BrienHoldenVisionInstitute

QUANG SAI

TÁC GIẢ

GS. Earl L. Smith III: Đại học Houston

THẨM ĐỊNH

GS. Emeritus Barry L. Cole: Đại học Melbourne

GIỚI THIỆU VÀ ĐẠI CƯƠNG

Chương này bao gồm những nội dung:

- Quang sai đơn sắc
- Sắc sai

Quang sai là những khiếm khuyết của một quang hệ làm giảm chất lượng của ảnh khúc xạ, ngay cả khi ảnh ở "đúng tiêu điểm". Quang sai làm cho các tia từ một vật điểm không hội tụ được vào một tiêu điểm như là một ảnh điểm. Mắt có tất cả các quang sai đặc trưng của hầu hết các hệ thấu kính. Về mặt lí thuyết, cần có kiến thức về các quang sai của mắt bởi vì chúng làm giảm chất lượng ảnh võng mạc và đóng một vai trò quan trọng ở các chức năng mắt bình thường; thí dụ, người ta đã cho rằng cầu sai và sắc sai có thể giúp kiểm soát mức độ điều tiết. Về mặt lâm sàng, cần hiểu biết về các quang sai của mắt bởi vì nhiều khám nghiệm lâm sàng thường dùng sử dụng quang sai của mắt để đo lường các đặc tính quang học của mắt (thí dụ test xanh-đỏ) và bởi vì nhiều triệu chứng thường gặp của bệnh nhân có thể do các quang sai này.

Có 2 loại quang sai phổ biến. Quang sai xảy ra khi sử dụng bước sóng ánh sáng đơn được gọi là **quang sai đơn sắc**. Quang sai đơn sắc là một đặc tính của hình dạng hoặc cấu hình của một quang hệ và đôi khi được gọi là quang sai von Seidel, được đặt theo tên nhà toán học lần đầu tiên mô tả định lượng các quang sai "bậc 3" này. Quang sai xảy ra khi dùng các bước sóng ánh sáng hỗn hợp (thí dụ ánh sáng trắng) được gọi là **sắc sai**. Sắc sai là một đặc tính của vật liệu tạo ra quang hệ và xảy ra do chiết suất của một môi trường đã cho thay đổi trực tiếp theo tần số của ánh sáng được sử dụng (tức là nghịch đảo của bước sóng ánh sáng).

QUANG SAI ĐƠN SẮC

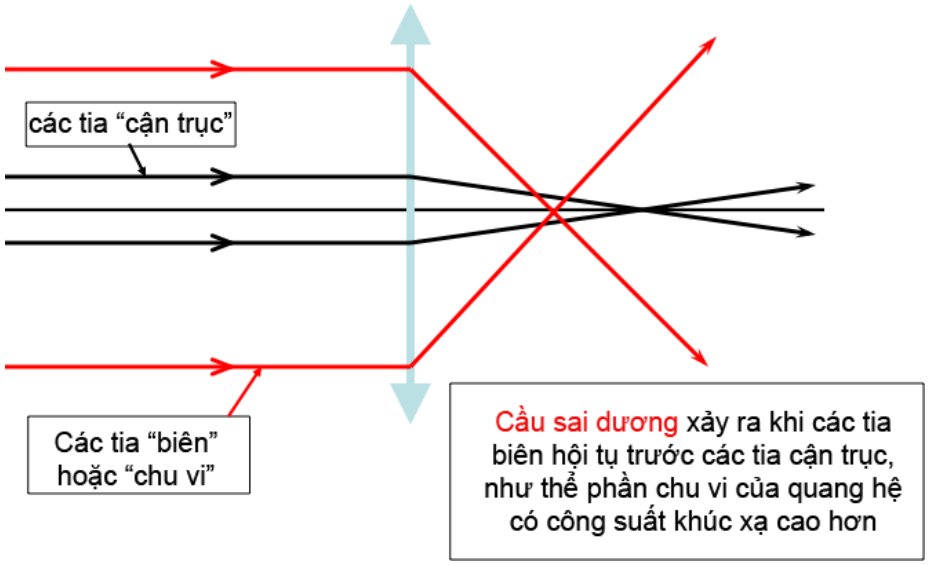
Có 5 quang sai đơn sắc có thể ảnh hưởng đến chất lượng ảnh võng mạc.

1. Cầu sai
2. Coma
3. Loạn thị chéo
4. Độ cong trường
5. Méo ảnh

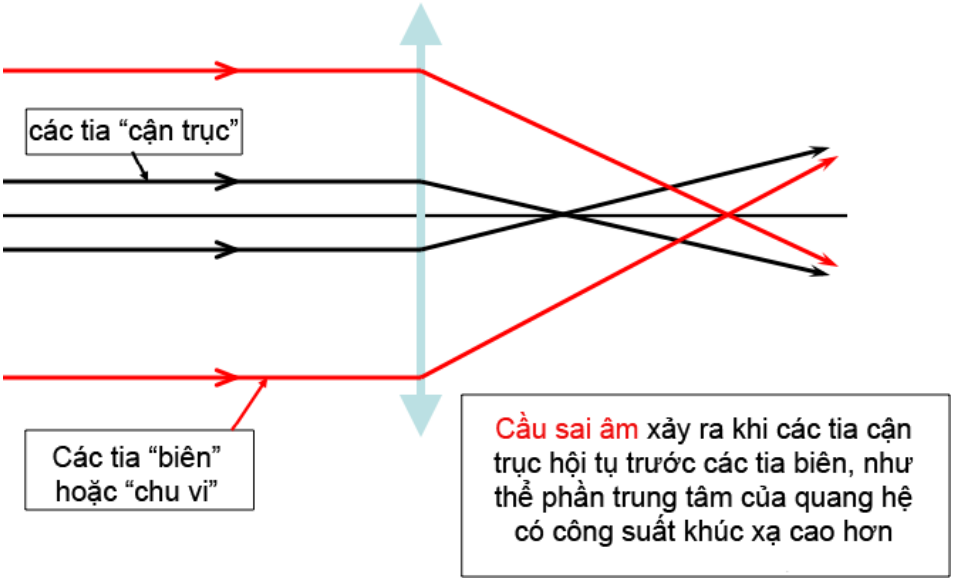
Cầu sai ảnh hưởng đến độ rõ của cả ảnh "trên trục" và ảnh "ngoài trục". Coma và loạn thị chéo chỉ ảnh hưởng đến độ rõ của các ảnh ngoài trục. Méo ảnh và độ cong trường ảnh hưởng đến hình dạng của các ảnh ngoài trục.

CẦU SAI

Cầu sai là quang sai đơn sắc quan trọng nhất. Cầu sai tồn tại khi các tia biên (tức là các tia khúc xạ qua các phần chu vi của quang hệ) và các tia cận trục không hội tụ được vào cùng một tiêu điểm ở cùng một mặt phẳng. Nếu các thành phần khúc xạ của quang hệ có các mặt cầu thực sự thì các tia biên sẽ hội tụ ở trước các tia cận trục. Trong quang hình học, do người ta thường chỉ xét các mặt cầu nên thuật ngữ "cầu sai" được dùng để mô tả sự tăng công suất hiệu dụng xảy ra theo khoảng cách càng xa trục quang học. Tuy nhiên, trong quang học thị giác thì các mặt quang học thường không phải là các mặt cầu, do đó thuật ngữ "cầu sai" đường dùng để chỉ mọi thay đổi phụ thuộc vùng của công suất khúc xạ. Với các quang hệ phi cầu, vùng cận trục của quang hệ có thể có công suất khúc xạ lớn hơn so với vùng ngoại biên, do đó các tia cận trục có thể hội tụ vào một tiêu điểm ở trước các tia biên. Để phân biệt 2 tình huống này, khi các tia biên hội tụ ở trước các tia cận trục thì người ta gọi là cầu sai **dương** (hoặc cầu sai **thiểu chỉnh**) (Hình 8.1). Khi các tia cận trục hội tụ ở trước các tia biên thì người ta gọi là cầu sai **âm** (hoặc cầu sai **thặng chỉnh**) (Hình 8.2).

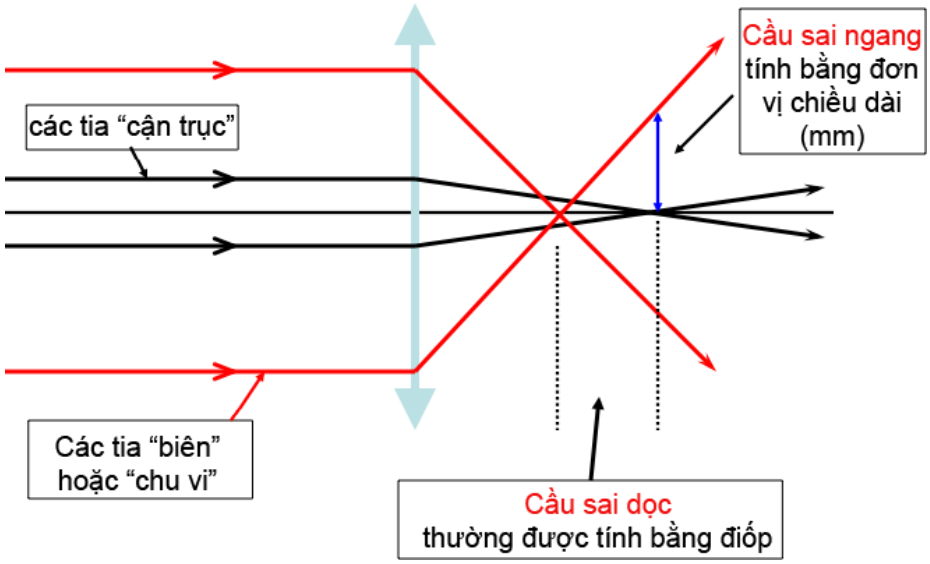


Hình 8.1: *Cầu sai dương (cầu sai thiểu chỉnh)*



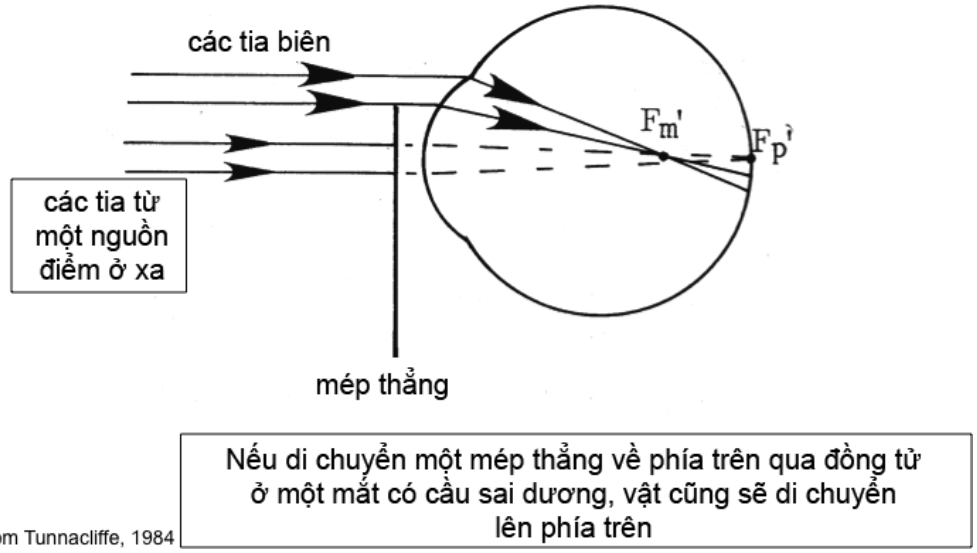
Hình 8.2 *Cầu sai âm (cầu sai thặng chỉnh)*

