình trên, chúng ta được

$$\omega = \frac{(n_F - n_C)}{(n_d - 1)}$$

Thường được dùng hơn trong ngành công nghiệp quang học là nghịch đảo của năng suất tán sắc, được gọi là *độ giảm sắc sai* (*constringence)* của một chất, kí hiệu bằng chữ **V**.

Độ giảm sắc sai (**V**) được tính bằng:

$$V = \frac{1}{\omega}$$

Do đó, chúng ta có thể viết biểu thức:

$$V = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}$$

Theo phương trình trên, môi trường tán sắc càng nhiều thì độ giảm sắc sai càng nhỏ. Độ giảm sắc sai trong quang học thường được gọi là số V hoặc số Abbe.

Đối với các vật liệu tán sắc thấp thì $V \geq 45$; đối với các vật liệu tán sắc trung bình thì $39 \leq V < 45$ và đối với các vật liệu tán sắc cao thì $V < 39$.

Thủy tinh crao thường và các vật liệu plastic như CR-39 có các giá trị V ở trong vùng 59. Kinh nghiệm đã cho thấy rằng các vật liệu tán sắc thấp này hầu như không bao giờ gây ra những phàn nàn về các vân màu hoặc mờ do tia sáng ngoài trục (off-axis blur). Ngược lại, đối với kính thủy tinh flin tán sắc, độ giảm sắc sai sẽ thấp hơn nhiều, ở khoảng 30.

MÀU SẮC

Màu sắc có **tính chủ quan**, nghĩa là các màu mà chúng ta nhìn thấy là những đặc tính của hình ảnh trong đầu óc, và chúng hoàn toàn khác về bản chất so với các tia sáng vật lí hội tụ ở võng mạc của mắt. Vì lí do này, chúng ta chỉ cần xem xét nhận thức màu của một người sắc giác bình thường đối với nhận thức màu của một người bị tổn hại sắc giác. Trong trường hợp thứ hai, bệnh nhân có thể không phân biệt được màu đỏ và màu lục, và 2 màu này không thể có biểu hiện đối với bệnh nhân giống như đối với ở người bình thường.

Người ta cũng thường nhận thấy rằng màu sắc của một vật phụ thuộc vào bản chất của ánh sáng được dùng để chiếu sáng nó, và vào bản chất của bề mặt và môi trường xung quanh nó, cũng như phụ thuộc vào người quan sát.

SỰ TRUYỀN ÁNH SÁNG CHỌN LỌC

Một vật biểu hiện có một màu nhất định là do ánh sáng phản xạ từ nó, và liên quan đến quá trình gọi là **truyền ánh sáng chọn lọc**. Phần lớn màu sắc của thiên nhiên có nguồn gốc từ đặc tính đa sắc của ánh sáng trắng. Nếu bớt đi một số thành phần của ánh sáng trắng tới thì phần còn lại bị phản xạ sẽ có màu. Bởi vậy, nếu chúng ta quan sát một tờ giấy màu lam ở ánh sáng trắng thì tờ giấy phản xạ rất tốt ánh sáng màu lam, nhưng hấp thụ tất cả các màu khác. Một tỉ lệ nhỏ các màu tiếp giáp với màu lam theo trật tự quang phổ, đó là màu lục và màu tím, cũng sẽ bị phản xạ, nhưng màu phản xạ chủ đạo là màu lam. Do đó bề mặt có màu lam, mặc dù màu thực tế bắt nguồn từ ánh sáng tới có màu trắng.

Nếu tờ giấy màu lam được quan sát ở ánh sáng màu vàng của đèn natri, nó sẽ có màu nâu sẫm, bởi vì không có ánh sáng màu lam phát ra từ đèn natri. Tờ giấy màu lam chỉ có thể có màu lam nếu bản thân ánh sáng rọi vào nó có một thành phần ánh sáng màu lam.

Do đó, khi một bề mặt có màu được quan sát ở ánh sáng nhân tạo có màu thì biểu hiện của bề mặt sẽ thay đổi. Hiệu ứng này được gọi là **sự biến dạng màu** (colour distortion). Sự biến dạng màu hiện nay được thấy ở nhiều loại chiếu sáng trong nhà và ngoài trời. Một số bóng đèn huỳnh quang (phát ra ánh sáng có màu trắng) làm nổi bật các vật màu lam hơn các vật màu đỏ do sự phát xạ một lượng lớn bất cân đối ánh sáng màu lam.

MÀU CHÍNH, MÀU PHỤ & MÀU BỔ SUNG

Chúng ta đã thấy rằng ánh sáng trắng bao gồm tất cả các màu của phổ nhìn thấy. Do đó, nếu chiếu tất cả các màu của ánh sáng nhìn thấy lên một màn chắn, chúng ta sẽ nhận thấy nó là ánh sáng trắng. Để thuận tiện, chúng ta có thể chia phổ nhìn thấy thành 3 vùng: đỏ, lục và lam. Để nhận biết ánh sáng trắng, chúng ta không cần thấy tất cả bước các sóng trong khoảng 400 đến 700 nm mà chỉ cần có ánh sáng từ 3 vùng này của quang phổ. Phân bố các màu dưới dạng bước sóng được cho ở bảng dưới đây. Số bước sóng này càng có nhiều thì bức xạ càng có biểu hiện của ánh sáng trắng.

