دانشگاه فردوسی مشهد
دانشکده مهندسی - گروه کامپیوتر
آزمایشگاه بینایی ماشین

ی رنگی

یکی از سلفی‌های طبیعت

MV Lab
آزمایشگاه بینایی ماشین
گروه مهندسی کامپیوتر
دانشکده مهندسی
دانشگاه فردوسی مشهد
تلفن ۰۵۱۳ ۸۸۰ ۶۱۶۸

نسخه	تهیه کننده	تاریخ	اصلاحات
1.0	سیده الهه ایمانی سینا رستگار	بهار ۹۱	نسخه‌ی اولیه
1.01	حمیدرضا پوررضا	بهار ۹۱	ویرایش و تصحیح

فهرست مطالب

فهرست شکل‌ها

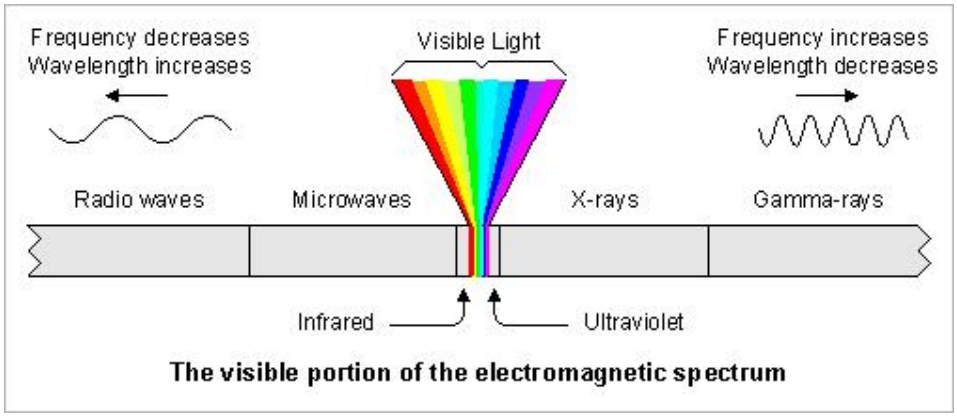
فهرست جداول

۱– مقدمه

مغز و قشر بینایی انسان توانایی پردازش حجم زیادی از داده‌های بصری را دارد، و می‌تواند با سرعت زیاد و به صورت کارآمد، اطلاعات مفید را از داده‌های بصری تشخیص داده و استخراج کند. مطالعات نشان می‌دهد که انسان‌ها تقریبا ۸۰٪ از اطلاعات خارجی خود را به صورت بصری دریافت می‌کنند.

۲– طیف الکترومغناطیس

نور مرئی بخش محدودی از طیف الکترومغناطیسی است که چشم انسان توانایی دیدن(شناسایی و پردازش) آن را دارد. محدوده تغییرات نور مرئی بین رنگ بنفش و قرمز است و این محدوده شامل رنگ‌های آبی، سبز، زرد و نارنجی می‌باشد(شکل ۱).

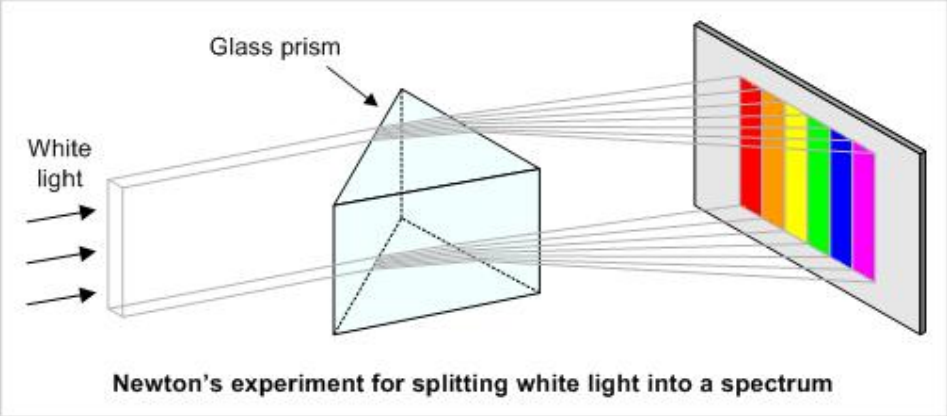


شکل ۱– طیف امواج الکترومغناطیس

عباراتی مثل "قرمز"، "زرد"، "سبز" و "آبی" فقط برچسب‌هایی هستند که برای مربوط کردن آنها به زیرباندهای خاصی از طیف استفاده می‌شود. خارج از محدوده باند مرئی و بالای رنگ بنفش، فرابنفش قرار دارد که جزئی از اشعه خورشید است و باعث سرطان پوست می‌شود. به طور مشابه در زیر رنگ قرمز، مادون قرمز قرار دارد که به صورت گرما دریافت می‌شود.

۳- کشف طیف مرئی

نور سفید ترکیبی از تمام رنگ‌های طیف مرئی است. این واقعیت حدود سال ۱۶۶۵-۱۶۶۶ توسط ریاضیدان و فیزیکدان انگلیسی به نام نیوتون کشف شد. نیوتون با عبور پرتو نور خورشید از یک منشور شیشه‌ای متوجه شد پرتو نور به طیفی از رنگ تفکیک می‌شود(شکل۲).



شکل ۲ - تفکیک نور سفید به طیفی از رنگ توسط نیوتون

حتی پیش از آزمایش معروف نیوتون، افراد دیگری از منشور برای آزمایش با نور استفاده می‌کردند. در واقع این احتمال وجود دارد که عده‌ای از غارنشینان در دهها هزار سال پیش عبور پرتو نور از یک شیشه و شکل‌گیری رنگین‌کمان را مشاهده کرده‌اند.

در زمان نیوتون بیشتر مردم می‌پنداشتند که منشور باعث رنگی کردن نور می‌شود. ولی آزمایشات نیوتون این تصورات را رد کرد. نیوتون ابتدا از یک منشور برای جدا کردن نور سفید خورشید به طیفی از رنگ‌ها (شکل ۲) استفاده کرد. در مرحله بعد از تکه‌ای از کارت با روزنه‌ای روی آن برای عبور فقط یک رنگ (مثلا سبز) استفاده کرد. سپس این رنگ خاص را از منشور دوم عبور داد. تصور نیوتون این بود که اگر منشور باعث رنگی‌شدن نور می شود، پس نور سبزی که وارد منشور دوم می‌شود باید با رنگ دیگری خارج شود. این پدیده که رنگ خارج شده از منشور دوم بدون تغییر باقی می‌ماند، به نیوتون نشان داد که منشور توانایی رنگی کردن نور را ندارد.

در مرحله بعد نیوتون یک منشور وارونه را در برابر طیف خارج شده از منشور اول قرار داد. این عمل باعث ترکیب مجدد رنگ‌های منحصربفرد و تولید نور سفید شد. با این آزمایشات نیوتون اولین فردی بود که ثابت کرد نور سفید از تمام رنگ‌های موجود در طیف مرئی تشکیل شده است و اولین منشور به سادگی این رنگ‌ها را از هم تفکیک کرد.

نیوتون اظهار داشت که یازده رنگ در طیف مرئی وجود دارد. بعدها او این عدد را به هفت کاهش داد تا طیف او با ایده Western درباره هارمونی موزیکال متناسب باشد(بدلیل اینکه هفت آهنگ در یک نت هشتگانه موسیقی وجود دارد). به همین دلیل از ابتدا گفته می‌شد که طیف مرئی شامل رنگ نیلی است، ولی اخیرا بیان می‌شود که طیف مرئی فقط شامل رنگ‌های قرمز، نارنجی، زرد، سبز، آبی و بنفش است.

نتایج مشابه آزمایشات نیوتون به شکل رنگین‌کمان مشاهده می‌شود. رنگین‌کمان با عبور نور خورشید از میان قطرات کوچک آب که هر کدام همانند یک منشور کوچک عمل می‌کنند، ایجاد می شود. در حقیقت سیزده قرن پیش فیزیکدان معروف انگلیسی به نام Roger Bancon اظهار داشت که رنگین‌کمان با انعکاس و شکست نور خورشید از میان قطرات کوچک آب ایجاد می‌شود. در آن زمان او هیچ راهی برای اثبات این موضوع نداشت.

۴–کشف نور مادون قرمز

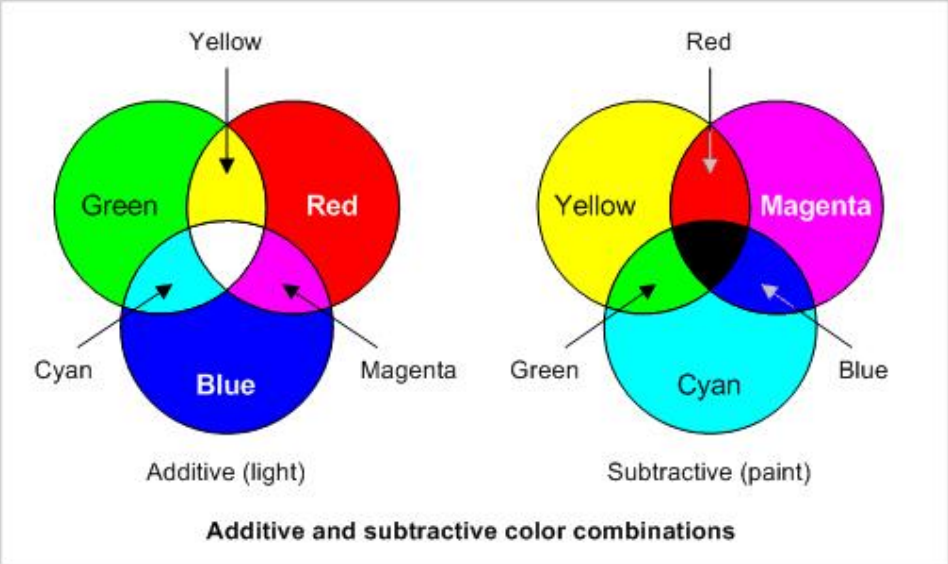
Friedrich Wilhelm Herschel در آلمان متولد شد. در سال ۱۷۵۷ به انگلستان رفت و در آنجا به عنوان یک ستاره شناس و موسیقیدان معروف شناخته شد. او در سال ۱۸۰۰ آزمایشی برای اندازه‌گیری درجه حرارت رنگ‌های متفاوت در طیف انجام داد. Herschel از یک دماسنج برای اندازه‌گیری دمای رنگ‌های متفاوت استفاده کرد و مشاهده کرد که درجه حرارت در رنگ بنفش کمترین مقدار را دارد و با عبور از رنگ‌های آبی، سبز، زرد و نارنجی درجه حرارت افزایش می‌یابد، و در محدوده‌ای از طیف که متعلق به رنگ قرمز است به بیشترین مقدار خود می‌رسد. سپس Herschel دماسنج را به خارج از محدوده قرمز طیف الکترومغناطیسی، در بخشی که چشم انسان هیچ نوری را درک نمی‌کند، منتقل کرد. او متوجه شد که امواج غیرمرئی در این بخش از طیف بیشترین درجه حرارت را دارد. با انجام آزمایشات زیادی Herschel ثابت کرد که این بخش از طیف الکترومغناطیسی که دارای امواج غیرمرئی است، بسیار شبیه به نور مرئی رفتار می‌کنند(به عنوان مثال توانایی بازتابش را دارد). او این بخش از طیف الکتورمغناطیسی را مادون قرمز نامید.