Mức độ cầu sai có thể được biểu diễn bằng một trong 2 cách (Hình 8.3). Cầu sai **dọc** là khoảng cách điốp giữa các điểm mà tia biên và tia cận trục hội tụ vào (tức là chênh lệch công suất khúc xạ giữa vùng biên và vùng cận trục của quang hệ). Đối với một vật điểm, cầu sai **ngang** là bán kính của mảng sáng được tạo ra bởi các tia biên ở mặt phẳng của tiêu điểm cận trục. Ngoài phụ thuộc vào chênh lệch công suất khúc xạ giữa phần rìa và phần trục của quang hệ, cầu sai ngang còn phụ thuộc vào kích thước của lỗ giới hạn. Cầu sai dọc thường cho nhiều thông tin và tiện lợi hơn để chỉ rõ độ cầu sai của một quang hệ đã cho.



Hình 8.3: *Cầu sai dọc và cầu sai ngang*

Mắt không điều tiết thường bị cầu sai dương. Có thể chứng minh bản chất của cầu sai của mắt bằng cách di chuyển một mép thẳng ở trước mắt trong khi nhìn một vật ở xa. Khi mép thẳng đến bờ đồng tử, vật ở xa sẽ di chuyển một mức độ nhỏ cùng hướng với mép thẳng. Hình 8.4 minh họa tại sao vật lại di chuyển khi mép thẳng che lấp đồng tử. Do các tia cận trục thường hội tụ ở hoàng điểm (các tia cận trục thường sáng hơn và mắt thích hội tụ các tia này), các tia biên (tức là các tia đi vào mắt ở gần bờ đồng tử) sẽ hội tụ ở trong dịch kính ở một điểm gần giác mạc hơn. Do đó, như được minh họa trong Hình 8.4, các tia đi vào mắt ở phần trên của đồng tử sẽ rọi vào võng mạc ở dưới hoàng điểm. Khi mép thẳng được di chuyển qua đồng tử, đầu tiên nó sẽ chặn các tia biên qua phần dưới của đồng tử. Do các tia cận trục đang được dùng để định thị vật nên vị trí biểu kiến của nó sẽ không bị ảnh hưởng. Tuy nhiên, khi mép thẳng che lấp các tia cận trục, chỉ để các tia biên đi qua phần trên của đồng tử thì vật sẽ di chuyển lên trên bởi vì ảnh của vật tạo thành bởi các tia biên này ở dưới hoàng điểm.



Hình 8.4: *Cầu sai gây ra chuyển động biểu kiến của các vật khi một mép thẳng được di chuyển qua đồng tử*

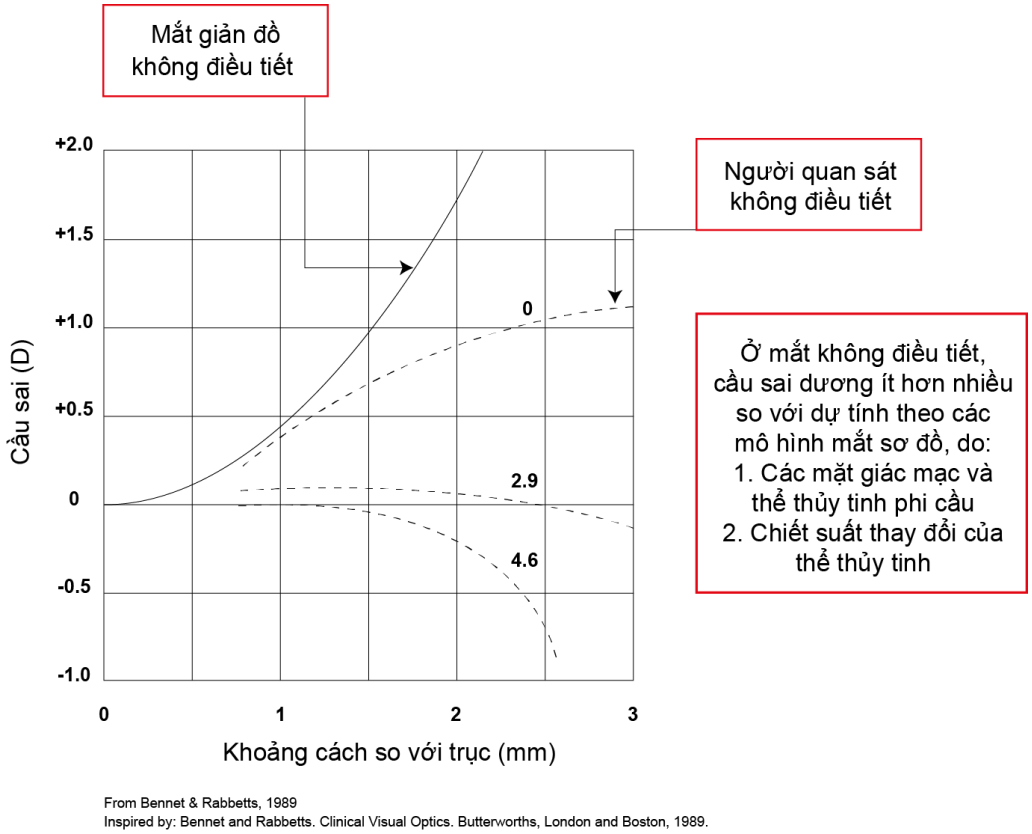
Đáng chú ý là, nếu bạn định thị một vật ở gần (thí dụ cách khoảng 15 cm), và đưa một mép thẳng qua đồng tử thì vật định thị sẽ thường di chuyển ngược hướng với mép thẳng (tức là nếu di chuyển mép lên phía trên qua đồng tử thì điểm định thị sẽ di chuyển xuống dưới – để dễ đánh giá hiện tượng này, có thể đu đưa mép thẳng lên trên và xuống dưới ở gần bờ đồng tử). Sự đảo ngược hướng của chuyển động chứng tỏ bản chất cầu sai của mắt không giống nhau ở trạng thái điều tiết và trạng thái không điều tiết. Nếu mức điều tiết của mắt vượt quá khoảng 2.0 D thì mắt thường có cầu sai âm (cầu sai thặng chỉnh).

Khó có thể chỉ rõ độ lớn của cầu sai ở mắt bằng những từ đơn giản. Như đã trình bày ở trên, bản chất của cầu sai bị ảnh hưởng bởi mức độ điều tiết. Ngoài ra, độ cầu sai của mắt thay đổi rất nhiều, không chỉ giữa các cá thể mà còn đối với một cá thể đã định, độ cầu sai thay đổi từ kinh tuyến này sang kinh tuyến khác. Và ở bất kì kinh tuyến nào đã cho, độ cầu sai chính xác sẽ thay đổi theo khoảng cách càng xa trục quang học của mắt. Hầu hết các trình bày ngắn gọn về cầu sai chỉ ra rằng mắt trung bình có cầu sai dương khoảng 0.5 đến 1.0 D.

Ivanoff được coi là đã cung cấp mô tả đầy đủ nhất về độ cầu sai ở “mắt trung bình”. Ông đã tiến hành một thí nghiệm rất đơn giản là đo công suất khúc xạ của mắt theo vị trí qua kinh tuyến ngang của đồng tử. Kết quả của ông ở mắt trung bình được tóm tắt ở Hình 8.5. Độ cầu sai dọc được vẽ trên tung độ của biểu đồ theo vị trí qua đồng tử (tức là độ cầu sai được biểu diễn bằng chênh lệch công suất khúc xạ thấy ở trục đồng tử và công suất đo được ở các điểm khác nhau cách xa tâm đồng tử). Kết quả được trình bày cho 3 mức điều tiết khác nhau.