Người ta đã thấy 6 dải chính. (Màu chàm bị loại ra bởi vì nó gây ra đáp ứng thị giác thấp. Các thang độ bao gồm màu chàm liệt kê bước sóng tương đối là 446 tới 464 nm.)

MÀU	BƯỚC SÓNG (nm)
Đỏ	700 - 635
Cam	635 - 590
Vàng	590 - 560
Lục	560 - 490
Lam	490 - 450
Tím	450 - 400

Bảng 3.3: *6 dải ánh sáng màu chính*

Khi cộng các lượng khác nhau của màu đỏ, màu lục và màu lam (các màu mà 3 loại tế bào nón ở mắt chúng ta cảm thụ được), **chúng ta có thể tạo ra bất kì màu nào của quang phổ**. Vì lí do này, màu đỏ, màu lục và màu lam được gọi là **các màu chính cộng**. Các màu này không thể được tạo ra khi kết hợp bất cứ màu nào khác.

Đây là cách tạo ra các màu khác nhau cho nhà hát hoặc cho màn hình TV. Kết quả từ 3 nguồn (đỏ, lục và lam) được phối hợp theo các tỉ lệ khác nhau để tạo ra tất cả các màu cần thiết.

Chú ý rằng đây không phải là hệ thống màu chính duy nhất có thể. Thí dụ, một hệ thống khác là màu đỏ, màu vàng và màu lam. Hệ thống màu RGB (đỏ, lục, lam) tái tạo tốt nhất các màu nhìn thấy khác cho hầu hết các mục đích thực tế, do đó được chuộng hơn.

Khi 2 màu chính này được pha trộn với mật độ bằng nhau thì chúng tạo ra các **màu phụ**:

Màu đỏ và màu lam tạo ra màu cánh sen (Magenta).

Màu đỏ và màu lục tạo ra màu vàng.

Màu lục và màu lam tạo ra màu ngọc lam (Cyan).

Bất kì 2 màu nào của ánh sáng khi pha trộn với nhau với mật độ bằng nhau tạo ra màu trắng đều được gọi là **các màu bổ sung** của nhau. Màu bổ sung của ánh sáng màu đỏ là ánh sáng màu ngọc lam. Điều này hợp lí bởi vì ánh sáng màu ngọc lam là sự kết hợp của ánh sáng màu lam và ánh sáng màu lục; và ánh sáng màu lam và ánh sáng màu lục khi được thêm vào ánh sáng màu đỏ thì sẽ tạo ra ánh sáng trắng. Do đó, ánh sáng màu đỏ và màu ngọc lam (màu lam + màu lục) là một cặp màu bổ sung; chúng cộng vào nhau để tạo ra ánh sáng trắng. Điều này được minh họa ở phương trình dưới đây:

Đỏ + Ngọc lam = Đỏ + (Lam + Lục) = Trắng

Với lập luận trên, mỗi màu chính có một màu phụ là màu bổ sung của nó:

Màu đỏ và màu ngọc lam

Màu lục và màu cánh sen

Màu lam và màu vàng

CÁC CHẤT MÀU, HỘI HỌA VÀ IN ẤN

Đối với in ấn và hội họa, sự pha trộn các màu khác với cách mà chúng ta đã đề cập ở trên, bởi vì pha trộn các ánh sáng màu dẫn đến cộng thêm, trong khi đó các chất màu được dùng trong hội họa và in ấn sẽ **hấp thụ** một số bước sóng nhất định và gây ra **pha trộn trừ** (subtractive mixing). Mỗi màu trong một hỗn hợp sẽ hấp thụ các bước sóng của chính nó. Do đó, các chất màu pha trộn sẽ cho một kết quả khác so với ánh sáng màu pha trộn.

Thí dụ, nếu pha trộn sơn màu đỏ, màu lục và màu lam thì kết quả sẽ không phải là màu trắng mà là màu nâu sẫm! Bởi vì ánh sáng ở cả 3 vùng của quang phổ đều bị hấp thụ; và không chút nào bị phản xạ. Nếu sự hấp thụ hoàn toàn thì nó sẽ là màu đen. Hấp thụ dưới 100% sẽ cho màu nâu sẫm.

Màu đỏ, màu vàng và màu lam là một hệ thống các màu chính trừ (subtractive primary colours) có tính lịch sử. Nó ban đầu được dùng trong mĩ thuật và in ấn. Hệ thống màu này có vấn đề là chỉ có thể tạo thành một khoảng màu giới hạn khi kết hợp các màu này. Để cải thiện khoảng màu thu được, các họa sĩ thường bổ sung màu trắng như là một màu chính khác.

Vì lí do này, các quá trình in hiện đại và chụp ảnh màu sử dụng **màu vàng, màu cánh sen và màu ngọc lam như là các màu chính trừ**. Các máy in màu sử dụng một màu mực thứ tư (màu đen) bởi vì không có sự kết hợp nào của các màu chính tạo ra một màu đen đặc hoàn toàn.