۵– کشف نور فرابنفش

نور فرابنفش توسط فردی به نام Johann Wilhelm Ritter کشف شد. پس از کشف نور مادون قرمز، Ritter تصمیم گرفت آزمایشاتی را بر روی محدوده‌ای از طیف الکتورمغناطیسی که پس از بنفش قرار دارد، انجام دهد. او با دانستن این موضوع که گرد مخصوص کلوراید نقره زمانی که در معرض نور قرار می‌گیرد، سیاه می‌شود، تصمیم گرفت رفتار این ماده را زمانی که در معرض محدوده‌های متفاوتی از طیف قرار می‌گیرد، مشاهده کند. با قرار دادن مقداری از این ماده در معرض محدوده قرمز از طیف الکتومغناطیسی متوجه شد که تغییر رنگ این ماده به آهستگی صورت می‌گیرد. سپس این آزمایش را برای رنگ‌های نارنجی، زرد، سبز، آبی و بنفش در طیف تکرار کرد. با انجام این آزمایش متوجه شد که با حرکت روی طیف الکترومغناطیسی از قرمز تا بنفش سرعت سیاه شدن این ماده افزایش می‌یابد. سپس با قرار دادن مقداری از این ماده در معرض امواج غیرمرئی پس از رنگ بنفش در طیف، متوجه شد که سرعت سیاه شدن این ماده در این بخش از طیف با سرعت بیشتری انجام می‌شود. او این بخش از طیف را فرابنفش نامید.

۶–نورهای ابتدایی

هر پیکسل از تصویر از ترکیبی از نقاط قرمز، سبز و آبی تشکیل شده است. اگر تمام این نقاط به طور همزمان فعال باشند، ترکیب این سه رنگ در کل به رنگ سفید مشاهده می شود(اگر با دقت به هر نقطه نگاه کنیم، هر نقطه به رنگ خاص خود مشاهده می شود). با ترکیب رنگ‌های قرمز و سبز، رنگ زرد تولید می شود. ترکیب رنگ‌های سبز و آبی رنگ سبزآبی را تولید می کند و ترکیب قرمز و آبی، باعث تولید رنگ سرخابی می شود. بنابراین با ترکیب نسبت‌های متفاوتی از سه رنگ اصلی یک محدوده کامل از رنگ تولید می‌شود. ولی ممکن است تولید رنگ سبز توسط ترکیب رنگ‌های نقاشی زرد و آبی، و تولید رنگ سیاه توسط ترکیب تمام رنگ‌های نقاشی غیر شهودی به نظر برسد. دلیل آن این است که ترکیب نور افزایشی است در حالی که ترکیب نقاط یا رنگدانه‌ها کاهشی است(شکل ۳).

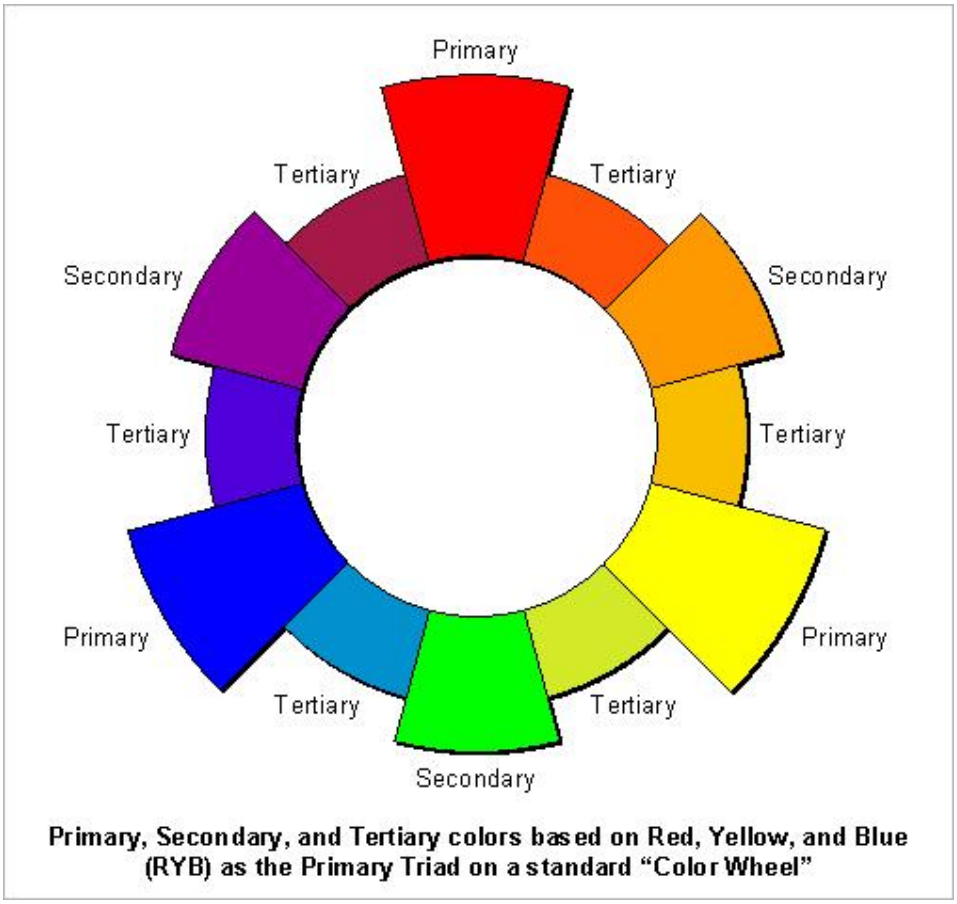


شکل ۳ – رنگ‌های پایه در نور (چپ) و نقاشی (راست)

نام گذاری اولیه رنگ اشاره به مجموعه‌ای از رنگ‌ها که با ترکیب با یکدیگر محدوده وسیعی از رنگ را تولید می‌کند دارد. رنگ‌های اولیه‌ای که به طور معمول در نور استفاده می‌شود قرمز، سبز و آبی هستند. از آنجا که در تولید رنگ‌های جدید به رنگ نهایی "افزوده" می‌شود، این رنگ‌ها به عنوان رنگ‌های افزایشی شناخته می‌شوند. ولی در رنگ‌های نقاشی و رنگدانه‌ها، سه رنگ اصلی، آبی فیروزه‌ای، بنفش و زرد هستند. در این حالت برای تولید رنگ جدید، از رنگ نهایی "کم" می‌شود. بنابراین این رنگ‌ها به عنوان رنگ‌های کاهشی شناخته می‌شوند. در پرینترهای رنگی علاوه بر سه رنگ اصلی از رنگ سیاه هم استفاده می‌شود. زیرا تولید رنگ سیاه با ترکیب رنگ‌های آبی فیروزه‌ای، بنفش و زرد پرهزینه است و شکل مناسبی از سیاه را تولید نمی‌کند.

یک نمونه از مجموعه‌های غیر استاندارد از رنگ‌های اصلی در فرایند عکس‌برداری رنگی معروف به Autochrome معرفی شد. در این فرایند از سه رنگ نارنجی، سبز و بنفش بعنوان رنگ‌های اصلی استفاده می‌شد.

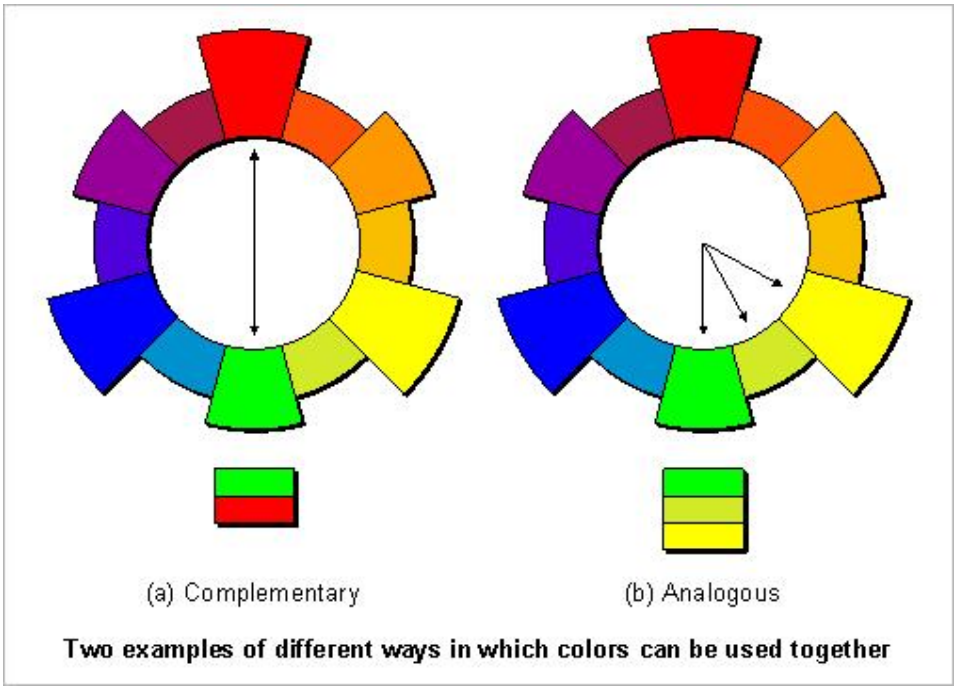
نیوتون در سال ۱۶۶۶ به عنوان بخشی از آزمایشات خود با منشور، یک نمودار دایره‌ای از رنگ‌ها که امروزه به عنوان "چرخ رنگ" شناخته می شود را ایجاد کرد. متخصصان علوم نظری در آن زمان رنگ‌های قرمز، زرد و آبی را بعنوان سه رنگ اصلی برای رنگدانه‌ها در نظر گرفتند. چرخ رنگ بر اساس رنگ‌های اولیه قرمز، زرد و آبی در شکل ۴ مشاهده می‌شود:



شکل ۴ - چرخ رنگ برای سه رنگ قرمز، سبز و آبی

با استفاده از سه رنگ اصلی به عنوان نقطه شروع می‌توان سه رنگ دیگر را تولید کرد. به عنوان مثال ترکیب قرمز و زرد، رنگ نارنجی را تولید می‌کند. با ترکیب زرد و آبی، رنگ سبز تولید می‌شود و ترکیب آبی و قرمز رنگ ارغوانی را تولید می‌کند. به طور مشابه ترکیب رنگ‌های اصلی با رنگ‌های مجاور خود رنگ‌های جدیدی تولید می‌شود.

تئوری‌های متفاوتی برای ترکیب رنگ‌های متفاوت و تولید رنگ جدید به طوری که تاثیر خوشایندی بر روی چشم داشته باشد وجود دارد. به عنوان مثال رنگ‌های مکمل رنگ‌هایی هستند که در دایره رنگ در جهت مخالف یکدیگر قرار گیرند. این رنگ‌ها بیشترین کنتراست را ایجاد می کنند، به عنوان مثال در شکل ۵ رنگ های قرمز و سبز، مکمل هستند. رنگ‌های مشابه، سه رنگی هستند که در دایره رنگ در کنار یکدیگر قرار دارند، به عنوان مثال رنگ‌های زرد، سبز متمایل به زرد و سبز رنگ‌های مشابهی هستند.



