BrienHoldenVisionInstitute

TỔNG HỢP THỜI GIAN, HIỆU ỨNG STILES-CRAWFORD

TÁC GIẢ

Thomas Salmon: Đại học bang Northeastern, Hoa kì

THẨM ĐỊNH

Scott Steinman: Đại học khúc xạ nhãn khoa Nam California, Hoa kì

CHƯƠNG NÀY BAO GỒM CÁC NỘI DUNG:

- Định luật Ricco
- Tổng hợp thời gian và định luật Bloch
- Hiệu ứng Stiles-Crawford
- Tóm tắt về võng mạc hai chiều

ĐỊNH LUẬT RICCO

Định luật Ricco (tổng hợp không gian) nói rằng trong phạm vi đường kính tới hạn, tổng số lượng tử cần thiết để phát hiện ngưỡng là không đổi. Trích từ Schwartz, trang 47:

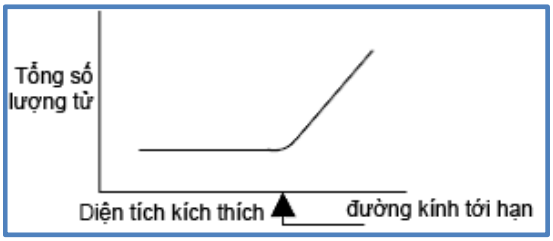
Toàn bộ tổng hợp không gian được miêu tả toán học bằng định luật Ricco:

IA = K

Trong đó, I = cường độ kích thích (lượng tử/diện tích)

A = diện tích kích thích

K = hằng số



Hình 10-1: *Định luật Ricco*

Chú ý rằng, theo định luật Ricco, phần tử không đổi là tích số của I và A chứ không phải I. Bạn có thể kiểm tra điều này bằng cách tính các đơn vị ở phương trình. Tích số của I (lượng tử/diện tích) và A (diện tích) là một giá trị bằng lượng tử, do giản ước các số hạng diện tích. Theo định luật Ricco, trong phạm vi đường kính tới hạn, số lượng tử cần thiết để đạt tới ngưỡng là không đổi.

$$\left(\frac{\text{lượng tử}}{\text{diện tích}}\right)\left(\frac{\text{diện tích}}{1}\right) = \text{lượng tử}$$

Mặt khác, nếu bạn thay đổi giá trị của A (tức là đường kính vết sáng) thì giá trị của I không thể giữ nguyên mà phải được thay đổi để cho tích số của I và A không đổi. Để tích số của I và A không đổi thì I và A phải có quan hệ thuận nghịch. Bảng dưới đây minh họa điều này:

ĐỊNH LUẬT RICCO (TIẾP THEO)

Bảng 10-1: *Quan hệ giữa I và A*

I (LƯỢNG TỬ/DIỆN TÍCH)	DIỆN TÍCH	K (HẰNG SỐ)
10	1	10
5	2	10
2	5	10
1	10	10

Hãy xem xét thí dụ câu hỏi kiểm tra sau:

Theo định luật Ricco (tổng hợp không gian), nếu vết sáng nhỏ hơn đường kính tới hạn thì cường độ kích thích (lượng tử/diện tích) cần thiết để phát hiện ngưỡng:

A. Sẽ không đổi đối với mọi kích thước vết sáng.

B. Phải tăng theo kích thước vết sáng tăng.

C. Phải giảm theo kích thước vết sáng giảm.

D. Không liên quan với kích thước vết sáng.

TỔNG HỢP THỜI GIAN VÀ ĐỊNH LUẬT BLOCH

Giống như hệ thống thị giác tổng hợp ánh sáng mà nó thu được trên một diện tích, nó cũng tổng hợp ánh sáng tập hợp được theo thời gian. Khoảng thời gian mà ánh sáng được tổng hợp gọi là **thời khoảng tới hạn** (critical duration). Sự tổng hợp theo thời gian được gọi là **tổng hợp thời gian** (temporal summation).