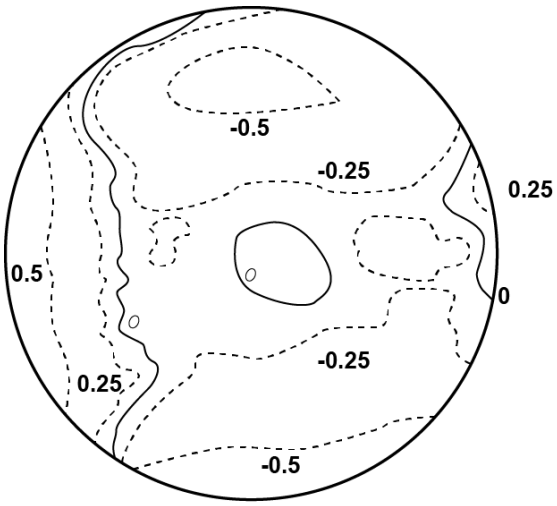
Có một số điểm cần xem xét ở Hình 8.5. Thứ nhất, ở trạng thái không điều tiết, độ cầu sai dương tăng nhanh trong 1-2 mm đầu từ tâm đồng tử, sau đó dừng lại ở một giá trị hơi thấp hơn 1.0 D. Hầu hết tổng cầu sai ở vùng trung tâm 1-2 mm của tâm đồng tử được coi là chủ yếu do thể thủy tinh. Tuy nhiên, so với mức độ cầu sai có thể thấy ở một hệ thống có các mặt khúc xạ cầu (đường đặc ở Hình 8.5 cho thấy mức độ cầu sai được tính cho một mắt giản đồ điển hình) thì các mức tuyệt đối của cầu sai thấy được ở mắt người là tương đối thấp. Có một số đặc điểm sinh lí của mắt giúp giảm mức độ cầu sai ở trạng thái không điều tiết. Thứ nhất, cả giác mạc và thể thủy tinh đều có các mặt phi cầu. Cả giác mạc và thể thủy tinh đều dẹt dần về phía chu vi, dẫn đến giảm công suất tương đối ở chu vi của các cấu trúc khúc xạ này. Thứ hai, có sự tăng dần chiết suất của thể thủy tinh từ bề mặt tới trung tâm; tức là lớp nhân của thể thủy tinh có chiết suất cao hơn lớp vỏ. Kết quả là các tia sáng đi qua trung tâm của thể thủy tinh sẽ gặp một chiết suất và công suất khúc xạ thực tế cao hơn so với các tia đi qua vùng chu vi của thể thủy tinh. Cả 2 yếu tố này có xu hướng trung hòa cầu sai dương có thể có ở một quang hệ tương đương.

Điểm thứ hai có thể rút ra từ Hình 8.5 là khi mắt điều tiết trong khoảng từ 1.0 đến 2.0 D thì có rất ít cầu sai của bất kì loại nào. Với các độ điều tiết lớn hơn, mắt có khoảng 1.0 D cầu sai âm ở cách tâm đồng tử khoảng 2-3 mm. Những thay đổi này ở bản chất và độ cầu sai có thể do những thay đổi không cân đối ở các mặt của thể thủy tinh xảy ra trong điều tiết dương. Cần nhớ rằng do những khác biệt độ dày của bao thể thủy tinh nên thay đổi ở 2 mặt của thể thủy tinh trong khi điều tiết sẽ không cân đối. Thay vào đó, phần trung tâm của thể thủy tinh bị tăng độ cong nhiều hơn so với phần ngoại vi. Những thay đổi khác nhau ở độ cong này làm cho công suất khúc xạ ở vùng trung tâm thể thủy tinh tăng nhiều hơn so với ở vùng chu vi. Sự chênh lệch này đủ lớn để di chuyển tiêu điểm của các tia cận trục về phía trước tiêu điểm của các tia biên (tức là loại cầu sai thay đổi từ dương sang âm.).



Hình 8.5: *Cầu sai ở mắt trung bình thay đổi theo khoảng cách đối với trục và theo điều tiết (Hình của Bennett và Rabbetts, Clinical Visual Optics, Butterworths, London and Boston, 1989)*

Như đã đề cập ở trên, có thể có một mức độ biến đổi đáng kể cầu sai ở mặt phẳng đồng tử. Số liệu của Ivanoff (1953) đã mô tả độ lớn và đặc điểm của cầu sai ở kinh tuyến ngang của mắt trung bình. Hình 8.6 là sơ đồ các vùng đồng công suất ở mặt phẳng đồng tử của một bệnh nhân. Nó cho thấy rõ bản chất biến đổi của cầu sai ở mắt. Trong trường hợp này, kinh tuyến dọc có cầu sai âm còn kinh tuyến ngang có cầu sai dương.



đường kính đồng tử 7mm

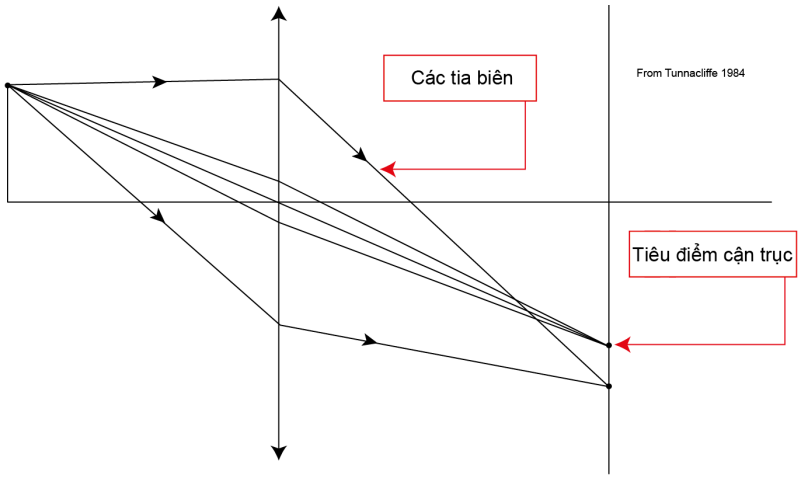
Các vùng sai lệch đồng khúc xạ của một người với độ cầu sai tương đối nhỏ

Độ và dấu của cầu sai có thể thay đổi giữa các kinh tuyến

Hình 8.6: *Bản đồ cầu sai của các vùng đồng khúc xạ ở mắt của một người*

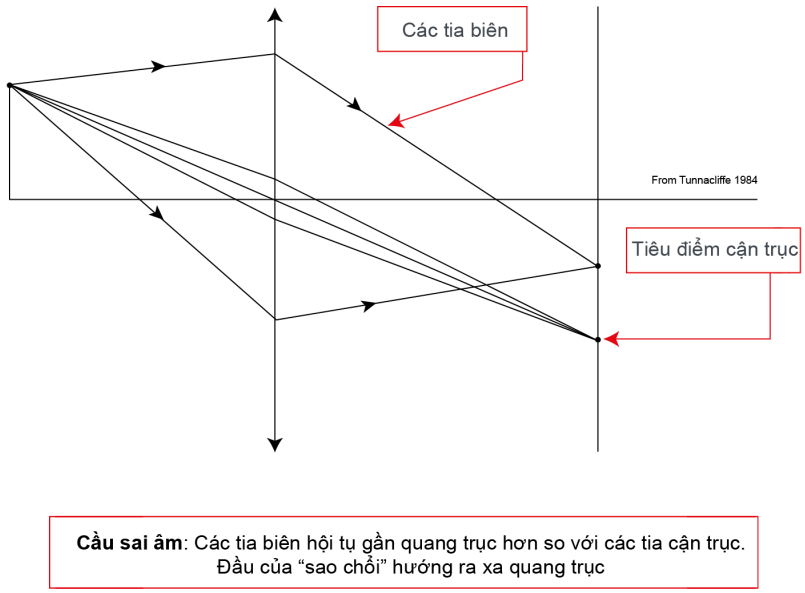
COMA

Coma ảnh hưởng đến độ rõ nét của các ảnh tạo thành cho các vật "ngoài trục". Coma xảy ra khi các tia từ một nguồn điểm hội tụ ở cùng một mặt phẳng ảnh nhưng không hội tụ vào một điểm ở mặt phẳng đó. Những biến đổi độ phóng đại dài ở mặt phẳng của một thấu kính gây ra coma. Do coma dẫn đến sự bất đối xứng ở ảnh của một điểm nên, trong một số trường hợp, nó có thể có ảnh hưởng lớn hơn đối với một ảnh quang học so với bất kì quang sai đơn sắc nào. 2 dạng coma cơ bản được minh họa trong Hình 8.7 và 8.8. Khi các tia đi qua vùng cận trục của quang hệ (thí dụ tia chính) hội tụ ở gần trục quang học hơn trong mặt phẳng ảnh thì gọi là coma **dương**. Khi các tia biên hội tụ gần trục quang học hơn các tia cận trục thì gọi là coma **âm**.



Cầu sai dương: Các tia cận trục hội tụ gần quang trục hơn các tia biên qua chu vi của thấu kính. Đầu của "sao chổi" hướng về phía quang trục

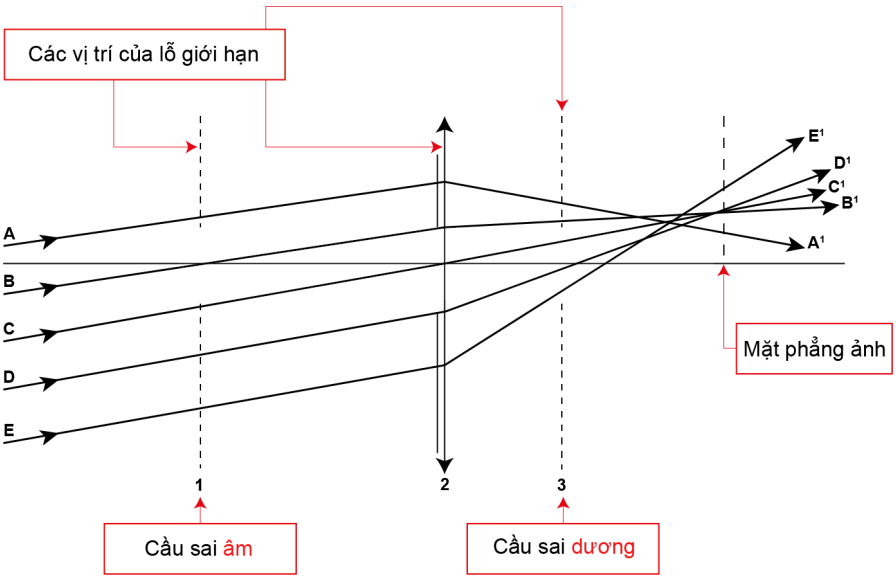
Hình 8.7: *Sơ đồ tia sáng minh họa coma dương*



Hình 8.8: *Sơ đồ tia sáng minh họa coma âm*

Khi một quang hệ có cầu sai (giống như mắt không điều tiết) thì loại coma tồn tại phụ thuộc vào vị trí của lỗ giới hạn. Hình 8.9 minh họa bản chất của coma bị ảnh hưởng thế nào bởi vị trí của lỗ giới hạn. Khi lỗ ở vị trí số 1 thì B sẽ là tia chính và các tia biên (thí dụ tia A) sẽ hội tụ gần trục quang học hơn dẫn đến coma âm. Khi lỗ ở vị trí 2 thì các tia ngoại biên bị chặn bởi lỗ chắn và hệ thấu kính cộng này sẽ bị cầu sai nhưng không có coma. Cuối cùng, khi lỗ ở vị trí 3 thì tia chính (trong trường hợp này là D) sẽ hội tụ gần trục quang học hơn so với các tia ngoại biên hơn (thí dụ tia E) gây ra coma dương.