شکل ۵ - استفاده از رنگ‌های مشابه و مکمل

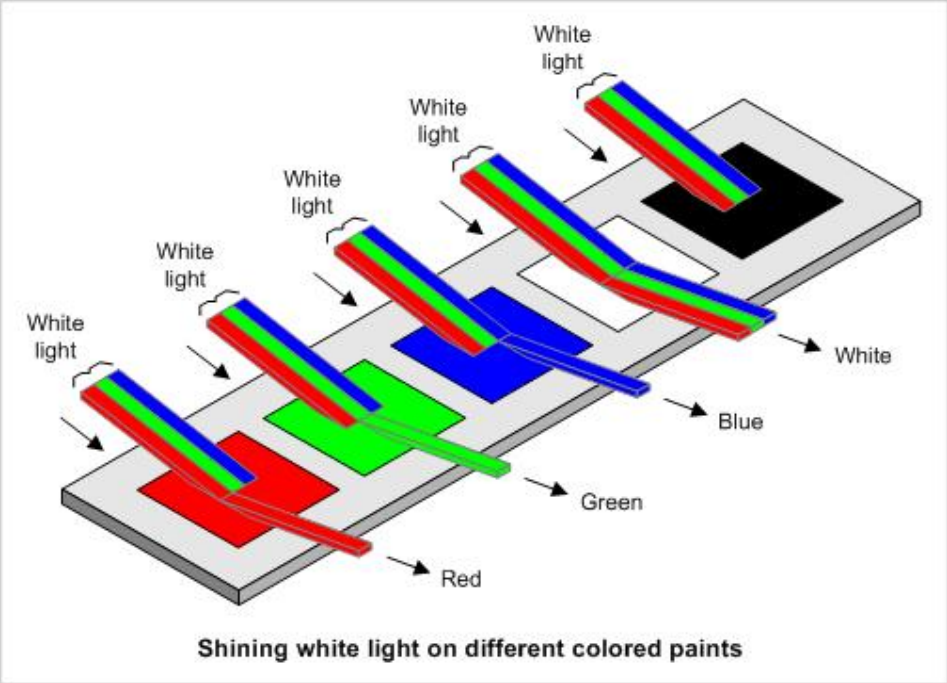
استفاده از رنگ‌های اولیه قرمز، زرد و آبی محدوده رنگی نسبتا کوچکی را تولید می‌کند و ترکیب آن‌ها برای تولید محدوده وسیعی از رنگ‌ها غیر ممکن است. به همین دلیل امروزه در عکس‌برداری رنگی و فرایند چاپ از رنگ‌های آبی فیروزه‌ای، بنفش و زرد به عنوان سه رنگ اصلی استفاده می‌شود. زیرا ترکیب این سه رنگ محدوده رنگی بسیار وسیع‌تری را تولید می کند.

در این بخش در مورد اصطلاحاتی مانند shade، tint و hue توضیح مختصری داده می‌شود. اصطلاح Hue میزان خلوص نسبی رنگ را تعیین می‌کند. این پارامتر طول موج غالب از یک رنگ خاص است. اصطلاح shade، درجه‌ای تیرگی رنگ را تعیین می کند و tint، درجه ای از سبکی در رنگ را تعیین می‌کند. به عنوان مثال در مورد نقاشی هنرمندان از اصطلاح shade هنگام ترکیب یک رنگ خاص با رنگ سیاه استفاده می‌کنند. بنابراین shade رنگی است که به این شکل تیره‌تر می شود. در مقایسه، اصطلاح tint هنگام ترکیب یک رنگ با رنگ سفید استفاده می‌شود. بنابراین tint رنگی است که به‌این صورت روشن‌تر می‌شود.

۷–ترکیب نور در برابر ترکیب رنگ

چشم انسان‌ها تا حدودی با هم متفاوت است. بنابراین هیچ تضمینی وجود ندارد که افرادی که صحنه خاصی را مشاهده می‌کنند، رنگ یکسانی را دریافت کنند. زیرا مغز انسان اطلاعاتی که از طریق چشم دریافت می‌کند را فیلتر و توصیف می‌کند. بنابراین افرادی که صحنه یکسانی را مشاهده می کنند، مطمئنا به شیوه‌ای متفاوت رنگ تشکیل‌دهنده آن صحنه را دریافت می‌کنند.

دلیل این که هر جسم به رنگ خاصی مشاهده می‌شود چیست؟ طول موجی که جسم جذب نمی‌کند، به صورت رنگ آن نمایان می‌شود. در شکل ۶ مشاهده می‌شود که با تاباندن نور سفید به صفحات رنگی متفاوت چه اتفاقی رخ می‌دهد.



شکل ۶ - تابش نور به صفحات رنگی متفاوت

صفحه قرمز، نور سبز و آبی را جذب و نور قرمز را بازتاب می‌کند. به طور مشابه صفحه سفید تمام نورها را بازتاب می‌کند و صفحه سیاه تمام نورها را جذب می کند. به این معنا که سیاه فاقد هیچگونه رنگی است. بنابراین رنگی که در اشیا مشاهده می شود طول موجی است که از خود بازتاب می‌کنند.

Turning Things Upside Down

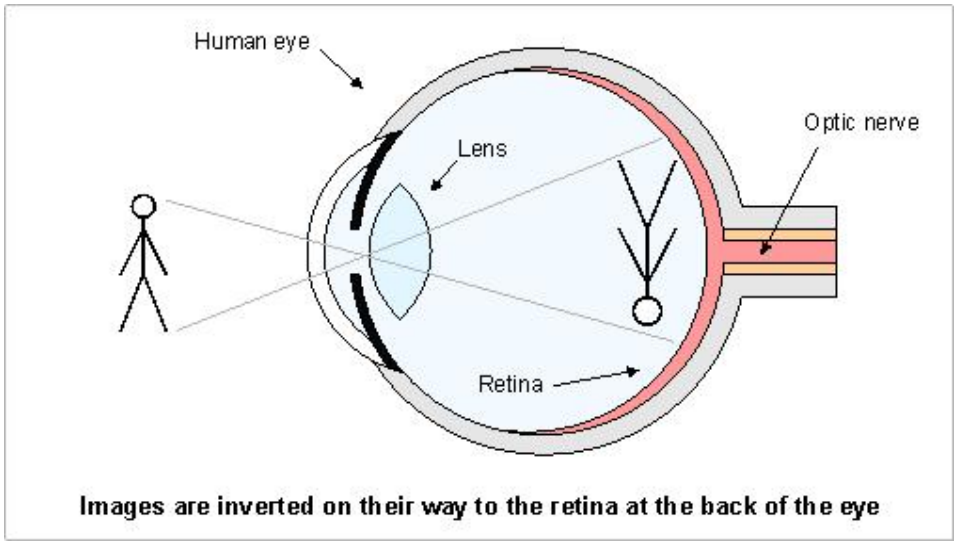
اگر چه مفهموم رنگ ساده است ولی بینایی رنگ بسیار پیچیده است. سیستم بصری انسان از چشم، مغز و سیستم عصبی تشکیل شده است. انسان دارای پنج حس است: لامسه، چشایی، بویایی، شنوایی و بینایی. در بین این پنج حس، تقریبا ۸۰٪ اطلاعات انسان از طریق حس بینایی دریافت می‌شود. بنابراین مغز انسان بطور مخصوص در پردازش این اطلاعات و ایجاد فرضیات مبتنی بر آنها وفق داده شده است. علاوه بر پنج حسی که در مدرسه آموخته‌ایم، انسان دارای حس تعادل، حس ماهیچه و احساس احشائی(احساسی که ناشی از اعضای داخلی بدن مانند معده است) است.

شواهدی وجود دارد که نشان می‌دهد انسان‌ها به حواس بیشتری مجهزاند مثلا توانایی درک میدان مغناطیسی. در آزمایشاتی که در اوایل ۱۹۸۰ انجام شد، گروهی از دانشجویانی که برای چند سال در یک منطقه زندگی می‌کردند، را با چشمان بسته به بیرون از شهر بردند. هنگامی که به مقصد رسیدند(در حالی که همچنان چشمانشان بسته بود)، از آنها در مورد جهت محل زندگی شان سوال شد. اگرچه تعدادی از دانشجویان مسیر اشتباه را حدس زدند ولی تعداد متوسطی از دانشجویان مسیر درست را حدس زدند.

اگر فردی ژله‌ای قمرمز در اختیار داشته باشد، به طور خودکار فرض می‌کند که آن ژله دارای طعم توت‌فرنگی است. این وابستگی بسیار قوی است به طوری که فردی ژله‌ای زرد رنگ با طعم توت‌فرنگی در اختیار داشته باشد، معمولا به این باور می رسد که آن ژله با طعم لیمو است. این تئوری بیانگر این موضوع که مغز انسان به آنچه چشم دریافت می‌کند در مقایسه با آنچه حس چشایی دریافت می‌کند وزن بیشتری می‌دهد.

با مشاهده یک شی، داده ها توسط ناحیه از مغز به نام پوسته بینایی[1] به پیروی از بخش های دیگر مغز پیش‌پردازش می‌شود، و حسی از آنچه چشم دریافت می‌کند را ایجاد می‌کند. توانایی مغز برای پردازش اطلاعات بصری پدیده‌ای شگفت‌انگیز نیست. به عنوان مثال در یک آزمایش معروف که برای اولین بار در سال ۱۸۹۶ انجام شد، یک روانشناس در برکلی، از عینک خاصی که همه چیز را معکوس نشان می داد استفاده کرد. به طور شگفت انگیزی پس از چند روز مغز او به طور اتوماتیک سیگنال‌های ورودی را به گونه‌ای تصحیح کرد که اشیاء به درستی مشاهده می‌شدند.

به طور مشابه وقتی او این عینک مخصوص را از چشمان خود برداشت، اشیاء معکوس به نظر می‌رسیدند. زیرا مغز به گونه‌ای دیگر اطلاعات را پردازش می‌کرد. مجددا پس از گذشت بازه‌ای از زمان مغز او خودش را با شرایط جدید وفق داد و همه چیز به شکل نرمال مشاهده می‌شد.(در واقع نحوه عملکرد لنز داخل چشم انسان به گونه‌ای است که تصاویری که انسان مشاهده می‌کند، زمانی که به شبکیه که در انتهای چشم قرار دارد می‌رسند، معکوس می‌شوند(شکل ۷). بنابراین مغز انسان شروع به عملیات معکوس کردن اطلاعات می‌کند).