Hệ thống nhìn ban đêm có thời khoảng tới hạn tương đối dài 100-200 mili giây, toàn bộ ánh sáng thu được trong khoảng thời gian này được tổng hợp và được xử lí như là một chớp sáng. Nếu tổng số lượng tử vượt quá ngưỡng phát hiện thì ánh sáng sẽ thấy được. Bất kể số chớp sáng phát ra là bao nhiêu trong thời khoảng tới hạn, tất cả chúng đều được nhìn thấy là một. Để 2 chớp sáng được phân giải thời gian là 2, chúng phải được tách riêng về thời gian trong ít nhất là bằng thời khoảng tới hạn. Hình Schwartz 3-18 minh họa điều này.

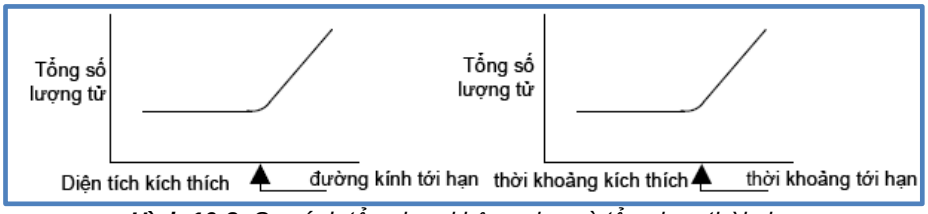
Hệ thống nhìn ban ngày có thời khoảng tới hạn 10-50 mili giây tương đối ngắn được minh họa trong Hình Schwartz 3-19. Để các lượng tử từ 2 chớp sáng cộng lại thì 2 chớp sáng phải được chiếu nối tiếp rất nhanh. Điều này mang lại cho hệ thống nhìn ban ngày độ phân giải thời gian cao, nhưng độ nhạy kém hơn hệ thống nhìn ban đêm.

Thời khoảng tới hạn của tổng hợp thời gian có thể thay đổi theo các điều kiện đo. Thời khoảng tới hạn dài hơn của hệ thống nhìn ban đêm cho phép nó thu thập các photon theo thời gian khi có ít photon. Thời khoảng tới hạn không bị ảnh hưởng bởi bước sóng.

Tương đương thời gian của định luật Ricco (tổng hợp không gian) là **định luật tổng hợp thời gian Bloch**. Định luật này nói rằng trong thời khoảng tới hạn, tổng số lượng tử cần thiết để đạt ngưỡng vẫn không đổi cho các thời khoảng chớp sáng khác nhau. Quá thời khoảng tới hạn, ánh sáng cần thiết để phát hiện tăng lên (Hình Schwartz 3-20). Điều này được biểu diễn bằng công thức:

$$I(t) = K$$

Do "I" được biểu diễn dưới dạng lượng tử/thời gian, tích số của "I" và "t" là tổng số lượng tử cần thiết để phát hiện. Định luật Bloch còn được gọi là **tương hoán thời gian-cường độ** (time-intensity reciprocity**)**, bởi vì cần giảm cường độ kích thích (I) để phát hiện ánh sáng khi thời khoảng (t) tăng. Trong thời khoảng tới hạn, cường độ kích thích và thời khoảng tỉ lệ nghịch với nhau, tức là chúng có quan hệ thuận nghịch.



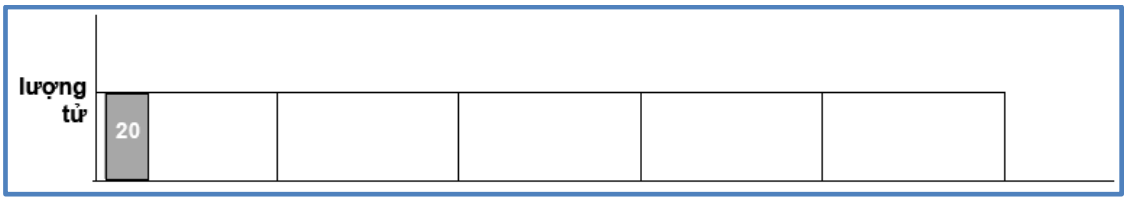
Hình 10-2: *So sánh tổng hợp không gian và tổng hợp thời gian*

THÍ DỤ GIẢ ĐỊNH CỦA ĐỊNH LUẬT BLOCH

Định luật Bloch (tổng hợp thời gian) áp dụng trong thời khoảng tới hạn. Điều gì xảy ra ngoài thời khoảng tới hạn? Lúc này, định luật Bloch không còn hiệu lực, và số lượng tử chứa trong ánh sáng phải được tăng lên, như được minh họa bằng phần đi lên của đường cong bên phải ở Hình 10-2.