Ở mắt có 2 thấu kính cộng (giác mạc và thể thủy tinh) với một lỗ giới hạn ở giữa. Ở tình trạng này, hệ thống giác mạc-đồng tử góp phần vào coma dương, nhưng hệ thống thể thủy tinh-đồng tử góp phần vào coma âm. Các dạng coma trái ngược tạo ra bởi 2 cấu trúc này có xu hướng khử nhau, do đó hạn chế ảnh hưởng của coma lên chất lượng ảnh võng mạc. Ngay cả khi ảnh võng mạc bị coma thì nó cũng không ảnh hưởng đáng kể đến chức năng của mắt. Cần nhớ rằng coma chỉ ảnh hưởng đến độ rõ nét của các ảnh võng mạc "ngoài trục". Tuy nhiên, thị lực của mắt giảm một cách nhanh chóng khi vùng nhìn càng xa tâm. Do võng mạc ngoại vi có thị lực tương đối kém nên phần coma còn lại có thể không ảnh hưởng đến thị lực.

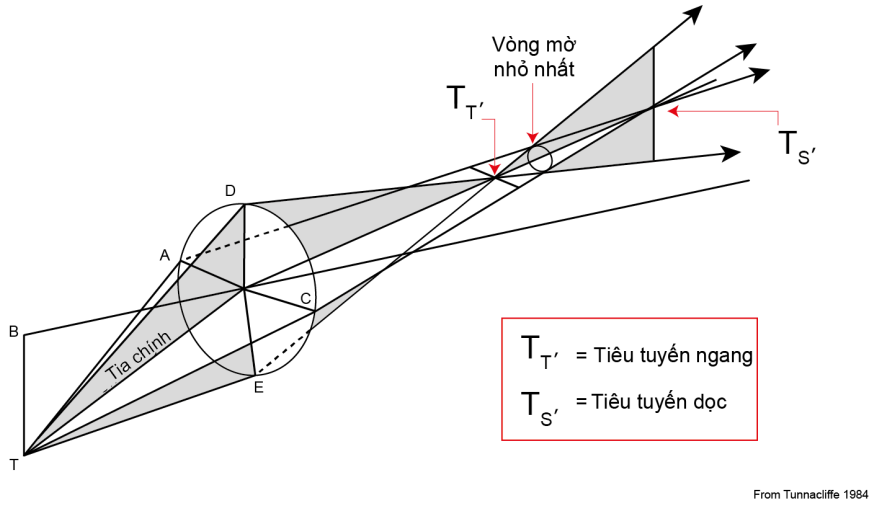


Hình 8.9: *Loại quang sai coma phụ thuộc vào vị trí của lỗ giới hạn*

LOẠN THỊ CHÉO

Loạn thị chéo về bản chất cũng tương tự loạn thị sinh ra bởi một mặt khúc xạ loạn thị đối với một vật nằm trên trục. Loạn thị chéo được sinh ra bởi một kính cầu bị nghiêng so với vật đang xem xét (tức là khi vật đang xem xét không nằm trên trục quang học: vật "ngoài trục").

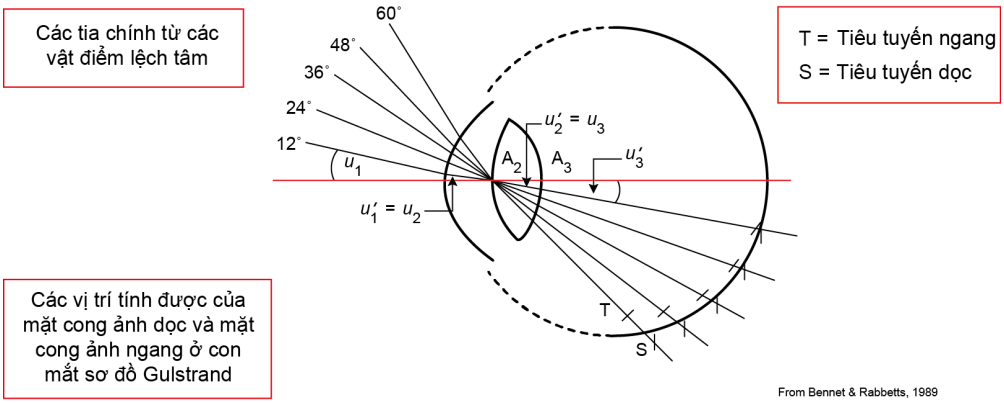
Loạn thị chéo được minh họa trong Hình 8.10. Đối với một nguồn điểm ở dưới trục quang học (điểm T trong Hình 8.10), các tia sáng bị khúc xạ qua mặt phẳng tiếp tuyến của kính (DE) hội tụ ở điểm $T_{T'}$, tạo thành một tiêu tuyến ngang. Các tia từ điểm T bị khúc xạ ở mặt phẳng ngang của kính (AC) tạo thành một tiêu tuyến dọc ở điểm $T_{S'}$. Các ảnh loạn thị được tạo ra của một loạt vật điểm được đặt càng xa trục quang học tạo thành 2 mặt cong ảnh (tức là mặt cong ảnh dọc và mặt cong ảnh ngang) càng tách xa nhau khi độ lệch tâm của các điểm vật tăng lên.



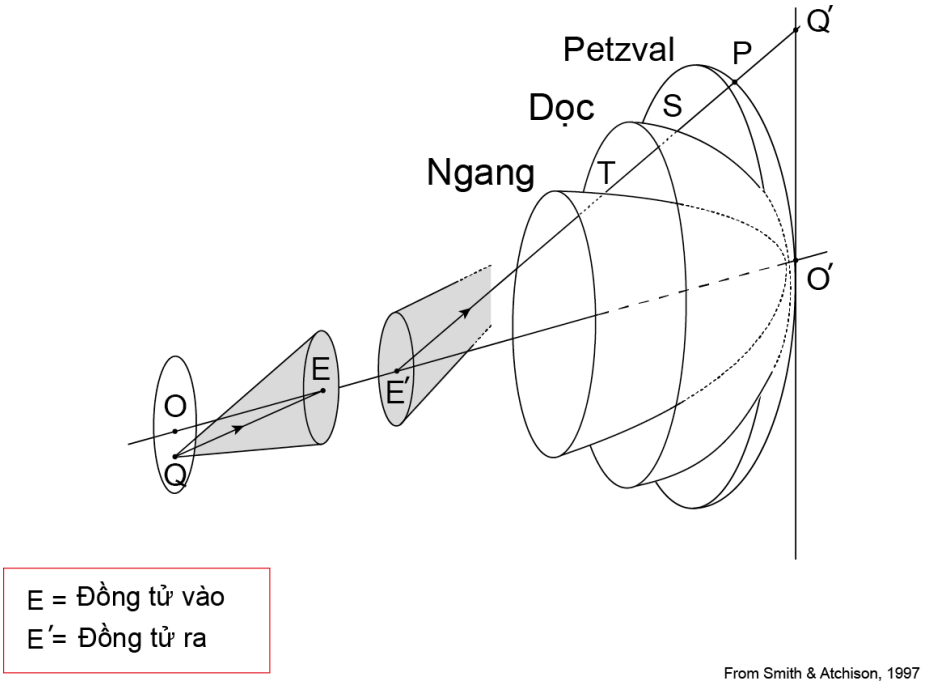
Loạn thị chéo: được gây ra bởi một mặt cầu bị nghiêng so với một vật, tức là khi một vật không nằm trên quang trục

Hình 8.10: *Loạn thị chéo*

Mặc dù mắt bị loạn thị chéo, ảnh hưởng của quang sai này lên chất lượng ảnh võng mạc được giảm thiểu bởi độ cong của võng mạc. Nếu bạn tính các độ cong của mặt cong ảnh dọc và của mặt cong ảnh ngang của mắt giản đồ chính xác Gullstrand thì có thể thấy rằng mặt cong ảnh dọc có bán kính cong ngắn hơn so với võng mạc, nhưng mặt cong ảnh ngang có bán kính dài hơn so với võng mạc (xem Hình 8.11). Kết quả là vòng mờ ít nhất gắn với khoảng loạn thị gây ra bởi loạn thị chéo (tức là vị trí ảnh chứa đại diện tốt nhất của vật điểm) sẽ nằm ở giữa mặt cong 2 ảnh, rất gần võng mạc. Do độ cong của võng mạc và sự giảm thị lực xảy ra như là một hàm số của độ lệch tâm nên mắt được chỉnh tốt một cách hợp lí cho loạn thị chéo. Trong thực tế, chất lượng ảnh võng mạc tốt hơn ở một mắt không được chỉnh loạn thị chéo so với một mắt được chỉnh quang sai này. Khi một quang hệ được chỉnh loạn thị chéo thì mỗi điểm vật sẽ có một ảnh điểm đơn. Các ảnh điểm này được tạo thành ở một mặt cong ảnh lõm (ít ra là cho một hệ thống kính hội tụ) được gọi là **mặt Petzval** (xem Hình 8.12). Bán kính cong tính được cho mặt Petzval của mắt giản đồ Gullstrand về căn bản dài hơn bán kính cong thực của võng mạc (17.4 mm so với 12 mm). Quan trọng hơn, do mặt Petzval dẹt hơn so với võng mạc nên kích thước của các vòng mờ sẽ được tạo ra ở võng mạc nếu mắt được chỉnh loạn thị chéo sẽ lớn hơn các vòng mờ ít nhất được tạo ra ở gần võng mạc do loạn thị chéo không chỉnh kính.