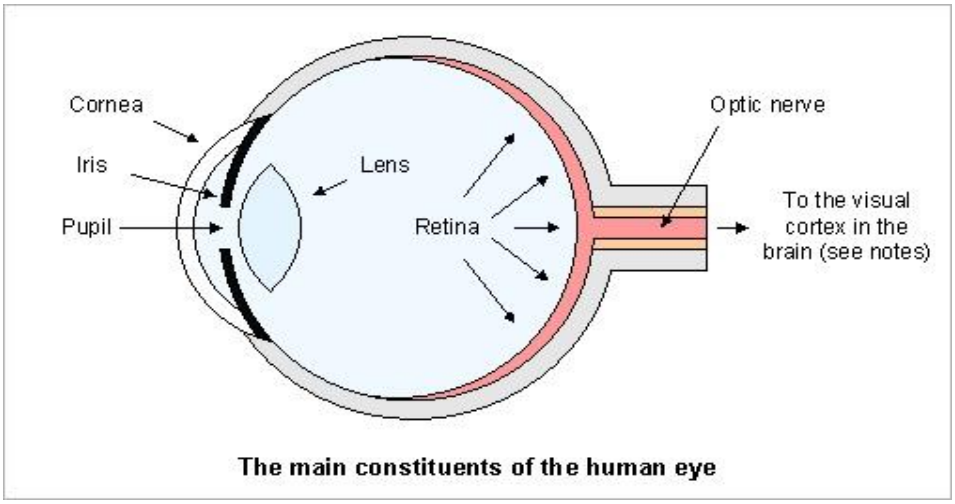


شکل ۷ – شکل‌گیری تصویر در سیستم بصری انسان

۸–بینایی رنگ چگونه عمل می کند؟

اجزای اصلی چشم انسان در شکل ۸ مشاهده می شود:

[1] Visual cortex



شکل ۸ - اجزای اصلی چشم

نور از دنیای خارج از میان قرنیه، که شبیه یک پنجره تمیز، شفاف و محافظ عمل می کند، عبور می‌کند. در داخل قرنیه، عنبیه وجود دارد که به چشمان انسان رنگ مجزایی می‌دهد. به روزنه‌ای که در میان عنبیه وجود دارد، مردمک گفته می‌شود، که میزان نور ورودی به چشم انسان را کنترل می‌کند. عنبیه به مردمک کمک می کند که در نور زیاد کوچک و در نور کم بزرگ شود.

لنز چشم برای فوکوس‌کردن تصویر در انتهای چشم که توسط لایه‌ای به نام شبکیه پوشیده شده است به کار می‌رود. شبکیه شبیه به سنسورهای موجود در دوربین‌های دیجیتالی امروزی است و شامل گیرنده‌های نوری مخصوصی است که اشعه‌های نور(فوتون) را به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل می‌کند. این سیگنال‌ها پس از پردازش در چشم، از میان اعصاب نوری به ناحیه پوسته بینایی در مغز منتقل می‌شوند.

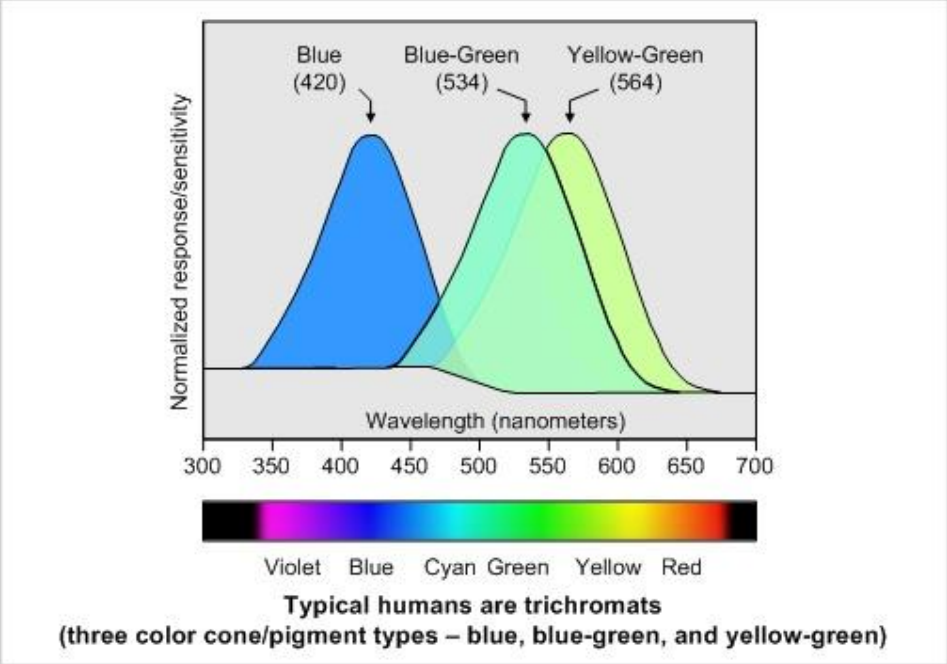
دلیل ایکه مردمک انسان سیاه به نظر می‌رسد این است که نوری که وارد چشم انسان می‌شود بازنمی‌گردد. البته یک استثنا در مورد این قانون وجود دارد و آن هنگامی است که توسط دوربینی با فلاش روشن از فردی عکس گرفته می‌شود و چشمان آن فرد در تصویر گرفته شده، قرمز به نظر می‌رسد. دلیل این رویداد این است که نور فلاش به عروق شبکیه در انتهای چشم تابیده می‌شود و به صورت نور قرمز از مردمک چشم خارج می‌شود.

شبکیه در چشم انسان شامل سه نوع گیرنده نوری رنگی است. بعضی از این گیرنده های نوری به رنگ قرمز، بعضی به رنگ سبز و بعضی دیگر به رنگ آبی پاسخ می‌دهند. با این فرض، کتب مهندسی دلیل استفاده از نور قرمز، سبز و آبی در تلویزیون و مانیتورهای کامپیوتر برای تولید تمام رنگ‌ها را این پدیده می‌دانند.

دلیل اینکه بیشتر مراجع در مورد گیرنده های قرمز، سبز و آبی در چشم انسان صحبت می‌کنند، مربوط به سال‌های ۱۸۰۱-۱۸۰۲ است، زمانی که فیزیکدان انگلیسی به نام توماس یانگ آزمایشاتی انجام داد و تئوری "سه رنگ" خود را معرفی کرد. فرضیه یانگ بر اساس مشاهدات هنرمندان و سازندگان لباس شکل گرفت. آنها تصدیق کردند که اگر سه دانه رنگی متفاوت داشته باشیم، با ترکیب آنها می‌توان هر رنگ دیگر را تولید کرد. پیش از یانگ، مردم می‌دانستند که سه نوع نور وجود دارد. بنابراین یانگ تشخیص داد که "سه" بیش از اینکه مربوط به فیزیک نور باشد، مربوط به فیزیولوژی انسان است. فرضیه یانگ، که توسط دانشمند آلمانی پس از ۵۰ سال تصحیح شد، بیان می‌کند که چشم انسان حس خود را از رنگ با استفاده از سه دریاقت‌کننده برای نور قرمز، سبز و آبی می‌سازد. بر اساس این تئوری، انسان‌ها به سه‌رنگ شناخته می‌شوند.

فرض می‌شود سیگنال‌های الکتریکی از سلول‌های رنگی متفاوتی از طریق عصب نوری مستقیما به بخشی از مغز به نام پوسته بینایی منتقل می شوند، و از این سیگنال‌ها برای تشخیص رنگ‌های متفاوت استفاده می‌شود. اگر چه که واقعیت پیچیده تر از این است.

حدود شش میلیون سلول گیرنده نوری به نام سلول مخروطی در هر چشم انسان وجود دارد. هر نوع از سلول‌های مخروطی یک محدوده فرکانسی خاصی را پوشش می‌دهند و به بخش خاصی از طیف الکترومغناطیسی حساس هستند. یک نوع از سلول‌های مخروطی حساس به نور بنفش متمایل به آبی است، ولی دو سلول دیگر بیشتر به رنگ سبز حساس هستند، همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود یکی از این سلول‌ها در محدوده‌ای از طیف که مربوط به سبز متمایل به زرد و سلول دیگر در سبز متمایل به آبی به بیشترین مقدار خود می‌رسند.



شکل ۹ - پاسخ طیفی سلول‌های مخروطی چشم انسان

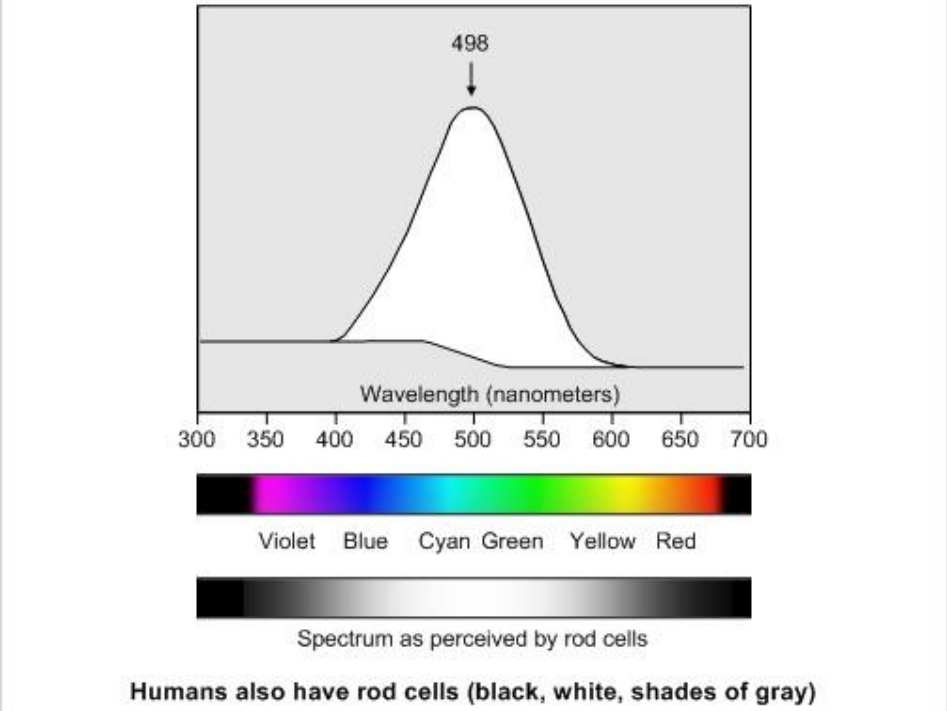
به دلیل اینکه تعداد سلول های حساس به بنفش متمایل به آبی کمتر از دو نوع سلول دیگر است و دو نوع سلول دیگر هر دو متمایل به سبز هستند، چشم انسان به تغییرات محدوده سبز طیف حساس است.

نظریه سه رنگ یانگ بسیار موفق بود و بیش‌تر از ۱۷۵ سال از نظر عقلی پذیرفته شده بود. با این حال بر خلاف دریافت انسان از رنگ های متفاوت، با دسترسی مستقیم به سیگنال هایی که توسط سلول‌های مخروطی انسان تولید می‌شوند، به این نتیجه رسیدند که دریافت انسان از رنگ بر اساس پردازش مخالف است. ایده پردازش مخالف این است که با وجود اینکه سلول‌های مخروطی در فرکانس‌های متفاوت به بیشترین حساسیت خود می‌رسند، ولی با توجه به طول موجی که سه نوع سلول مخروطی به آن پاسخ می‌دهند، همپوشانی زیادی بین پاسخ طیفی آنها وجود دارد. بنابراین سیستم بینایی انسان برای تشخیص تفاوت بین پاسخ سلول‌های مختلف طراحی شده است. شبکیه دارای تعداد زیادی سلول "مقایسه" است، که هر یک از این سلول‌ها، سیگنال‌های تولید شده توسط تعدادی سلول مخروطی را مقایسه می‌کنند. سیگنال‌های ایجاد شده توسط سلول‌های مقایسه است که اطلاعات رنگ را برای مغز

فراهم می‌کند. نتیجه نهایی این است که زمانی که سلول‌های مخروطی سبز متمایل به زرد بیش از سلول‌های سبز متمایل به آبی تحریک می‌شوند، رنگ زرد را درک می‌شود. به طور مشابه زمانی که سلول‌های سبز متمایل به زرد در چشم انسان بیش از سلول های سبز متمایل به آبی تحریک شوند، رنگ سبز دریافت می‌شود.