Để hiểu các màu thu được khi pha trộn **các chất màu**, cần nhớ rằng chúng **hấp thụ màu bổ sung của mình**.

Do đó: Màu vàng hấp thụ màu lam; màu ngọc lam hấp thụ màu đỏ, và màu cánh sen hấp thụ màu lục.

ĐỘ DÀI QUANG TRÌNH

Đường đi (d) của một tia sáng ở bất kì môi trường nào bằng tích số của tốc độ và thời gian:

$$d = vt$$

Theo định nghĩa, n = c/v do đó v = c/n. Kết quả là:

$$d = ct/n \text{ hoặc } nd = ct$$

nd được gọi là độ dài quang trình. **Độ dài quang trình (nd) là khoảng cách mà ánh sáng đi ở trong chân không trong cùng một thời gian nó đi một khoảng cách d ở trong một môi trường có chiết suất n.**

Phương trình trên ngụ ý rằng khoảng cách mà ánh sáng đi trong một môi trường (d) thì ngắn hơn khoảng cách đi trong chân không trong cùng một thời gian (theo hệ số 1/n). Hệ quả là bước sóng ánh sáng nhỏ hơn ở trong môi trường so với ở trong chân không (theo cùng một hệ số).

SỰ KHÚC XẠ Ở CÁC MẶT CONG

Nếu một mặt cong hình cầu phân cách 2 môi trường có chiết suất khác nhau thì công suất khúc xạ (khả năng thay đổi độ tụ) được tính bằng công thức

$$F = \frac{n_2 - n_1}{r}$$

- F = công suất của mặt (điốp)
- r = bán kính cong của mặt (m)
- n_1 = chiết suất của môi trường ban đầu
- n_2 = chiết suất của môi trường ánh sáng đi vào

Tác động của sư chênh lệch chiết suất giữa 2 môi trường đối với công suất được minh họa rõ ràng dưới đây:

Chúng ta có thể coi giác mạc ở một con mắt đơn giản hóa gồm 2 mặt cầu. Mặt trước phân cách với không khí và có bán kính cong 7.7 mm. Mặt sau tiếp xúc với thủy dịch và có bán kính cong 6.8 mm. Chúng ta sẽ giả sử rằng giác mạc có chiết suất hằng định 1.376 và chiết suất của thủy dịch là 1.336.

Công suất mặt trước: F = (1.376 – 1)/ 0.0077 = 48.83 D

Công suất mặt sau: F = (1.336 – 1.376)/ 0.0068
= -5.88 D
Tổng công suất = F1 + F2 = +42.95 D

NẾU GIÁC MẠC Ở TRONG KHÔNG KHÍ:

Công suất mặt trước cũng như trước: 48.83 D

Công suất mặt sau: F = (1 – 1.376)/ 0.0068
= -55.29 D

Tổng công suất **TRONG KHÔNG KHÍ** = F1 + F2 = 48.83 – 55.29

= -6.46 D

Ở trong **không khí,** giác mạc sẽ là một thành phần quang học **PHÂN KÌ**. Chiết suất thủy dịch cao hơn làm cho nó trở thành ***HỘI TỤ*** khi ở ***trong mắt*** .

ĐỒNG HỒ ĐO ĐỘ CONG II

Ở Chương 2, chúng ta đã thấy rằng đồng hồ đo độ cong thực tế xác định bán kính cong của một mặt thấu kính bằng cách đo khẩu độ và độ cao cung với 3 chân được đặt trên bề mặt đó ($r = y^2/2s$). Tuy nhiên, mục đích của nó là cho biết **công suất** của bề mặt thấu kính.

Ở phần trước, chúng ta đã thấy rằng có thể tính công suất của một mặt khúc xạ nếu biết chiết suất của các môi trường bao quanh bề mặt đó. Trong thực hành, chúng ta biết rằng n_1 bằng 1 bởi vì mắt kính ở trong không khí. Tuy nhiên, để có được số đo chính xác, chúng ta cần định chuẩn đồng hồ đo độ cong theo chiết suất của vật liệu kính.

Đồng hồ đo độ cong được định chuẩn dựa trên giả định vật liệu kính là thủy tinh crao (n = 1.523). Đối với những mắt kính chiết suất **trên 1.523** thì đồng hồ đo độ cong sẽ **đo cao hơn** công suất thực của kính và đối với những mắt kính chiết suất ***dưới 1.523*** thì đồng hồ đo độ cong sẽ ***đo thấp hơn*** công suất thực của kính.

Công suất của 2 mặt được cộng với nhau để cho tổng công suất của mắt kính. Để tính công suất của một kính, người ta phải xem xét độ dày của kính đó. Cộng công suất của 2 mặt để có tổng công suất của kính chỉ là một phép tính xấp xỉ phù hợp khi các mắt kính mỏng, nghĩa là đồng hồ đo độ cong sẽ không cho kết quả chính xác của mắt kính dày. Ngoài ra, chúng không thể dùng cho kính phi cầu (aspheric lenses) và kính dạng tự do (freeform lenses).