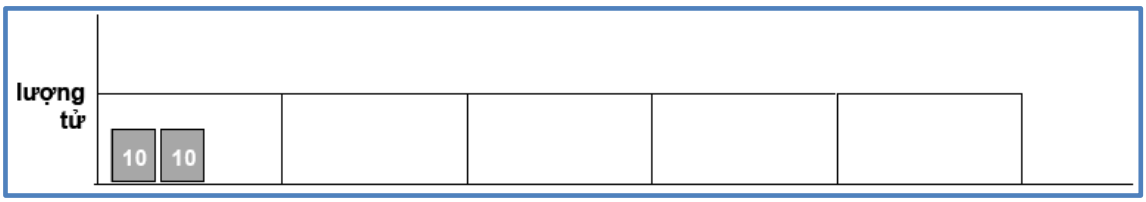
Các hình 10-3 đến 10-7 minh họa định luật Bloch bằng dữ liệu giả định từ một thí nghiệm đo ngưỡng phát hiện ánh sáng cho các thời gian phơi sáng (thời khoảng) khác nhau.

Giả sử thời khoảng tới hạn là 4 mili giây và 20 lượng tử phải được phát ra trong thời gian đó để có thể nhìn thấy được. Trong Hình 10-3, một nguồn sáng có thời khoảng 1 mili giây, và cường độ 20 lượng tử/mili giây được đưa ra. Tổng số lượng tử được phát ra trong chớp sáng là 20 lượng tử/mili giây x 1 mili giây = 20 lượng tử. Toàn bộ 20 lượng tử nằm trong thời khoảng tới hạn, do đó ánh sáng sẽ thấy được.



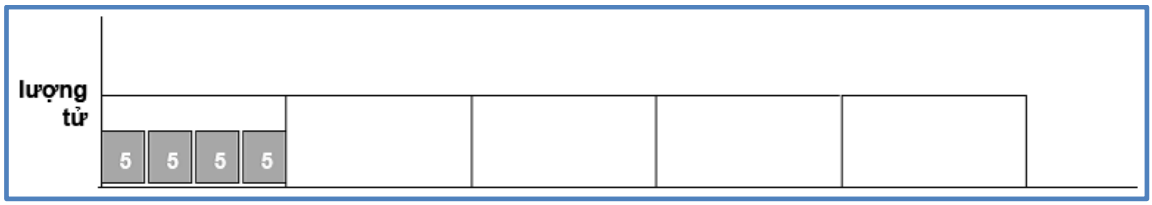
Hình 10-3: *Một chớp sáng 1 mili giây có cường độ 20 lượng tử/mili giây*

Trong Hình 10-4, một nguồn sáng có thời khoảng 2 mili giây, và cường độ 10 lượng tử/mili giây được đưa ra. Tổng số lượng tử được phát ra trong chớp sáng là 10 lượng tử/mili giây x 2 mili giây = 20 lượng tử. Toàn bộ 20 lượng tử nằm trong thời khoảng tới hạn, do đó ánh sáng sẽ thấy được.



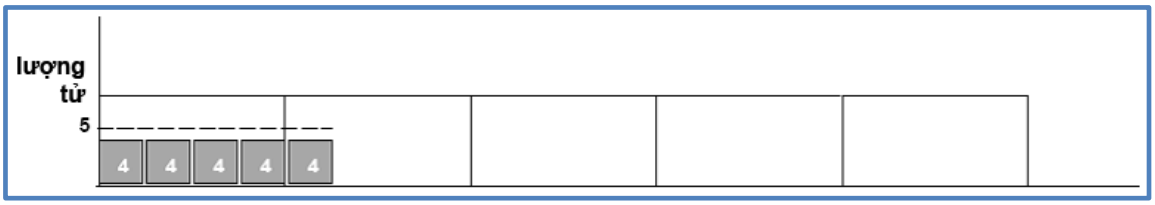
Hình 10-4: *Một chớp sáng 2 mili giây có cường độ 10 lượng tử/mili giây*