زمانی که روز به سمت گرگ و میش کشیده می شود، انسان قابلیت مشاهده رنگ قرمز را از دست می‌دهد. زیرا حتی در نور زیاد محدوده‌ای از طیف که مربوط به رنگ قرمز است به میزان کمی تحریک می‌شود. به همین دلیل وقتی شدت نور رو به کاهش می‌یابد، ابتدا تحریک محدوده رنگ قرمز از طیف رو به کاهش می‌یابد. در نیمه‌های شب توانایی دیدن رنگ سبز در انسان وجود دارد زیرا اجزای اصلی نور مهتاب بسیار نزدیک به حساس‌ترین بخش از پاسخ طیفی سلول‌های سبز متمایل به آبی است.

علاوه بر سلول های مخروطی، چشم انسان دارای چهارمین نوع سلول دریافت کننده به نام سلول میله‌ای است(شکل ۱۰). این نام به دلیل شکل این نوع سلول برای آن انتخاب شده است. این سلول‌ها که حساس‌تر از سلول‌های مخروطی هستند، در نور کم مثلا هنگام گرگ و میش یا شب فعال هستند. تعداد این نوع سلول ها حدود ۲۰ برابر سلول های مخروطی است.

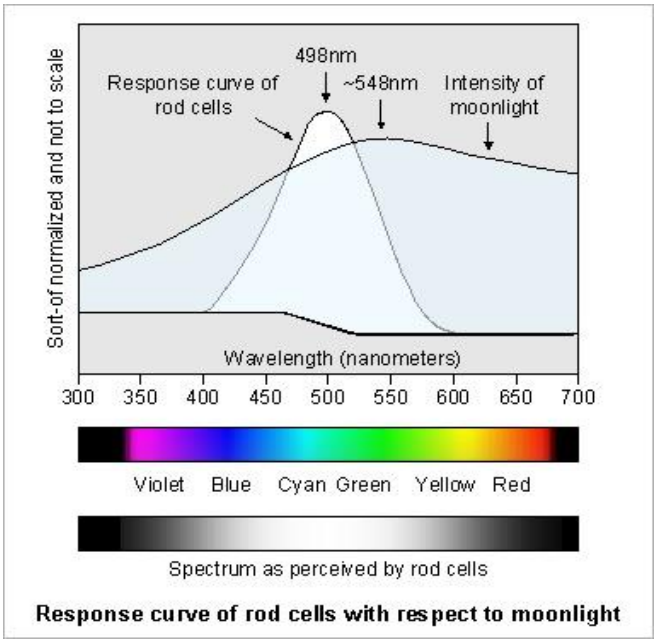


شکل ۱۰ – پاسخ طیفی سلول‌های میله‌ای چشم انسان

میزان دریافت انسان از رنگ با کاهش شدت نور، کاهش می‌یابد. به دلیل اینکه تعداد سلول‌های میله‌ای بیشتر از تعداد سلول‌های مخروطی است و سلول‌های میله‌ای نسبت به سلول‌های مخروطی به نور کم حساس‌تراند. در نور زیاد، بیشترین حساسیت انسان به سلول های سبز متمایل به آبی و سبز متمایل به زرد است، که باعث درک رنگ‌های سبز و زرد و قرمز می شود. با وجود نور زیاد، سلول‌های میله‌ای انسان هیچگونه اطلاعات مفیدی در اختیار انسان قرار نمی‌دهند. با کاهش شدت نور، حساسیت چشم انسان به سمت بنفش متمایل به آبی و سبز متمایل به آبی می‌رود، به همین دلیل است که می‌توان در نور کم رنگ‌های آبی و سبز را مشاهده کرد. در نهایت وقتی شدت نور

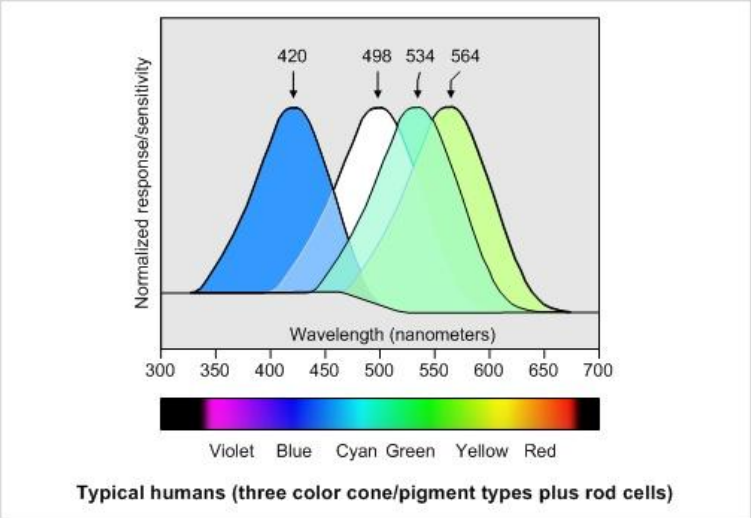
بسیار کاهش می‌یابد، سلول‌های خاکستری انسان غیر فعال می‌شوند و سلول‌های میله‌ای توانایی مشاهده در نور خیلی کم را برای انسان فراهم می‌کنند.

بعضی از مراجع بیان می کنند که بیشترین حساسیت سلول های میله‌ای به طیف اصلی نور شب نزدیک است. بر این اساس عده ای فرض می‌کنند که سلول‌های میله‌ای برای اولین بار در حیوانات شب‌رو نمو کرده است. عده‌ای ممکن است فرض کنند که تکامل سلول‌های میله‌ای باعث شده است که حیوانات خاصی در شب زندگی کنند. صرفنظر از اینکه سلول‌های میله‌ای برای اولین بار در حیوانات شب‌رو پدیدار شده اند یا نه، بیشترین مقدار جذب آنها به طیف اصلی نور شب که بر اساس نوع داده، بین طول موج ۵۴۸ تا ۵۷۵ نانومتر تغییر می کند(شکل ۱۱)، نزدیک نیست.



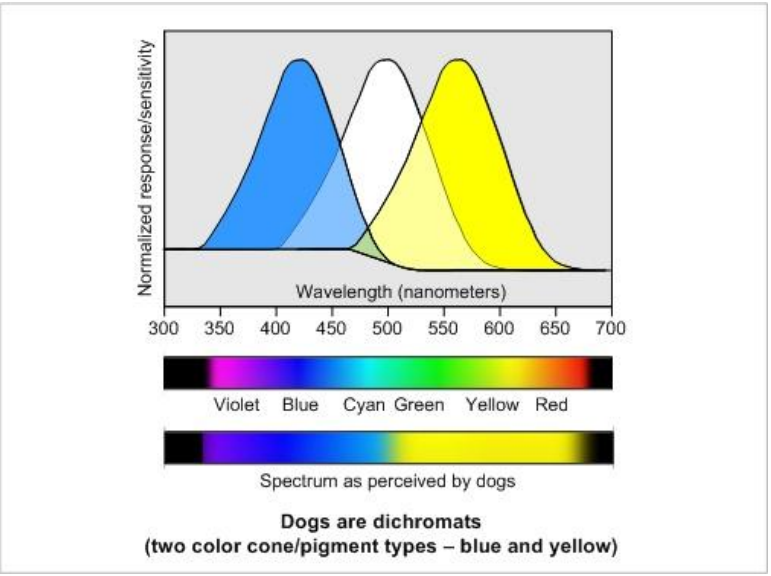
شکل ۱۱ - پاسخ طیفی سلول‌های میله‌ای نسبت به نور شب

چشم انسان عادی دارای سه نوع سلول مخروطی است که به انسان توانایی درک رنگ‌های متفاوت را می‌دهد. همچنین انسان‌ها دارای گیرنده‌های نور میله‌ای هستند که به نور کم حساسیت دارند، و توانایی تشخیص رنگ‌های متفاوت را ندارند(شکل ۱۲).



شکل ۱۲- پاسخ طیفی گیرنده‌های نوری چشم انسان

بعضی از حیوانات فقط دارای دو نوع سلول مخروطی هستند، به این حیوانات دو dichromat می‌گویند. به عنوان مثال سگ ها دارای دو نوع سلول مخروطی هستند که بعضی از آنها حساس به نور آبی و بعضی دیگر حساس به نور زرد هستند(شکل ۱۳).



شکل ۱۳- پاسخ طیفی گیرنده‌های نوری چشم سگ

برای درک این پدیده تصویر شکل ۱۴ به گونه ای توصیف شده است که فقط تاثیر دو رنگ آبی و زرد در آن مشاهده شود. تصویر تولید شده در شکل ۱۴ مشاهده می شود.

شکل ۱۴- تاثیر دو رنگ آبی و زرد در آن مشاهده یک صحنه

۹- تکامل بینایی رنگی

قبل از آغاز این بخش، به جمله‌ای از اسحاق نیوتن اشاره می‌کنیم که در نامه‌ای به روبرت هوک عنوان کرد که "اگر من افق‌های دوردست را می‌بینم به دلیل ایستادن بر شانه‌های بزرگان است".