Hình 8.11: *Mặt cong ảnh dọc và mặt cong ảnh ngang ở loạn thị chéo*



Mặt Petzval tính được của con mắt sơ đồ Gullstrand thì dẹt hơn so với cả mặt cong ảnh ngang và mặt cong ảnh dọc (và võng mạc)

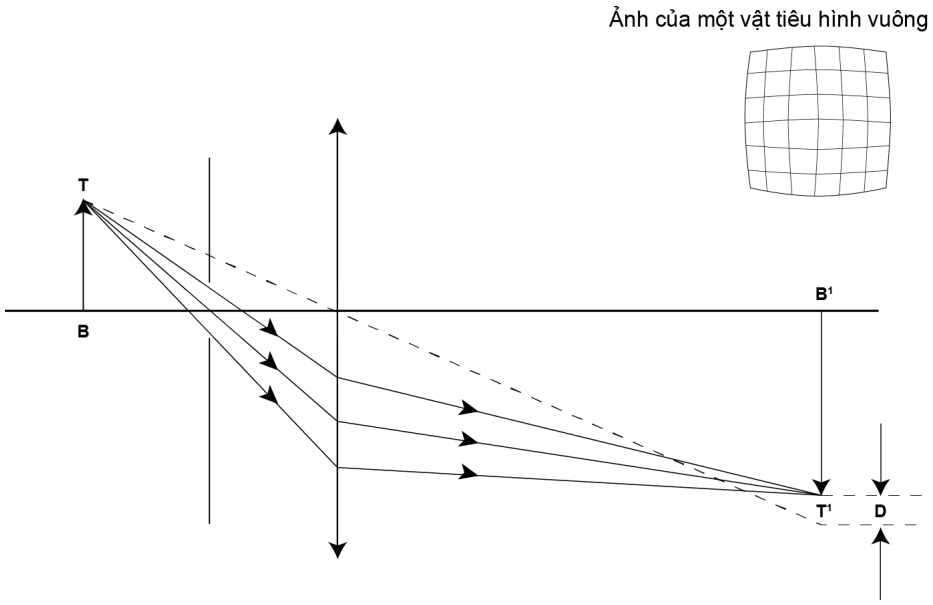
Hình 8.12: *Mặt Petzval khi một quang hệ được chỉnh loạn thị chéo*

ĐỘ CONG TRƯỜNG

Độ cong trường ảnh hưởng đến hình dạng của ảnh tạo ra bởi một vật mở rộng (tức là một vật gồm các điểm "ngoài trục"). Độ cong trường liên quan rất chặt chẽ với loạn thị chéo. Ở một hệ thống khúc xạ dương, độ cong trường dẫn đến một ảnh lõm đối với không gian vật. Ở một hệ thống được chỉnh loạn thị chéo, độ cong ảnh sẽ tương ứng với độ cong của mặt Petzval. Ở một hệ thống không được chỉnh loạn thị chéo, mặt phẳng ảnh cong gắn với độ cong trường có thể được coi là tương ứng với mặt cong ảnh sẽ chứa các vòng mờ ít nhất gây ra bởi loạn thị chéo. Nhưng như đã lưu ý ở trên, võng mạc cũng lõm đối với không gian vật và kết quả là độ cong trường không phải là một quang sai khó chịu ở mắt.

MÉO ẢNH

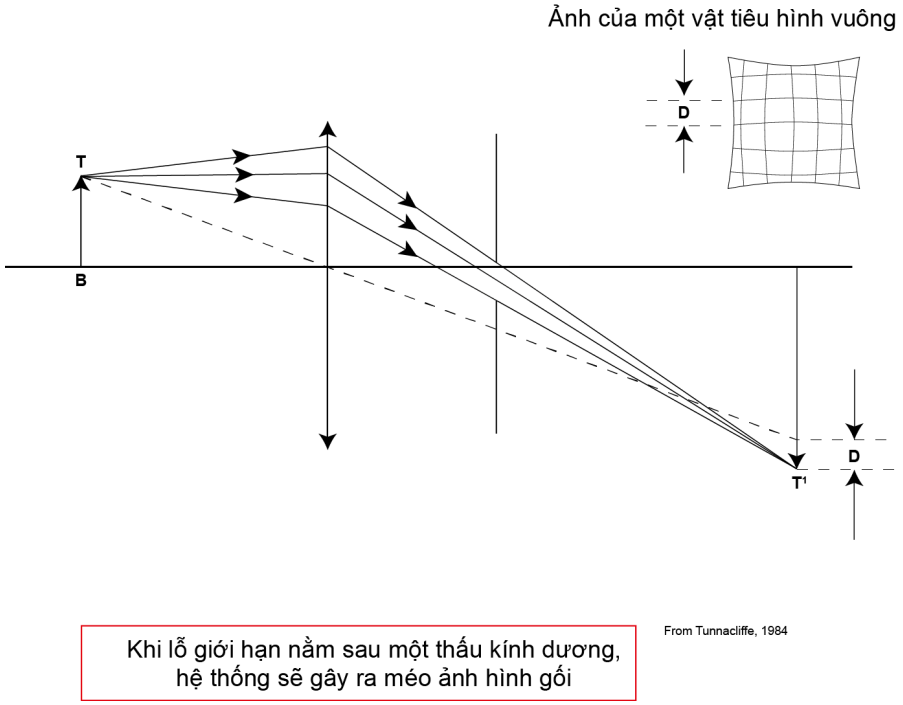
Méo ảnh sinh ra do độ phóng đại dài không bằng nhau ở mặt phẳng ảnh. Nó được sinh ra mỗi khi có một lỗ giới hạn nằm gần một thấu kính khúc xạ. Nhưng giống như coma, loại méo ảnh sinh ra phụ thuộc bản chất khúc xạ của thấu kính (tức là cộng hoặc trừ) và vị trí của lỗ giới hạn. Khi lỗ giới hạn ở trước kính cộng thì ảnh sẽ bị méo "**hình trống**" (xem Hình 8.13; độ phóng đại ở vùng cận trục của ảnh sẽ lớn hơn so với ở các vùng ngoại vi). Nhưng nếu lỗ giới hạn nằm ở sau kính cộng (tức là trong không gian ảnh) thì ảnh sẽ bị méo "**hình gối**" (xem Hình 8.14, độ phóng đại ở các vùng rìa lớn hơn so với các vùng ảnh cận trục).



From Tunnacliffe, 1984

Khi lỗ chắn ở trước một thấu kính dương, hệ thống sẽ gây ra méo ảnh hình trống

Hình 8.13: *Méo ảnh hình trống*



Hình 8.14: *Méo ảnh hình gối*

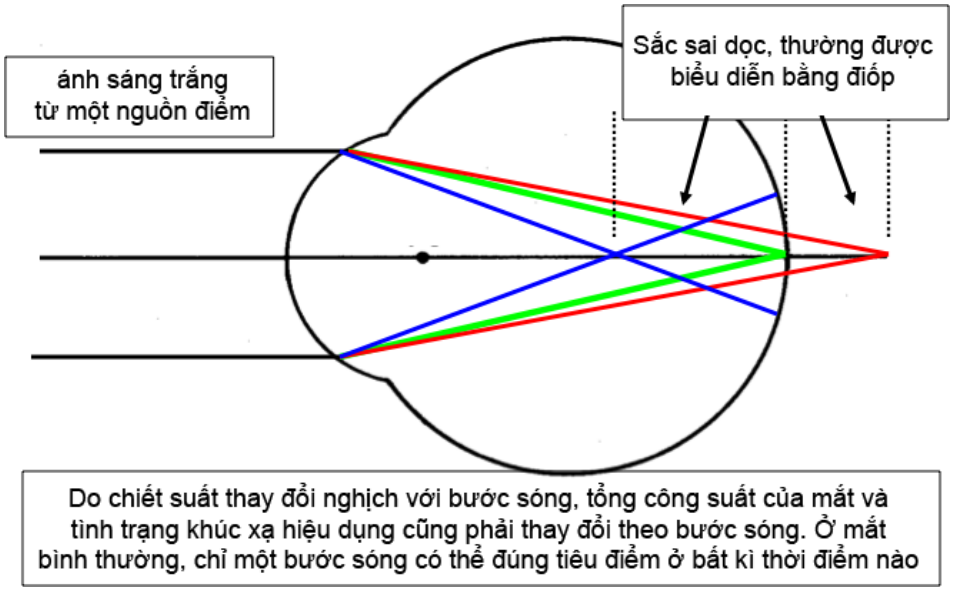
Như trong trường hợp coma, vị trí đồng tử là tối ưu để giảm thiểu ảnh hưởng của quang sai này đối với chất lượng ảnh võng mạc. Hệ thống giác mạc-đồng tử dẫn đến loại méo ảnh hình gối, trong khi hệ thống thể thủy tinh-đồng tử gây ra loại méo ảnh hình trống. Kết quả là các kiểu méo ảnh gây ra bởi giác mạc và thể thủy tinh có xu hướng hủy lẫn nhau khiến cho trong hầu hết các trường hợp mắt không bị méo ảnh đáng kể.

Chỉ có một trường hợp duy nhất méo ảnh làm ảnh hưởng đến chất lượng ảnh võng mạc đó là mắt không thể thủy tinh. Ở mắt không thể thủy tinh, sự cân bằng bình thường giữa các loại méo ảnh gây ra bởi giác mạc và thể thủy tinh bị phá vỡ do việc lấy bỏ thể thủy tinh, khiến cho ảnh võng mạc bị méo hình gối. Mức độ méo ảnh hình gối còn nhiều hơn nếu mắt không thể thủy tinh được chỉnh kính gọng. Trong điều kiện này, cả kính chỉnh và giác mạc sẽ gây ra loại méo ảnh hình gối.

SẮC SAI

Sắc sai tồn tại bởi vì chiết suất của một môi trường đã cho thay đổi theo bước sóng ánh sáng. Chiết suất của một môi trường đã cho là tỉ số của tốc độ ánh sáng trong chân không so với tốc độ ánh sáng ở môi trường đã cho. Ở trong chân không, tất cả các bước sóng ánh sáng đi với cùng một tốc độ. Tuy nhiên, ở một môi trường đặc hơn (thí dụ kính mắt hoặc các môi trường của mắt), tốc độ ánh sáng tỉ lệ nghịch với tần số của ánh sáng hoặc (do bước sóng liên quan nghịch với tần số) tỉ lệ thuận với bước sóng ánh sáng. Do đó, trong một môi trường đã cho, các bước sóng ngắn đi chậm hơn so với các bước sóng dài, do đó chiết suất của một môi trường đã cho sẽ cao hơn tương đối cho các bước sóng ngắn của ánh sáng (thí dụ màu lam; ánh sáng 450 nm) so với cho các bước sóng dài (thí dụ màu đỏ; ánh sáng 650 nm). Kết quả là, tổng công suất khúc xạ của một quang hệ hoặc mắt sẽ phụ thuộc vào bước sóng ánh sáng được dùng để đo công suất của hệ thống. Bước sóng ánh sáng càng ngắn thì tổng công suất khúc xạ càng lớn.