Trong Hình 10-5, một nguồn sáng có thời khoảng 4 mili giây, và cường độ 5 lượng tử/mili giây được đưa ra. Tổng số lượng tử được phát ra trong chớp sáng là 5 lượng tử/mili giây x 4 mili giây = 20 lượng tử. Toàn bộ 20 lượng tử nằm trong thời khoảng tới hạn, do đó ánh sáng sẽ thấy được.



Hình 10-5: *Một chớp sáng 4-mili giây có cường độ 5 lượng tử/mili giây*

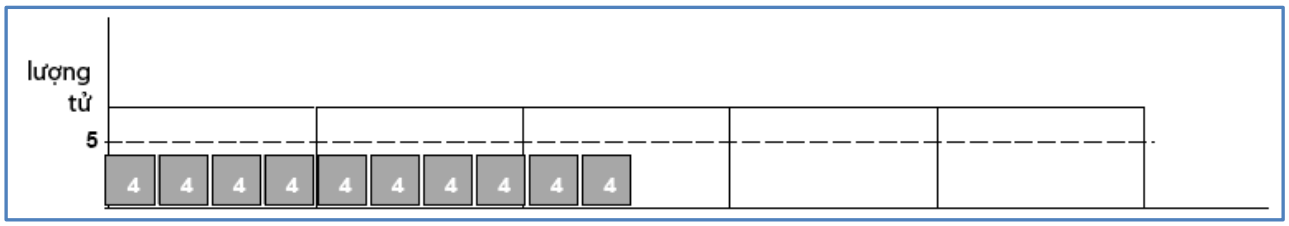
Trong Hình 10-6, một nguồn sáng có thời khoảng 5 mili giây, và cường độ 4 lượng tử/mili giây được đưa ra. Tổng số lượng tử được phát ra trong chớp sáng là 4 lượng tử/mili giây x 5 mili giây = 20 lượng tử. Không phải tất cả 20 lượng tử nằm trong thời khoảng tới hạn mà chỉ có 16. Số này không đủ để đạt ngưỡng, do đó ánh sáng sẽ không được thấy. Chúng ta sẽ phải tăng cường độ tới 5 lượng tử/mili giây để phát hiện được. Bây giờ, nếu ánh sáng 5 mili giây có cường độ 5 lượng tử/mili giây thì tổng số lượng tử sẽ bằng 5 lượng tử/mili giây x 5 mili giây = 25 lượng tử. Trong số này, 20 nằm trong thời khoảng tới hạn, và ánh sáng sẽ thấy được.



Hình 10-6: *Một chớp sáng 5 mili giây có cường độ 4 lượng tử/mili giây*

THÍ DỤ GIẢ ĐỊNH CỦA ĐỊNH LUẬT BLOCH (TIẾP THEO)

Trong Hình 10-7, ánh sáng có thời khoảng 10 mili giây và cường độ 4 lượng tử/mili giây. Tổng số lượng tử được phát ra trong chớp sáng là 4 lượng tử/mili giây x 10 mili giây = 40 lượng tử. Tuy nhiên, trong số 40 lượng tử này, chỉ có 16 nằm trong thời khoảng tới hạn, và lượng này không đủ để phát hiện. Chúng ta phải tăng cường độ tới 5 lượng tử/mili giây. Lúc này tổng số lượng tử được phát sẽ bằng 5 lượng tử/mili giây x 10 giây = 50 lượng tử.