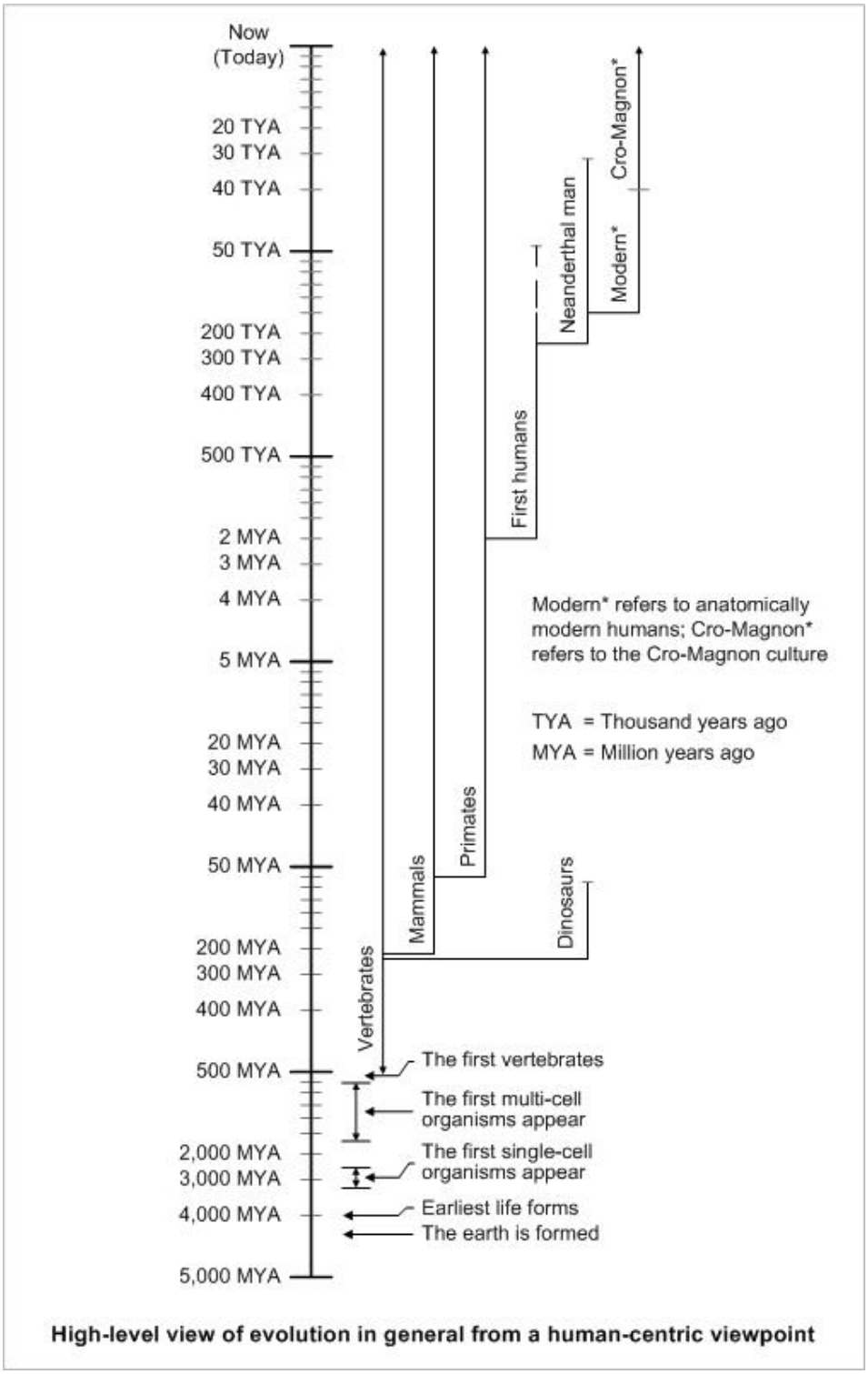
در مورد این عنوان نیز قابل ذکر است که این کار به صورت عمده‌ای بر پایه‌ی تحقیقات میکی راو از موسسه‌ی تحقیقات عصب‌شناسی و دپارتمان روانشناسی دانشگاه کالیفرنیا واقع در سانتا باربارای کالیفرنیا است.

آقای راو یکی از پیشتازان درک فعلی در زمینه‌ی بینایی رنگی به صورت کلی و نحوه‌ی تکامل بینایی رنگی به طور خاص به ویژه در مورد پستانداران اولیه است. کار وی بر پایه‌ی اطلاعات دیرین‌شناسی و استفاده از ابزارهای و روش‌های جدید در زمینه‌ی زیست‌شناسی مولکولی گسترش یافته است.

یکی از مقالات آقای راو به همراه پروفسور جرالد ژاکوبز با عنوان "تکامل بینایی رنگی مهره‌داران" که در ژورنال اتحادیه‌ی اپتومتریست‌های استرلیا چاپ شده است.

قبل از پرداختن به ادامه‌ی این مقاله، ذکر این نکته ضروری به نظر می‌رسد که ما به طور خاص به ردگیری مسیر تکاملی از ابتدا تا انسان امروزی علاقه داریم. مسیرهای متعدد دیگری نیز در این میان وجود دارند، مانند تکامل حشرات که پرداختن به آن‌ها از حوصله‌ی این مقاله خارج است. هرچند که در ادامه اشاره‌هایی به سیستم بینایی سایر موجودات از قبیل مانتیس‌ها، پروانه‌ها، ماهی‌ها و پرندگان خواهد شد.

برای درک بهتر فاصله‌ی زمانی مورد نظر لازم به ذکر است که اکنون به صورت عمده پذیرفته شده است که زمین در حدود ۴.۶ میلیارد سال قبل(با خطای ۱۰۰ میلیون سال) شکل گرفته است(وب سایت مطالعات زمین‌شناسی آمریکا حاوی اطلاعات بیش‌تری در این زمینه است) اولین اشکال حیات احتمالا برپایه‌ی مولکول‌های خودتکثیر RNA و در حدود ۴ میلیارد سال پیش شکل گرفته‌اند. ارگانیسم‌های اولیه‌ی سلولی احتمالا در حدود ۳.۹ میلیارد سال پیش شکل گرفته‌اند و اولین ارگانیسم‌های تک سلولی در حدود ۳.۵ تا ۲.۸ میلیارد سال پیش به وجود آمده‌اند. بعد از این اولین ارگانیسم‌های چند سلولی شکل گرفتند که در حدود ۱.۵ میلیارد تا ۶۰۰ میلیون سال پیش به وجود آمدند(برخی از اکتشافات اخیر زمان ظهور زودتری را پیش بینی می‌کنند).



شکل ۱۵- تاریخچه‌ی زمین

در مرحله‌ی بعد، مهره‌داران(موجودات با استخوان‌های پشتی یا ستون فقرات) در حدود ۵۳۰ تا ۵۱۰ میلیون سال قبل و در دوره‌ی انفجار کامبرین(Cambrian Explosion) در دوره‌ی کامبرین شروع به تکامل کردند(بخش مهره

داران سایل دانشگاه برکلی کالیفرنیا، اطلاعات مفیدی در این باره دارد). اولین چهارپا (Tetrapod، موجودی با چهار پا، مفصل ران، شانه و انگشت‌های دست و پا) در زمانی بین ۳۷۵ تا ۳۵۰ میلیون سال قبل از اقیانوس به خشکی نقل مکان کرد (این رویداد به فاصله‌ی نسبتا کمی بعد از ظهور ماهی راه رونده به نام Tiktaalik Roseae در حدود ۳۷۵ میلیون سال قبل در دوره‌ی Devonian پسین رخ داد).

قابل ذکر است که اندازه‌ی عمودی در شکل ۱۵ لگاریتمی است. این کار امکان نشان دادن بازه‌ی زمانی بزرگ را در حالی که دقت در انتهای بازه حفظ می‌شود را می‌دهد. در حالی که اگر نمایش خطی می‌بود و برای هر یک میلیون سال، یک میلیمتر در نظر گرفته می‌شد، اندازه‌ی چارت شکل ۱۵ به ۵ متر می‌رسید.

اولین پستانداران (که در ابتدا موجودات ریز جثه‌ای بودند) در اواخر دوره‌ی Triassic و اوایل دوره‌ی Jurassic در حدود ۲۰۸ میلیون سال پیش ظهور یافتند.

پستاندار به گروهی از مهره‌داران گفته می‌شود که شامل تمام گونه‌های مرتبط با لمورها، میمون‌ها و بوزینه‌ها (Apes، که شامل انسان‌ها نیز می‌شود) است. تا چندی پیش، تصور بر این بود که تکامل نخستین‌ها در اوایل دوره‌ی Eocene آغاز شده است(این دوره در حدود ۵۵ میلیون سال قبل شروع شده و تا ۲۰ میلیون سال ادامه یافت). Purgatosius اگرچه به اندازه‌ی یک موش امروزی است اما تا حدودی یک نخستین به شمار می‌رود(یا حداقل یک شبه نخستین) و این پستاندار در دوره‌ی Paleocene زندگی می‌کرده است بنابراین صحیح‌تر است که گفته شود که نخستین ها در حدود ۶۰ تا ۶۵ میلیون سال قبل زندگی می‌کرده‌اند.

اولین نخستین از گونه‌ی انسان‌های Homo Habilisها بودند. این افراد از ابزارهای سنگی استفاده می‌کردند و در حدود ۱.۶ تا ۲.۲ میلیون سال پیش پیدایش یافتند.(عبارت Hominid یا انسان گونه، برای توصیف همه‌ی موجودات از نوع انسان از زمان جدایی از شامپانزه‌ها استفاده می‌شود هر چند که جامعه‌ی علمی امروزه بیش‌تر عنوان Hominin را برای این مفهوم ترجیح می‌دهد. برای اطلاعات بیش‌تر می‌توان به وب سایت PBS در قسمت منشا تکامل انسان مراجعه کرد).

انسان‌های Neanderthal در حدود ۲۵۰۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ سال قبل پیدایش یافتند.(قبلا تصور می‌شد که این انسان‌ها در بازه‌ی ۱۵۰۰۰۰ تا ۳۵۰۰۰ سال پیش وجود داشته‌اند اما اکتشافات جدید این محدوده را از هر دو طرف گسترش داده است). در همین حال، زمان مورد توافق برای پیدایش انسان مدرن در حدود ۱۰۰۰۰۰ سال پیش است. هر چند که اکتشافات پرفسور Frank Brown، رییس کالج علوم زمین و معادن در دانشگاه Utah پیشنهاد می‌کند که زمان این پیدایش تا ۱۹۵۰۰۰ سال پیش نیز می‌توانسته باشد. اولین نشانه‌های فرهنگ Cro-Magnon در حدود ۴۰۰۰۰ سال پیش مشاهده شده‌اند که می‌توان آن را به عنوان یک قله در تکامل انسان دانست.

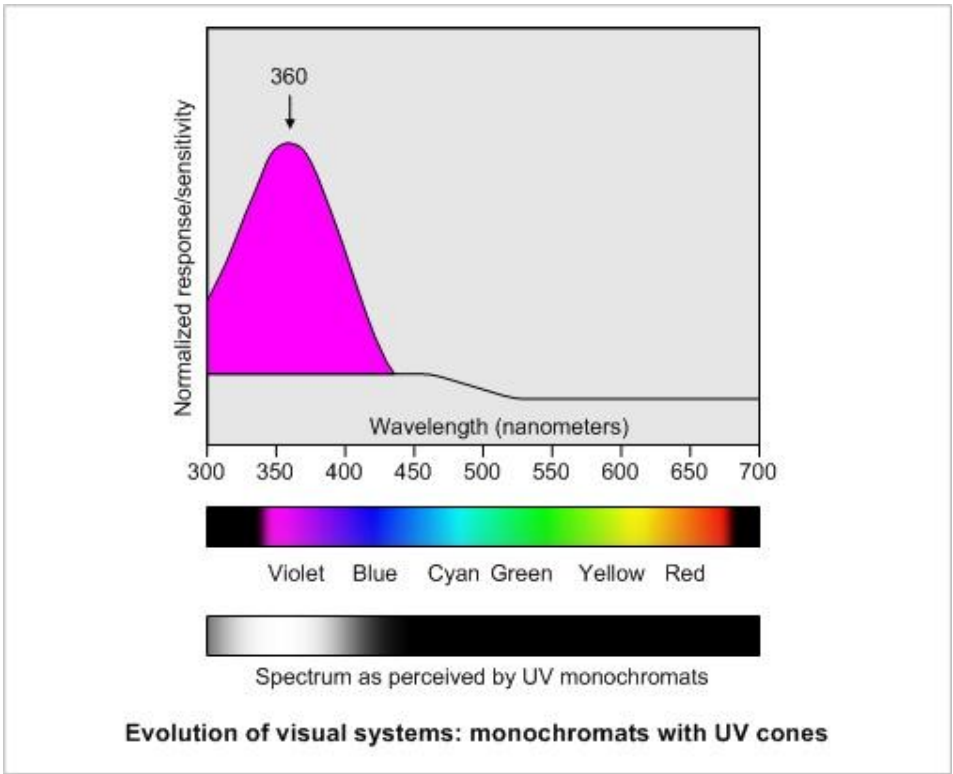
اکنون این سوال مطرح می‌شود که تکامل بینایی رنگی چگونه به مسیر مذکور نگاشته می‌شود. تا چندی پیش، بسیاری بر این عقیده‌ی اشتباه بودند که مسیر طی شده از نمونه‌های اولیه‌ی حیات تا انسان‌ها یک مسیر تکامل یکنواخت بوده است. در زمینه‌ی بینایی رنگی، بسیاری اعتقاد داشتند که مسیر تکاملی از بینایی سیاه و سفید شروع شده و سپس به بینایی دو رنگی و سپس سه رنگی ارتقا یافته است. اما مطالعات اخیر در زمینه‌ی دیرینه شناسی به همراه روش‌ها وابزارهای جدید در زمینه‌ی بیولوژی مولکولی نشان داده‌اند که این مسیر بسیار پیچیده‌تر از تصور قبلی است.