Ảnh hưởng của sắc sai đối với sự tạo thành ảnh võng mạc được minh họa bằng sơ đồ trong Hình 8.15. Giả sử mắt chính thị đối với ánh sáng màu vàng (thí dụ bước sóng khoảng 575 nm) và mắt đang nhìn một nguồn điểm ánh sáng trắng ở xa. Do mắt có chiết suất cao hơn (do đó công suất khúc xạ cao hơn cho ánh sáng có bước sóng ngắn hơn so với màu vàng được hội tụ vào võng mạc) nên mắt sẽ cận thị đối với ánh sáng màu lam. Tuy nhiên, công suất khúc xạ của mắt sẽ thấp hơn đối với các bước sóng dài hơn, do đó mắt sẽ viễn thị đối với các bước sóng dài hơn màu vàng được hội tụ vào võng mạc.



Hình 8.15: *Ảnh hưởng của sắc sai đối với sự tạo thành ảnh võng mạc*

ĐỘ LỚN CỦA SẮC SAI CỦA MẮT

Độ sắc sai **dọc** (giống như cầu sai dọc) được đo bằng điốp khúc xạ. Độ sắc sai dọc của một quang hệ đã cho thường được biểu thị bằng chênh lệch công suất khúc xạ của hệ thống cho 2 điểm cụ thể trong phổ nhìn thấy, các vạch C và F Fraunhofer. Các vạch C và F Fraunhofer tương ứng với các bước sóng 656 nm và 486 nm. Ivanoff (1953) đã xác định độ sắc sai của mắt trung bình. Ông đã thấy chênh lệch khoảng 0.9 D giữa tiêu điểm của ánh sáng đỏ từ vạch C và tiêu điểm của ánh sáng màu lam từ vạch F.

Ghi chú: Các vạch Fraunhofer là những vạch tối thấy được trên nền quang phổ liên tục của ánh sáng mặt trời. Các vạch tối được gây ra bởi sự hấp thụ chọn lọc ánh sáng ở các bước sóng riêng này bởi các khí ở quanh mặt trời.

Cần nhớ rằng mặc dù độ sắc sai thường được xác định theo các vạch C và F Fraunhofer, nhưng phổ nhìn thấy lại gồm các bước sóng ngắn hơn vạch F và các bước sóng dài hơn vạch C. Hầu hết các nhà nghiên cứu coi là phổ nhìn thấy (tức là phần phổ điện từ có thể kích thích võng mạc và gây ra cảm giác thị giác trong những điều kiện nhìn bình thường) trải rộng từ khoảng 380 nm tới khoảng 760 nm. Độ sắc sai dọc ở toàn bộ phổ nhìn thấy là rộng hơn đáng kể so với khoảng giữa vạch C và vạch F. Công suất khúc xạ của mắt có chênh lệch khoảng 2.6-2.8 D đối với ánh sáng từ đầu bước sóng ngắn và đầu bước sóng dài của quang phổ (tức là tình trạng khúc xạ của mắt không điều tiết đo với ánh sáng từ 2 cực của phổ nhìn thấy sẽ khác nhau gần 3.0 D). Độ tán sắc trung bình của mắt người lớn hơn một chút so với của nước cất (tức là mắt có sắc sai nhiều gần bằng một thể tích nước cất tương đương).

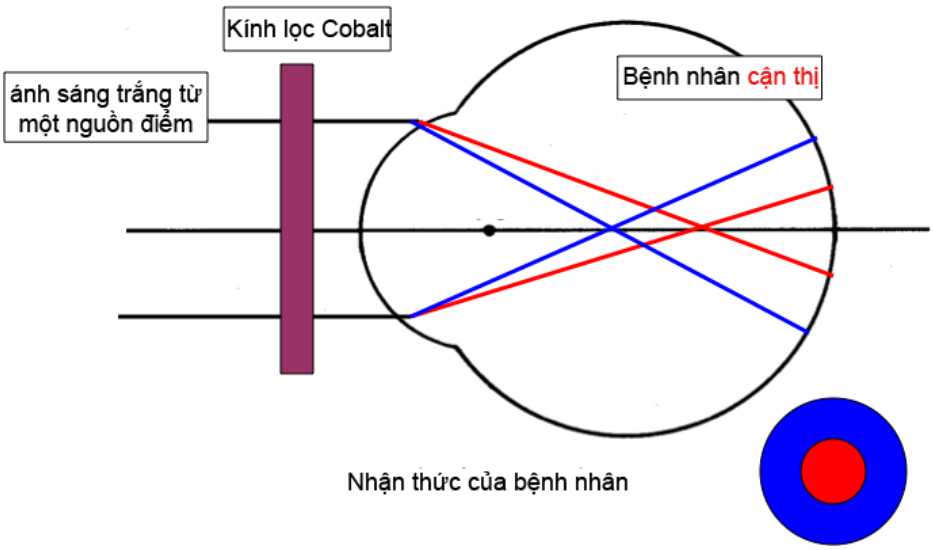
SẮC SAI VÀ CÁC KHÁM NGHIỆM LÂM SÀNG

Khác với quang sai đơn sắc, độ sắc sai không thay đổi nhiều giữa các cá thể. Điều này dễ hiểu bởi vì quang sai đơn sắc phụ thuộc vào hình dạng của quang hệ và rõ ràng là hình dạng chính xác của mắt (thí dụ độ cong giác mạc, độ sâu tiền phòng, độ cong thể thủy tinh, v.v.) khác nhau về căn bản giữa các cá thể. Trái lại, sắc sai phụ thuộc vào chiết suất của các môi trường của mắt và chiết suất của mắt bình thường rất ít sai biệt giữa các cá thể (cần nhớ rằng một số bệnh toàn thân, thí dụ đái tháo đường, có thể làm thay đổi chiết suất của các môi trường của mắt). Do sắc sai là một hiệu ứng rất nhất quán và do các bước sóng ánh sáng khác nhau sinh ra cảm giác màu khác nhau trong những điều kiện nhìn bình thường nên các nhà lâm sàng trước đây đã sử dụng các phương pháp đo tình trạng khúc xạ dựa vào sắc sai của mắt.

KÍNH LỌC COBALT

Một trong những cố gắng sớm sử dụng sắc sai để xác định tình trạng khúc xạ của mắt là dùng **kính lọc Cobalt**. Kính lọc Cobalt truyền ánh sáng chủ yếu từ đầu màu đỏ và đầu màu lam của quang phổ, nhưng hấp thụ ánh sáng ở khoảng giữa của quang phổ (tức là màu lục và màu vàng). Kết quả là các nguồn sáng trắng rộng thường có màu tía khi nhìn qua một kính lọc Cobalt.

Hình 8.16 cho thấy kính lọc Cobalt có thể được dùng thế nào để giúp nhà lâm sàng xác định vị trí của các tiêu điểm thứ hai của ánh sáng màu lục và đỏ đối với võng mạc. Giả sử một người cận thị 5.0 D không chỉnh kính, không điều tiết đang nhìn một nguồn sáng điểm màu trắng ở xa qua một kính lọc Cobalt. Ánh sáng màu lam và màu đỏ được truyền qua kính lọc bị khúc xạ bởi quang hệ của mắt và hội tụ vào một tiêu điểm ở trong dịch kính. Do công suất của mắt đối với ánh sáng màu lam lớn hơn so với ánh sáng đỏ nên ánh sáng màu lam sẽ hội tụ ở gần giác mạc hơn. Vì mắt không chỉnh kính nên ánh sáng màu lam và ánh sáng đỏ sẽ tạo thành các vòng mờ trên võng mạc. Tuy nhiên, vì tiêu điểm của ánh sáng đỏ ở gần võng mạc hơn nên kích thước của vòng mờ màu đỏ sẽ nhỏ hơn so với vòng mờ của ánh sáng màu lam. Kết quả là nếu được yêu cầu mô tả nguồn sáng ở xa, người cận thị thường nói rằng nó trông giống như là một đốm màu đỏ bao quanh bởi một viền màu lam.



Hình 8.16: *Kính lọc Cobalt có thể được dùng để giúp xác định vị trí của các tiêu điểm thứ hai của ánh sáng xanh và ánh sáng đỏ đối với võng mạc*

Nếu bệnh nhân trong thí dụ trên là một người viễn thị, hoặc nếu người cận thị trong thí dụ trên nhìn một nguồn điểm màu trắng ở gần mắt hơn so với cận điểm của người cận thị, biểu hiện của nguồn sáng sẽ khác hoàn toàn. Trong những trường hợp này, cả tiêu điểm màu đỏ và tiêu điểm màu lam sẽ đều nằm ở sau võng mạc. Nhưng do tiêu điểm màu lam ở gần võng mạc hơn so với tiêu điểm màu đỏ nên nguồn sáng sẽ biểu hiện như là một đốm màu lam bao quanh bởi một viền màu đỏ.

Làm thế nào có thể dùng kính lọc Cobalt để xác định tình trạng khúc xạ của bệnh nhân? Để xác định tình trạng khúc xạ của bệnh nhân, công suất kính ở phoropter thường được điều chỉnh để bệnh nhân nói rằng nguồn điểm màu trắng ở xa nhìn qua kính lọc Cobalt có màu tía đồng đều. Để nguồn sáng có màu tía đồng đều, tiêu điểm màu đỏ phải ở sau võng mạc trong khi tiêu điểm màu lam phải ở một khoảng cách tương đương trước võng mạc. Ở tình trạng này, các vòng mờ ở võng mạc của màu đỏ và màu lam sẽ có kích thước bằng nhau cũng như chồng lên nhau dẫn đến một ảnh màu tía đồng đều. Công suất kính sinh ra tác dụng này được coi là kính chỉnh thích hợp.