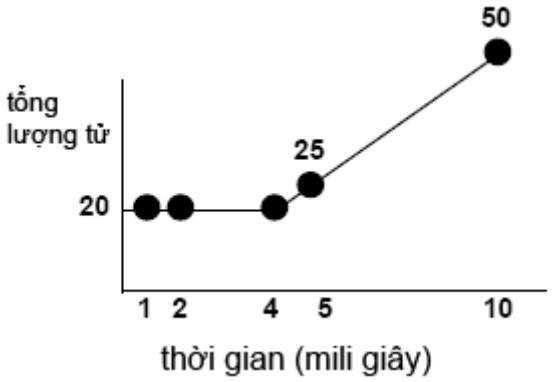


Hình 10-7: *Một chớp sáng 10-mili giây có cường độ 4 lượng tử/mili giây*

Những kết quả của thực nghiệm giả định này được ghi ở Bảng 10.2 bên dưới và được biểu đồ hóa ở Hình 10.8.

Bảng 10-2: *Tổng số lượng tử cần để phát hiện được cho các thời khoảng khác nhau.*

	CƯỜNG ĐỘ KÍCH THÍCH (LƯỢNG TỬ/MILI GIÂY)	THỜI KHOẢNG (MILI GIÂY)	TỔNG SỐ LƯỢNG TỬ
HÌNH 10-3	20	1	20
HÌNH 10-4	10	2	20
HÌNH 10-5	5	4	20
HÌNH 10-6	5	5	25



Hình 10-8: *Dữ liệu của bảng 10-2 được vẽ trên biểu đồ*

HIỆU ỨNG STILES-CRAWFORD

Các chùm sáng hẹp đi vào các phần chu vi của đồng tử, sau khi khúc xạ sẽ tới võng mạc ở các góc chéo ngày càng tăng so với các chùm sáng trục (tới vuông góc hơn với mặt võng mạc). Các tế bào nón hoạt động giống như **các ống dẫn sóng** (wave-guides), để ánh sáng đi theo đường hình phễu từ các đoạn trong rộng hơn tới các đoạn ngoài hẹp hơn, do đó chúng thu nạp photon hiệu quả nhất khi chùm sáng tới đến thẳng theo trục của chúng. Điều này được minh họa trong Schwartz (Hình 3-21).

Các chùm sáng đi vào tế bào nón ở một góc lớn hơn so với chùm song song với tế bào nón sẽ kém hiệu quả hơn trong việc kích thích các tế bào nón. Do điều này, ánh sáng đi vào phần chu vi đồng tử sẽ được thấy tối hơn ánh sáng đi vào ở gần trục. Hiện tượng này được gọi là hiệu ứng Stiles-Crawford loại một, hoặc chỉ gọi là **hiệu ứng Stiles-Crawford**. Hiệu ứng Stiles-Crawford loại hai liên quan với sắc giác.

HIỆU ỨNG STILES-CRAWFORD (TIẾP THEO)

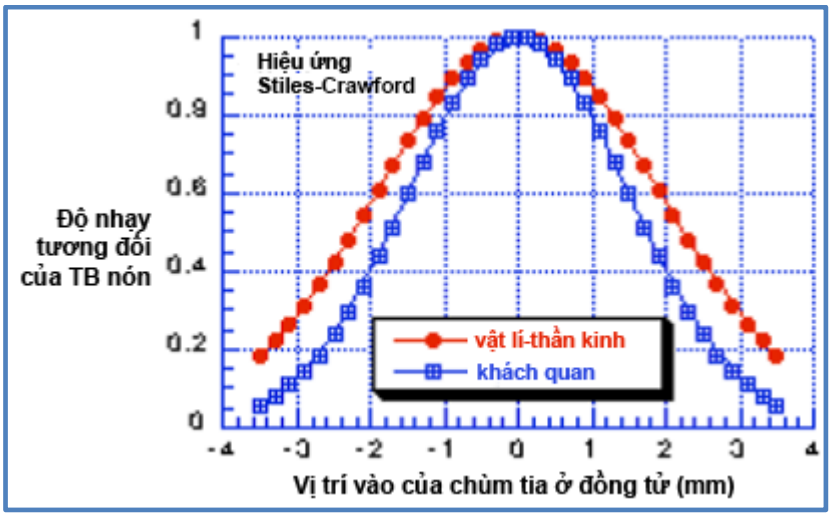
Trích từ một bài báo của He, Marcos và Burns ở Tạp chí Optical Society of America (số tháng 10, 1999, trang 2363-2369)