ابتدا به نظر نمی‌رسد که سلول‌های میله‌ای بتوانند تشکیل دهنده‌ی سلول‌های مخروطی اولیه باشند. چرا که این سلول‌ها بسیار بیش‌تر از سلول‌های مخروطی به نور حساس هستند که نتیجه‌ی منطقی که می‌توان گرفت این است

که حداقل یک نوع از سلول‌های مخروطی قبل از این شکل گرفته‌اند. در حقیقت بسیاری از شواهد امروزی نشان می‌دهند که سلول‌های میله‌ای از سلول‌های مخروطی مشتق شده‌اند. بنابراین این سوال مطرح می‌شود که اولین سلول مخروطی چگونه تکامل یافته است؟ اجداد تمامی حیوانات با تناسب دوجانبه می‌تواند در حدود ۵۵۰ میلیون تا یک میلیارد سال پیش تکامل بیابد بنابراین، این دوره‌ای است که گیرنده‌های نوری اولین بار تکامل یافته‌اند.

علاوه بر این، گیرنده‌های نوری ممکن است که حداقل دو بار تکامل یافته باشند، هر چند که این تکامل از یک جمعیت اولیه‌ی سلول‌های اولیه رخ داده است. همچنین ممکن است که گیرنده‌های نوری اولیه بعد از ظهور به دو گونه‌ی کامل متفاوت تقسیم شده باشند. باید توجه کرد که در این جا منظور سلول‌های میله‌ای یا مخروطی نیست بلکه به تفاوت‌های بین گیرنده‌های نوری ریشه‌دار (Ciliated، مانند آن‌چه انسان استفاده می‌کند) و rhabdomeric (مانند آن‌چه بندپایان برای دیدن استفاده می‌کنند) اشاره می‌شود.

در این صورت ممکن است در زمان حدود ۸۰۰ میلیون سال قبل، برخی ارگانیسم‌های چند سلولی در تکامل خود به گیرنده‌های نوری دست یافتند و توانایی تشخیص و پاسخ دادن به نور را کسب کردند. در این‌جا و صرفا برای بررسی موضوع فرض می‌شود که گیرنده‌های نوری اولیه، سلول‌های مخروطی بودند که به نور فرابنفش حساس بودند(شکل ۱۶).



شکل ۱۶- سیستم بینایی مبتنی بر تنها یک سلول مخروطی در باند فرابنفش

توجه کنید که طیف دریافت شده توسط این موجودات تک‌رنگ بوده است. نکته مورد نظر این است که این موجودت توانایی درک تفاوت در شدت باندی از طول موج‌هایی که این سلول‌های مخروطی به آن‌ها حساس بوده‌اند را داشته‌اند. به همین دلیل طیف دریافتی توسط این موجودات به صورت تغییری مرحله‌ای از سیاه به سفید نمایش داده شده است. همچنین این حقیقت که این موجودات تنها یک نوع از سلول‌های مخروطی را داشته‌اند به این معنی

است که می‌توان آن‌ها را به عنوان تک‌رنگ (Monochromat) طبقه‌بندی کرد(توجه کنید که حساسیت با قله‌ی 360 نانومتر یک تخمین بر اساس توانایی‌های گونه‌های حیاتی اولیه است).

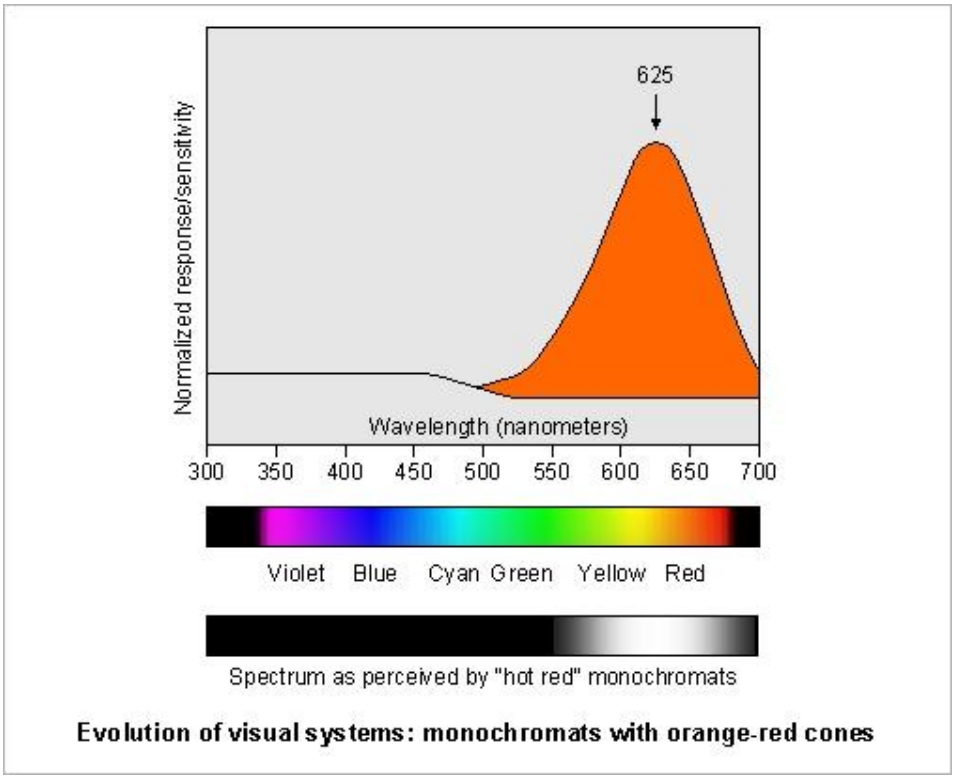
بهتر است به خاطر داشته باشیم ایده‌ی حساسیت سلول‌های مخروطی اولیه به نور فرابنفش، فرضی است. اما به این دلیل که این نور حاوی انرژی بیش‌تری است، گزینه‌ی خوبی برای فرضیه‌ی پیشنهادی خواهد بود و تشخیص آن برای یک سیستم بیولوژیک اولیه، راحت‌تر بوده است.

احتمال دیگر این است که گیرنده‌های نوری اولیه برای واکنش نوری منفی استفاده می‌شدند(واکنش نوری اشاره به تاثیر نور بر روی حرکات ارگانیسم‌های اولیه دارد)، چرا که نور فرابنفش مضر است. در ابتدا لایه‌ی اوزون از موجودات در مقابل نور فرابنفش حفاظت نمی‌کرد. هر چند که این مساله مشکلی برای موجوداتی که در اعماق آب زندگی می‌کردند بوجود نمی‌آورد اما زمانی که این موجودات به سطح آب و خشکی حرکت می‌کردند به دلیل قرار گرفتن در معرض این نور، نابود می‌شدند. به این ترتیب، قدرت تشخیص نور فرابنفش و فرار از آن یک برتری تکاملی محسوب می‌شده است.

قبل از ادامه، لازم است به نحوه‌ی شکل‌گیری و کار سلول‌های مخروطی پرداخته شود. یکی از روش‌های نشان دادن این مساله در نظر گرفتن آنتن‌هایی است که از یک مولکول شبکیه که مشتقی از ویتامین A است، شکل گرفته‌اند (ویتامین A در بدن و از بتاکاروتن موجود در غذاها تولید می‌شود). نقش مولکول شبکیه، تبدیل پرتوهای نوری ورودی به چشم (فوتون‌ها) به سیگنال‌های الکتریکی متناظر است که می‌توانند در سایر ساختارهای چشم و نهایتا مغذ، مورد پردازش قرا بگیرند. هر سلول مخروطی از تعداد زیادی از این آنتن‌ها (در حدود ۱۰۰ میلیون و بیشتر) تشکیل شده است.

هر مولکول شبکیه با یک مولکول رنگ دانه‌ای متناظر احاطه شده است. نقش این مولکول که در حقیقت تبدیلی از پروتئین iodopsin است، تنظیم کردن حساسیت سلول مخروطی به یک باند خاص از فرکانس‌ها است. سلول‌های رنگ دانه‌ای برای سلول‌های مخروطی فرابنفش(که قبلا مورد بررسی قرار گرفته است) و آبی، زرد، نارنجی-قرمز، آبی-سبز، و زرد-سبز (که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند) همه مشتقاتی از iodopsin هستند. تنها تعداد کمی از آمینواسیدهایی که در نزدیکی مکان اتصال iodopsin به مولکول شبکیه قرار دارند، در هر پروتئین با یکدیگر متفاوت هستند. به این مولکول‌های رنگ دانه‌ای opsin گفته می‌شود.