Đáng tiếc là kính điều chỉnh đo bằng phương pháp này không phải bao giờ cũng phù hợp với kết quả chủ quan đo được bằng các phương pháp thông thường. Người ta cho rằng lí do chính của sự khác nhau này liên quan với quan sát là mắt ưu tiên các bước sóng ánh sáng riêng hội tụ vào võng mạc khi nhìn vật ở xa. Ẩn ý trong phương pháp kính lọc Cobalt là giả định rằng mắt muốn có một bước sóng ánh sáng ở giữa màu lam và màu đỏ hội tụ vào võng mạc ở trạng thái không điều tiết. Đỉnh của hàm số độ sáng ban ngày (photopic luminosity function) là ở khoảng 550 nm và tiêu điểm của nó nằm ở khoảng giữa tiêu điểm của ánh sáng màu đỏ và tiêu điểm của ánh sáng màu lam. Do mắt nhạy cảm nhất với ánh sáng màu lục có bước sóng khoảng 550 nm, dường như hợp lí khi giả định là mắt sẽ chọn ánh sáng 550 nm hội tụ vào võng mạc và điểm cuối của phương pháp kính lọc Cobalt được mô tả ở trên là thỏa đáng. Tuy nhiên, những kết quả đo trực tiếp bước sóng ánh sáng hội tụ vào võng mạc ở trạng thái không điều tiết cho thấy rằng mắt thường ưu tiên ánh sáng bước sóng dài, tức là ánh sáng đỏ, hội tụ vào võng mạc khi định thị một vật ở xa.

Ghi chú: Hàm số độ sáng ban ngày phản ánh khả năng sinh độ sáng tương đối của các bước sóng ánh sáng trong điều kiện nhìn ban ngày (hoặc thích ứng sáng). Về bản chất, hàm số độ sáng ban ngày (tức là hàm số độ nhạy quang phổ trong điều kiện nhìn có ánh sáng thu được trong một số điều kiện thử nhất định) chỉ rõ độ nhạy tương đối của mắt đối với các bước sóng ánh sáng khác nhau. Đỉnh của hàm số ở khoảng 550 nm; tức là mắt nhạy cảm nhất với ánh sáng bước sóng 550 nm.

BƯỚC SÓNG HỘI TỤ CỦA HỆ THỐNG THỊ GIÁC

Như đã trình bày ở trên, khi mắt nhìn một vật ở xa, và khi có cơ hội, thì hệ thống thị giác của hầu hết mọi người sẽ chọn ánh sáng đỏ bước sóng khoảng 680 nm để hội tụ vào võng mạc. Đáng chú ý là khi mắt hội tụ vào các vật ở gần hơn (tức là khi yêu cầu điều tiết tăng lên) thì bước sóng mà mắt muốn có để hội tụ vào võng mạc sẽ thay đổi một cách hệ thống. Bước sóng mà mắt muốn có để hội tụ vào võng mạc có thể được vẽ biểu đồ như là một hàm số của yêu cầu điều tiết. Cần chú ý rằng mặc dù bước sóng chọn lọc được giảm một cách hệ thống khi yêu cầu điều tiết tăng, chức năng này chỉ giảm đến khoảng 550 nm. Ngay cả đối với những yêu cầu điều tiết cao, mắt thường vẫn không hội tụ các bước sóng ngắn hơn khoảng 500 nm.

Việc hệ thống thị giác không sử dụng được toàn bộ khoảng màu có thể là do khả năng xử lí không gian, thời gian, và độ sáng tương đối kém của các nơ-ron hệ thống thị giác đóng vai trò truyền thông tin bước sóng ngắn. So với các thành phần thần kinh có vai trò xử lí thông tin cho các bước sóng màu lục, màu vàng, và màu đỏ, thì các thành phần xử lí thông tin cho ánh sáng màu lam (tức là các bước sóng ngắn) có khả năng phân giải không gian và thời gian tương đối thấp (tức là về một khía cạnh nào đó, thị lực thấp hơn và cảm thụ kém hơn đối với ánh sáng nhấp nháy) và về căn bản chúng dường như không góp phần vào sự cảm nhận độ sáng.

Lí do của việc hội tụ chọn lọc các bước sóng ngắn hơn tương đối khi nhìn gần rất rõ ràng. Bước sóng ánh sáng càng ngắn thì tổng công suất khúc xạ của mắt càng lớn. Do đó bằng cách hội tụ các bước sóng dài cho nhìn xa, nhưng các bước sóng ngắn hơn cho nhìn gần, thì mắt không phải thay đổi công suất của thể thủy tinh nhiều như là nếu nó hội tụ cùng một bước sóng cho nhìn xa và nhìn gần. Về mặt này, hệ thống thị giác tiết kiệm được năng lượng điều tiết bằng cách lợi dụng khoảng màu của nó. Thí dụ, giả sử một mắt được hội tụ ánh sáng 600 nm khi nhìn một vật tiêu ở xa. Nếu mắt chuyển sang nhìn vào một điểm ở trước mặt phẳng chính 40 cm, mắt sẽ phải tăng công suất +2.5 D để có ánh sáng đỏ (600 nm) từ một vật ở gần được hội tụ vào võng mạc. Khi hội tụ một bước sóng tương đối ngắn hơn khi nhìn gần (thí dụ 550 nm), mắt chỉ phải điều tiết 2.00-2.25 D để nhìn rõ. Công suất 0.25-0.50 D khác cần thiết sẽ đến từ sắc sai (tức là mắt có tổng công suất khúc xạ cao hơn đối với ánh sáng 550 nm hơn là ánh sáng 680 nm).

Ghi chú: Một số nghiên cứu gần đây đã cho thấy là bước sóng liên hợp với võng mạc ở trạng thái không điều tiết thì ngắn hơn so với các bước sóng điển hình được nêu trong các sách giáo khoa (600 nm hoặc ngắn hơn thay vì 680 nm) và có một độ biến đổi đáng kể giữa các bệnh nhân. Tuy nhiên, những nghiên cứu này đã khẳng định xu hướng của mắt chọn các bước sóng ngắn hơn tương đối để nhìn các vật ở gần.

Khi đánh giá tình trạng khúc xạ của mắt, bạn phải biết rõ bước sóng ánh sáng mà mình đang dùng để đánh giá quang học của mắt và bước sóng ánh sáng mà hệ thống thị giác thích để hội tụ vào võng mạc. “Điều tiết non độ” thường xảy ra khi soi bóng đồng tử gần là một thí dụ điển hình về kết quả của sự không ăn khớp giữa bước sóng ánh sáng được hội tụ ở võng mạc và bước sóng được sử dụng để đánh giá quang hệ của mắt. Khi soi bóng đồng tử gần, bệnh nhân (trong khi nhìn qua **kính nhìn xa** ở phoropter) được yêu cầu nhìn vào máy soi bóng đồng tử ở khoảng cách đo 50 cm (thường thường người ta sử dụng một vật tiêu bằng chữ gắn vào máy soi như là vật định thị). Nếu bệnh nhân đã điều tiết một mức độ tương đương yêu cầu 2.0 D gắn với khoảng cách đo 50 cm, thì bạn sẽ chờ đợi bóng trung hòa (tức là lỗ nhìn của máy soi liên hợp với võng mạc của bệnh nhân). Tuy nhiên, trong hầu hết các trường hợp bạn sẽ thấy bóng “cùng chiều” và sẽ phải thêm công suất cộng khoảng 0.75 D vào kính nhìn xa để có được bóng “trung hòa”.

Thoạt nhìn, dường như là bệnh nhân đơn giản không điều tiết với khoảng cách đo của bạn (mức độ cộng cần thiết để sinh ra bóng trung hòa thường được gọi là “điều tiết non độ”), do đó trước khi thêm cộng vào kính nhìn xa, thì vật tiêu định thị ở máy soi bóng đồng tử cần phải được làm mờ đi đối với bệnh nhân. Nhưng nếu được hỏi thì bệnh nhân sẽ nói rằng vật tiêu định thị nhìn “rõ”. Tại sao lúc đó bạn phải thêm kính cộng để có bóng trung hòa? Sự khác nhau này bắt nguồn từ thực tế là bước sóng chủ đạo quan sát được ở ánh phản chiếu của máy soi bóng đồng tử bằng khoảng 600 nm (tức là với máy soi bóng đồng tử bạn đang đo khúc xạ của mắt bằng ánh sáng đỏ). Tuy nhiên, ở khoảng định thị 50 cm thì hầu hết bệnh nhân thích có bước sóng ánh sáng ngắn hơn hội tụ vào võng mạc. Hậu quả là mắt bệnh nhân dường như sẽ điều tiết non độ cho ánh sáng đỏ. Bạn có thể trung hòa viễn thị thấy được ở soi bóng đồng tử gần bằng cách thêm kính cộng vào kính cho thị lực tốt nhất. Bản chất là bạn đang giảm yêu cầu điều tiết để bệnh nhân chọn ánh sáng đỏ hội tụ vào võng mạc.

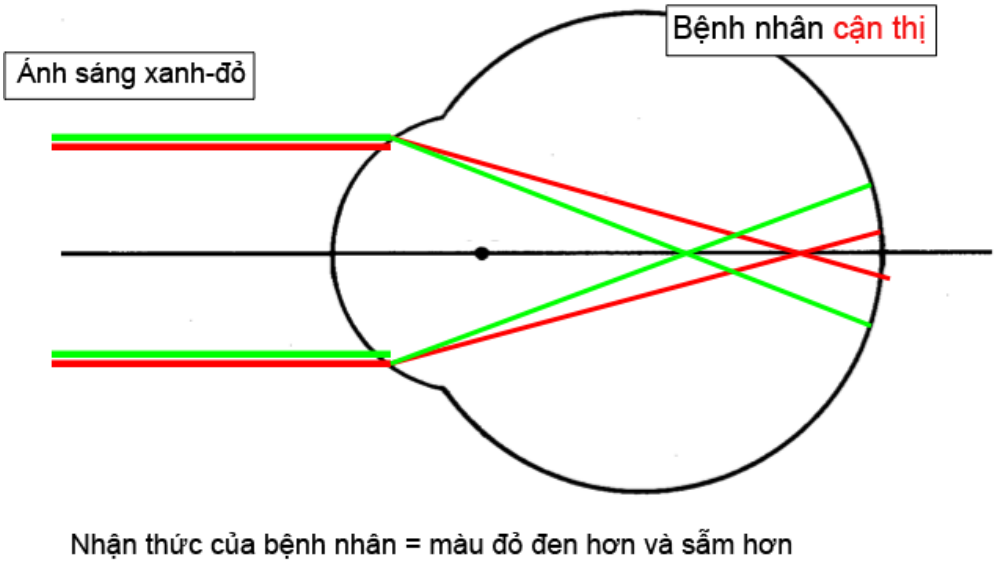
Ghi chú: nếu bước sóng chủ đạo của ánh phản chiếu ở máy soi bóng đồng tử không phải là màu đỏ thì kết quả soi bóng đồng tử thường sẽ không phù hợp với kết quả chủ quan. Về mặt này, may mắn là mắt thích có ánh sáng đỏ hội tụ vào võng mạc ở vô cực. Bạn có thể thay đổi bước sóng chủ đạo của ánh phản chiếu của máy soi bóng đồng tử bằng cách đặt một kính lọc “màu” ở trước nguồn sáng của máy soi (soi bóng đồng tử màu). Thí dụ, nếu bạn đặt kính lọc xanh ở máy soi bóng đồng tử thì sẽ thấy kết quả soi bóng đồng tử là trừ cao hơn/cộng thấp hơn so với kết quả chủ quan.