> *Độ sáng biểu kiến của một nguồn sáng thay đổi khi điểm vào của nó được di chuyển từ một vị trí đến một vị trí khác ở trong đồng tử của mắt người. Sự thay đổi hiệu suất sáng tương đối theo vị trí đồng tử này được gọi là hiệu ứng Stiles-Crawford loại một (SCE-I). Thay đổi vị trí đồng tử vào của ánh sáng tới gắn với sự thay đổi góc của ánh sáng ở võng mạc, do đó thay đổi độ sáng theo vị trí đồng tử vào là một số đo độ nhạy góc của các tế bào nón. Vị trí đỉnh của hàm hiệu suất sáng được hiểu là vị trí ở trong đồng tử mà các tế bào nón được hướng vào. Hàm hiệu suất sáng điển hình có dạng một phân phối Gauss (hoặc, một cách tương đương, logarit của độ nhạy được biểu diễn bằng một thay đổi dạng parabol theo vị trí đồng tử), tức là:*

$$S_{\text{đồng tử}} = S_0 \times 10^{-\rho\left\{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2\right\}}$$

Trong đó, S_0 là độ nhạy ở vị trí trong đồng tử với hiệu suất sáng tối đa (ở vị trí x_0 , y_0), x và y là các vị trí đo ở trong đồng tử, và rho (bằng nghịch đảo mili mét vuông) là hệ số không gian (rho càng lớn thì hướng tính càng cao).

Chỉ xét một biên dạng 2 chiều của đồng tử, 2 thí dụ hiệu ứng Stiles-Crawford được vẽ biểu đồ trong Hình 10.9, dưới. Đường cong hẹp hơn (hướng tính lớn hơn) là hiệu ứng Stiles-Crawford được đo khách quan (ρ = 0.1), và đường cong bên trên là kết quả của các số đo vật lí thần kinh (ρ = 0.06).



Hình 10-9: *Biên dạng hiệu ứng Stiles-Crawford với các giá trị rho 0.06 (đường cong màu đỏ ở trên) và 0.1(đường cong màu xanh ở dưới).*

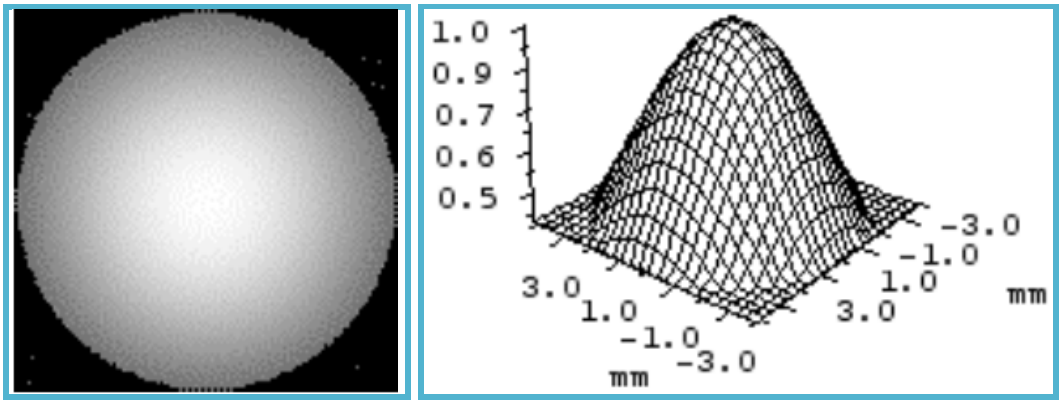
TẦM QUAN TRỌNG LÂM SÀNG CỦA HIỆU ỨNG STILES-CRAWFORD

Susana Marcos, một nhà khoa học làm việc tại Instituto de Optica "Daza de Valdéz" (CSIC) ở Madrid, Tây ban nha, gợi ý rằng đo hiệu ứng Stiles-Crawford có thể cho phép phát hiện sớm các bệnh của tế bào quang thụ: " do hướng tính tế bào quang thụ bình thường đòi hỏi một hình thái tế bào nón bình thường và mối quan hệ với khoảng ngoại bào, do đó hướng tính tế bào quang thụ quan trọng về mặt lâm sàng."

(Marcos S, Burns SA. Cones spacing and waveguide properties from cone directionality measurements. J Opt Soc Am A16, 995-1004 (1999)).

Hiệu ứng Stiles-Crawford còn có những áp dụng lâm sàng quan trọng khác. Sau phẫu thuật khúc xạ, bệnh nhân có thể nhìn kém hơn khi đồng tử to do quang sai nhiều ở giác mạc chu vi. Những bệnh nhân có đồng tử nhỏ có thể có thị lực tốt hơn so với những người có đồng tử to. Hiệu ứng Stiles-Crawford giúp giảm nhẹ những tác dụng bất lợi của quang sai ở chu vi bởi vì nó giảm cường độ sáng của các tia đi vào chu vi đồng tử. Do đó, các tia đi vào vùng quang học ở chu vi có quang sai trở thành tối hơn và ít gây khó chịu hơn. Gần như thể là đồng tử được che bằng một **kính lọc độ đen trung tính loại bỏ hình nhiễu xạ** (Hình 10-10). Do đó, hiệu ứng Stiles-Crawford có thể giảm **kích thước đồng tử hiệu dụng**, làm cho nó trở thành nhỏ hơn kích thước đồng tử thực. Nghiên cứu của Salmon và West đã cho các thí dụ về sự khác nhau giữa kích thước đồng tử thực và kích thước đồng tử hiệu dụng.

HIỆU ỨNG STILES-CRAWFORD (TIẾP THEO)



Hình 10-10: *Hiệu ứng Stiles-Crawford đôi khi được mô tả như là sự loại bỏ hình nhiễu xạ (apodization) của đồng tử được thấy ở đây bằng biểu đồ thang độ xám (trái) hoặc biểu đồ bề mặt (bên phải)*

Một lợi ích khác của hiệu ứng Stiles-Crawford là nó giúp giảm ảnh hưởng của ánh sáng tán xạ trong mắt lên ảnh võng mạc. Ánh sáng tán xạ trong mắt đi tới các tế bào nón theo một góc chéo, nhưng nhờ có hiệu ứng Stiles-Crawford, ánh sáng này không ảnh hưởng nhiều đến ánh sáng tạo thành ảnh võng mạc. Nếu không có hiệu ứng Stiles-Crawford thì ánh sáng tán xạ sẽ "làm nhạt màu" ảnh, giảm tương phản của ảnh và giảm thị lực.

Các tế bào nón thường được hướng về tâm đồng tử để tăng tối đa sự thu nạp photon. Nếu vì một lí do nào đó, đồng tử bị lệch, các tế bào nón sẽ dần dần thay đổi hướng của chúng để hướng về phía tâm đồng tử mới. Các thí nghiệm đã cho thấy là nếu tâm đồng tử bị lệch tạm thời thì các tế bào nón sẽ di chuyển, và nếu đồng tử đúng tâm được phục hồi thì các tế bào nón sẽ tự định lại hướng để trở lại các vị trí ban đầu của chúng (Hình Schwartz 3-22). Điều này cho thấy rằng các tế bào nón có thể di chuyển và tự định hướng để có hiệu quả tối đa.

Không có hiệu ứng Stiles-Crawford cho các tế bào que bởi vì đoạn trong của các tế bào que không có vai trò dẫn sóng, và kết quả là các tế bào que không nhận được bất kì lợi ích giảm quang sai nào từ hiệu ứng Stiles-Crawford. Tuy nhiên, điều này không phải là vấn đề bởi vì dù sao thì nhìn ban đêm cũng không thể có thị lực tốt, do các vùng tổng hợp không gian lớn hơn. Thí dụ, nếu các quang sai làm mờ ảnh võng mạc tới 20/40 thì ảnh hưởng của các quang sai sẽ không nhận thấy được bởi vì hệ thống nhìn ban đêm chỉ có khả năng thị lực 20/200.