Khả năng sử dụng khoảng màu để giảm lực điều tiết cần thiết khi nhìn một vật ở gần dường như là một hiện tượng “học được”. Khác với bệnh nhân người lớn, trẻ em dưới khoảng 3.5 tuổi không thể hiện kiểu ưu ái bước sóng giống như ở người lớn. Ở trẻ em tuổi này, không thể (với bất kì yêu cầu điều tiết nào) dự đoán được bước sóng nào sẽ hội tụ vào võng mạc. Trong khoảng 3.5 đến 5.0 tuổi, bắt đầu thích có các bước sóng dài hội tụ vào võng mạc khi nhìn các vật ở xa. Tuy nhiên, trẻ em trong khoảng tuổi này thường không chọn có các bước sóng ngắn hội tụ vào võng mạc khi nhìn gần (tức là chúng không lợi dụng các khoảng màu của mình). Sau khoảng 6 tuổi, hầu hết trẻ em có kiểu ưu ái bước sóng điển hình của người lớn (tức là các bước sóng đỏ cho nhìn xa, các bước sóng ngắn hơn cho nhìn gần). Tuy nhiên, dường như là một số người, vì bất kì lí do nào, không bao giờ học cách sử dụng các khoảng màu để có lợi cho họ. Những bệnh nhân này có thể biểu hiện “điều tiết quá độ” bất thường khi soi bóng đồng tử gần.

TEST XANH-ĐỎ

Phương pháp lâm sàng thông dụng nhất dựa trên sắc sai là test xanh-đỏ (test lưỡng sắc). Trong test xanh-đỏ, người ta thêm kính cộng khoảng 0.5 D vào kính cho thị lực tốt nhất và nói bệnh nhân chú ý quan sát một bảng thị lực có 2 nửa xanh/đỏ ở vô cực quang học trong một phòng tối. Yêu cầu bệnh nhân cho biết màu của nền có các chữ đen/sẫm màu nhất. Bình thường, vì cả tiêu điểm màu đỏ và tiêu điểm màu xanh đều nằm trong dịch kính với tiêu điểm màu đỏ gần võng mạc hơn nên bệnh nhân sẽ nói rằng các chữ ở nửa đỏ "sẫm hơn" (xem Hình 8.17). Kính cộng ở phoropter sẽ được giảm dần (bản chất là di chuyển toàn bộ khoảng màu ra sau về phía võng mạc) đến khi bệnh nhân nói rằng các chữ sẫm như nhau ở nửa đỏ và nửa xanh (tức là tiêu điểm màu đỏ ở sau võng mạc còn tiêu điểm màu xanh ở một khoảng cách tương đương trước võng mạc) hoặc các chữ ở nửa xanh hơi sẫm hơn (tức là tiêu điểm màu xanh ở gần võng mạc hơn). Vì khoảng màu giữa màu xanh và màu đỏ được sử dụng ở hầu hết các máy chiếu thị lực là khoảng 0.36 D nên thường cần khoảng 0.5 D từ nửa đỏ chữ sẫm hơn tới nửa xanh chữ sẫm hơn.

Ghi chú: Test xanh-đỏ sử dụng sắc sai của mắt để xác định vị trí của tiêu điểm thứ hai so với võng mạc. Nó chủ yếu phụ thuộc vào đặc tính tán sắc của mắt bệnh nhân. Test này không phụ thuộc vào khả năng phân biệt các màu của bệnh nhân. Dù cho bệnh nhân có bị "mù màu" thì vẫn sử dụng được test xanh-đỏ. Trong trường hợp này bạn chỉ cần thay đổi hướng dẫn và yêu cầu bệnh nhân nhận biết bên (chứ không phải màu) của bảng thị lực (tức là bên phải hoặc bên trái) có các chữ sẫm màu nhất.



Hình 8.17: *Test xanh-đỏ dựa vào sắc sai*

Một số người không đáp ứng bình thường đối với test xanh-đỏ. Trong một số trường hợp, bệnh nhân sẽ nói rằng các chữ ở bên đỏ bao giờ cũng sẫm hơn. Cho dù bạn tăng công suất trừ/giảm công suất cộng ở phoropter với một mức độ đáng kể. Có thể là những người này có một xu hướng rất mạnh có các bước sóng dài của ánh sáng hội tụ ở võng mạc khi nhìn một vật ở xa. Ở những người này, test xanh đỏ không chính xác bởi vì khi giảm công suất cộng ở phoropter thì các bệnh nhân này điều tiết để giữ cho các bước sóng màu đỏ hội tụ vào võng mạc. Test xanh-đỏ được thực hiện trong phòng tối để giảm số lượng tín hiệu về khoảng cách của vật tiêu xanh/đỏ để cho hầu hết bệnh nhân sẽ cho phép các bước sóng không phải màu đỏ hội tụ ở võng mạc. Do đó, một lí do test này được thực hiện trong phòng tối là để che giấu (về một khía cạnh nào đó) vị trí thực của màn ảnh, do đó giảm thiểu xu hướng là hầu hết người lớn hội tụ chọn lọc ánh sáng đỏ cho các vật tiêu ở xa.

ẢNH HƯỞNG CỦA SẮC SAI ĐỐI VỚI CHỨC NĂNG THỊ GIÁC

Đối với một khoảng cách nhìn đã cho, ở bất kì một thời điểm nào, chỉ có một bước sóng ánh sáng từ vật sẽ được hội tụ vào võng mạc; tất cả các bước sóng ánh sáng khác từ vật sẽ lệch tiêu, do đó sinh ra một loạt các vòng mờ trên võng mạc. Do chất lượng ảnh võng mạc chắc chắn sẽ cải thiện khi loại trừ các vòng mờ tạo ra bởi các bước sóng không hội tụ vào võng mạc, có vẻ hợp lí là thị lực cũng cải thiện nếu chỉ sử dụng một bước sóng ánh sáng để chiếu sáng một bảng thị lực. Đáng chú ý là, nếu sử dụng ánh sáng đơn sắc để chiếu sáng một bảng thị lực (trong khi đảm bảo rằng độ sáng với ánh sáng đơn sắc cũng như độ sáng của ánh sáng trắng) thì các giá trị thị lực đo được cũng không bị ảnh hưởng đáng kể. Thị lực tương phản của các tần số không gian cao và trung bình sẽ tăng, nhưng khả năng phát hiện các tần số không gian cao (thị lực Snellen là đánh giá độ phân giải tần số không gian cao của mắt) sẽ không bị ảnh hưởng nhiều lắm. Trong thực tế, cho dù độ sắc sai ở mắt được tăng gấp đôi một cách nhân tạo, khả năng phân giải tần số không gian cao của mắt về căn bản không bị ảnh hưởng.

Người ta cho rằng ảnh hưởng có hại của sắc sai đối với chức năng của mắt bị giảm thiểu bởi các yếu tố sau:

1. **Kích thước đồng tử:** Đồng tử giảm thiểu ảnh hưởng của sắc sai bằng cách hạn chế kích thước các vòng mờ của các bước sóng không hội tụ vào võng mạc.
2. **Hấp thụ chọn lọc bởi các môi trường của mắt:** Một phần ảnh hưởng của sắc sai được giảm bởi sự hấp thụ chọn lọc một số bước sóng ánh sáng nhất định. Nói một cách cụ thể, sắc tố hoàng điểm và (ở những người già) thể thủy tinh ưu ái hấp thụ ánh sáng bước sóng ngắn, do đó giảm ảnh hưởng của các vòng mờ do ánh sáng màu lam.
3. **Các cơ chế thần kinh của võng mạc:** Phần lớn các nơ-ron ở võng mạc của động vật linh trưởng đáp ứng chọn lọc với một khoảng giới hạn các bước sóng kích thích. Kết quả là một nơ-ron chọn lọc cho ánh sáng đỏ sẽ không bị ảnh hưởng đến một mức độ đáng kể bởi một ánh sáng màu lam lệch tiêu.
4. **Quang học của hoàng điểm:** Có sự thay đổi lớn về chiết suất ở mặt phân cách giữa võng mạc và dịch kính (võng mạc có chiết suất cao hơn đáng kể). Do đó, mặt phân cách dịch kính-võng mạc có thể hoạt động như là một mặt khúc xạ âm, đặc biệt là hoàng điểm. Người ta đã tính được rằng sắc sai của mặt phân cách dịch kính-võng mạc có thể hủy một phần sắc sai của các thành phần khúc xạ dương là nhãn cầu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- AH Tunnacliffe Introduction to Visual Optics. ABDO College of Education.Kent. 1984.
- Bennett và Rabbetts. Clinical Visual Optics. Butterworths, London và Boston.1989.
- Freeman MH. Optics. Butterworth Heinrnann, Oxford. 1990.
- Ivanoff, I, Les Aberrations de 'Oeil, Editions de la Revue d'Optique Theorique et Instrumentale, Paris, 1953.
- Smith & Atchison. Mắt và visual optical instruments. Cambridge University Press, Cambridge, UK.1997.