Trong trường hợp nhìn ban đêm, điều có ích là các tế bào que KHÔNG có hiệu ứng Stiles-Crawford. Chúng nhận ánh sáng từ một góc rộng hơn, do đó có thể thu thập nhiều photon hơn là tế bào nón. Thực tế, chúng tận dụng đường kính đồng tử rộng. Kết quả là độ nhạy tốt hơn trong điều kiện độ rọi giảm.

Các câu hỏi kiểm tra mẫu về hiệu ứng Stiles-Crawford từ sách Optometry Examination Review của Casser et al, 1986:

#418 Ở mắt người trẻ, yếu tố góp phần vào "ánh sáng tán xạ" nào trong số dưới đây ảnh hưởng ít nhất đối với thị lực do hiệu ứng Stiles-Crawford?

A. Sự tán xạ từ giác mạc

B. Sự tán xạ từ thể thủy tinh

C. **Sự phản xạ từ trong võng mạc**

D. Sự truyền qua mống mắt

E. Không có câu nào trong số trên

#453 Ảnh hưởng thị giác của ánh sáng tán xạ nội nhãn bắt nguồn từ ánh sáng tán xạ bởi võng mạc thần kinh có thể được giảm bằng:

A. Vết Maxwell

B. **Hiệu ứng Stiles-Crawford**

C. Tính lưỡng triết của các sợi Henle

D. Hiện tượng Troxler

E. Hiệu ứng Broca-Sulzer

TÓM TẮT VỀ VÕNG MẠC HAI CHIỀU

Bản chất hai chiều của võng mạc giúp chúng ta nhìn được ở một dải rộng các độ sáng, từ độ sáng rất yếu trong một đêm tối tới độ sáng của một ngày nắng chói. Mắt chúng ta có thể điều chỉnh và nhìn rõ ở khoảng chênh lệch 10 đơn vị loga ở độ sáng vật.

Hệ thống nhìn ban đêm đã được tối ưu hóa để hoạt động trong điều kiện ánh sáng yếu. Nó chuyên biệt ở độ nhạy cao, tức là phát hiện các vật ở độ rọi yếu, khi các photon thưa thớt. Các đặc điểm độc đáo dưới đây của hệ thống nhìn ban đêm làm tăng độ nhạy, nhưng giảm độ phân giải của mắt:

- Các vùng tổng hợp không gian lớn hơn, thu thập các photon trên một diện tích rộng hơn
- Thời gian tới hạn của tổng hợp thời gian dài, do đó nó có thể thu thập các photon trong một thời gian dài
- Không có hiệu ứng Stiles-Crawford, do đó các tế bào que có thể thu thập các photon ở góc rộng

Hệ thống nhìn ban ngày hoạt động khi có nhiều ánh sáng, do đó không cần “lục tìm” các photon. Nó có tác dụng cung cấp thông tin chi tiết từ cảnh nhìn. Hệ thống nhìn ban ngày mang lại cho chúng ta độ phân giải không gian (thị lực), phân giải thời gian cao (nhận thức chuyển động) và sắc giác. Các đặc điểm sau làm tăng độ phân giải và thị lực chi tiết, nhưng giảm độ nhạy:

- Các vùng tổng hợp không gian nhỏ hơn (ở hoàng điểm, một tế bào nón cho mỗi tế bào hạch)
- Thời gian tới hạn của tổng hợp thời gian ngắn hơn
- Cấu trúc dẫn sóng và sự chuyển động của tế bào nón gây ra hiệu ứng Stiles-Crawford, nó làm giảm ảnh hưởng của quang sai và ánh sáng tán xạ (nhưng cũng giảm thu nạp photon)
- 3 loại tế bào quang thụ, mỗi loại có một quang sắc tố khác nhau. Đây là cơ sở của sắc giác.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Casser Locke L, Chang FW, Gerstman DR and Pietsch PA. **Optometry Examination Review. Appleton & Lange**, 1986
- Marcos S, Burns SA. **Cones spacing and waveguide properties from cone directionality measurements**. J Opt Soc Am A16, 995-1004 (1999)
- Schwartz SH. **Visual Perception - A Clinical Orientation, 3rd Edition**. Appleton & Lange, Stamford, Connecticut, 2004