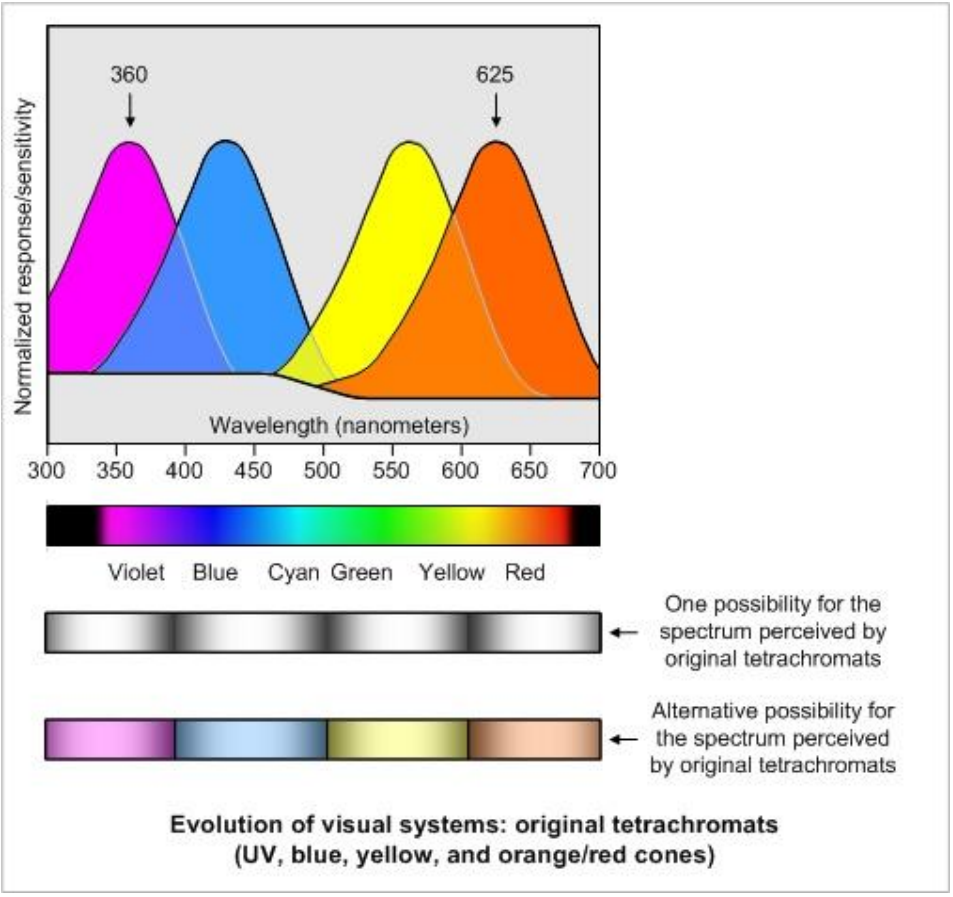
باید به خاطر داشت این ایده که سلولهای مخروطی فرابنفش اول از همه به وجود آمدند کاملا تخمینی بود. در حقیقت فرضیه‌ای دیگری وجود دارد که به همان اندازه قابل بررسی است. یکی از مسایلی که در بینایی به عنوان نویز در نظر گرفته می‌شود، ایزومر شدن گرمایی رنگ‌دانه‌ها است(ایزومر شدن پدیده‌ای است که هنگامی که رنگ‌دانه‌های نوری یک فوتون نور را جذب می‌کنند روی می‌دهد). این پدیده همچنین ممکن است هنگامی که یک رنگ‌دانه تکان می‌خورد و یا یک فوتون با طول موج طولانی را جذب می‌کند روی دهد. در دماهای بالا تعداد این طول موج‌های بلند و تکانه‌ها افزایش می‌یابد، بنابراین سینگنال‌های گیرنده‌های نوری در دماهای بالا بیشتر نویزی هستند. به این ترتیب ممکن است که گیرنده‌های نوری اولیه اصلا بصری نبوده باشند و تنها حسگر دما بوده باشند. ایزومر شدن گرمایی در رنگ‌دانه‌هایی با حداکثر جذب در طول موج‌های زیاد، بیشتر روی می‌دهد؛ بنابراین اولین گیرنده‌های نوری ممکن است سلول‌های مخروطی نارنجی-قرمز با حساسیت حداکثر در ۶۲۵ نانومتر باشند(شکل ۱۷) در حالی که سلول‌های مخروطی فرابنفش حساسیت حداکثر ۳۶۰ نانومتری دارند(حساسیت حداکثر ۶۲۵ نانوتر مرتبط با سلول‌های مخروطی نارنجی-قرمز، یک تخمین عملی بر پایه‌ی گونه‌های حیاتی قبلی است).



شکل ۱۷- اولین گیرنده‌های نوری که ممکن است سلول‌های مخروطی نارنجی-قرمز با حساسیت حداکثر در ۶۲۵ نانومتر باشند

بنابراین ممکن است هر یک از سلول‌های مخروطی فرابنفش، نارنجی-قرمز، آبی، سبز یا زرد ابتدا به وجود آمده باشند. برای هر یک از سناریوهای ممکن در به وجود آمدن این سلول‌ها شواهد قبلی وجود دارد. نکته‌ی مهم این است که داشتن حتی یک نمونه‌ی ساده از بینایی به یک گونه برتری قابل توجهی نسبت به سایر گونه‌ها می‌داده است.

اما داشتن تنها یک نوع سلول مخروطی به معنای محدود شدن به درصد کوچکی از طیف الکترومغناطیس است. در صورتی که یک گونه بتواند توانایی‌های بصری خود را به سایر قسمت‌های این طیف گسترش دهد، برتری تکاملی بیشتری خواهد داشت. به همین دلیل در بازه‌ی حدود چند صد میلیون سال بعد از این(حدود ۴۵۰ میلیون سال قبل) اجداد انسان‌های امروزی به چهار نوع مختلف از رنگ‌دانه‌های سلول‌های مخروطی مجهز شدند(شکل ۱۸). بر اساس شواهد، گسترش یافتن گیرنده‌های نوری Ciliary به چهار نوع مختلف سلول‌های مخروطی در زمانی قبل از ظهور گونه‌ی اجدادی مشترک پرندگان و ماهی‌ها و در حدود ۴۵۰ میلیون سال پیش روی داده است.

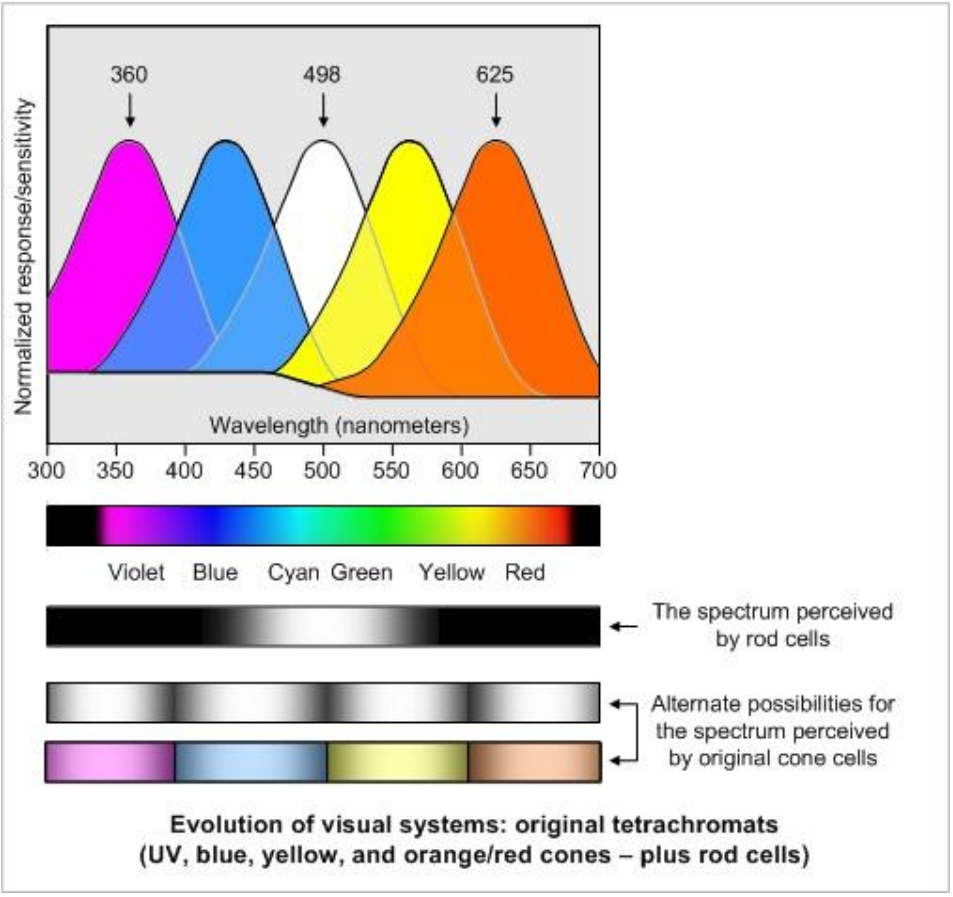


شکل ۱۸- چهار نوع مختلف از رنگ‌دانه‌های سلول‌های مخروطی چشم انسان

موجوداتی که تنها دو نوع از سلول‌های مخروطی دارند dichromat خوانده می‌شوند. به همین ترتیب موجودات با سه سلول مخروطی مختلف trichromats و چهار سلول tetrachromat نام دارند. توجه کنید که طیف دریافت شده توسط این موجودات به دو صورت نمایش داده شده است. یکی از این نمایش‌ها باندهای مختلفی از شدت نور سیاه و سفید را نمایش میدهد. دلیل این کار این است که زمانی که دومین نوع از سلول‌های مخروطی تکامل یافتند، سیگنال‌های خروجی از هر دو سلول به صورت مستقیم به سیستم عصبی یا مغذ موجود مورد نظر تحویل داده می‌شده است. به این ترتیب به احتمال زیاد سلول‌های مقایسه‌گری که امروزه وظیفه‌ی مقایسه‌ی خروجی‌های نسبی از سلول‌های مختلف مخروطی را به عهده دارند، در آن دوره تکامل نیافته بوند. به صورت مشابه، احتمالا این سلول‌های مقایسه‌گر زمانی که سلول‌های مخروطی سوم و چهارم تکامل یافتند نیز وجود نداشتند.

با دانستن این نکات، به نظر می‌رسد این نمایش تک رنگی از آن چه که در واقع وجود داشته، ضعیف‌تر است. این مساله به این دلیل است که حتی با عدم حضور سلول‌های مقایسه‌گر، هر نوع از سلول‌های مخروطی به شدت‌های مختلفی در محدوده‌ی طیفی خود پاسخ می‌دهد. به همین دلیل، باید طیف دریافت شده توسط این موجودات را به صورت یک جایگزین احتمالی نمایش قبلی نشان داد. همچنین همواره این احتمال وجود دارد که این موجودات سلول‌های مقایسه‌گر خاصی را به دست آورده باشند و از آن‌ها برای مقایسه‌ی خروجی‌های نسبی سلول‌های مخروطی مختلف استفاده کنند که به این ترتیب طیف‌های نور را به همان صورت موجودات امروزی دریافت می‌کرده‌اند.

در کنار مزیت‌های سلول‌های مخروطی، مشکلی که وجود دارد این است که این سلول تنها در نور روشن کار می‌کند. به همین دلیل سلول‌های میله‌ای شروع به ظهور کردند. پاسخ طیفی تمام گیرنده‌های نوری در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود. همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، سلول‌های میله‌ای بسیار بیشتر از سلول‌های مخروطی حساس هستند و این امکان دید در شب را ایجاد می‌کنند(با حضور سطوح کمی از نور ماه یا ستارگان). می‌توان این سلول‌ها را به صورت تعداد زیادی از آنتن‌ها (در حدود ۱۰۰ میلیون) که از مولکول شبکیه‌ی یکسانی با سلول‌های مخروطی شکل گرفته‌اند، نشان داد. اما در مورد این سلول‌ها، سلول شبکیه با مولکول رنگ‌دانه‌ای احاطه شده است که از پروتئین rhodopsin شکل گرفته است.



شکل ۱۹- پاسخ طیفی تمام گیرنده‌های نوری

زمان پیدایش سلول‌های میله‌ای مشخص نیست، اما سلول‌های میله‌ای موجود در چشم انسان احتمالا بعد از تقسیم مهره‌داران به دسته‌های مهره‌داران فک دار و بدون فک و در حدود ۴۵۰ تا ۵۰۰ میلیون سال قبل تشکیل شده‌اند. همان‌طور که قبلا اشاره شد، برخی شواهد نشان می‌دهند که حساسیت حداکثر در سلول‌های مخروطی به طیف اصلی موجود در نور ماه نزدیک است. بر پایه‌ی این پدیده، برخی این فرضیه را مطرح می‌کنند که سلول‌های میله‌ای ابتدا در موجودات شب‌رو پدیدار شده‌اند. هرچند که اشاره شد که در حقیقت جذب حداکثر سلول‌های میله‌ای (۴۹۸ نانومتر) دقیقا منطبق بر جز طیفی اصلی موجود در نور ماه که بین ۵۴۸ تا ۵۷۵ نانومتر است، نیست.

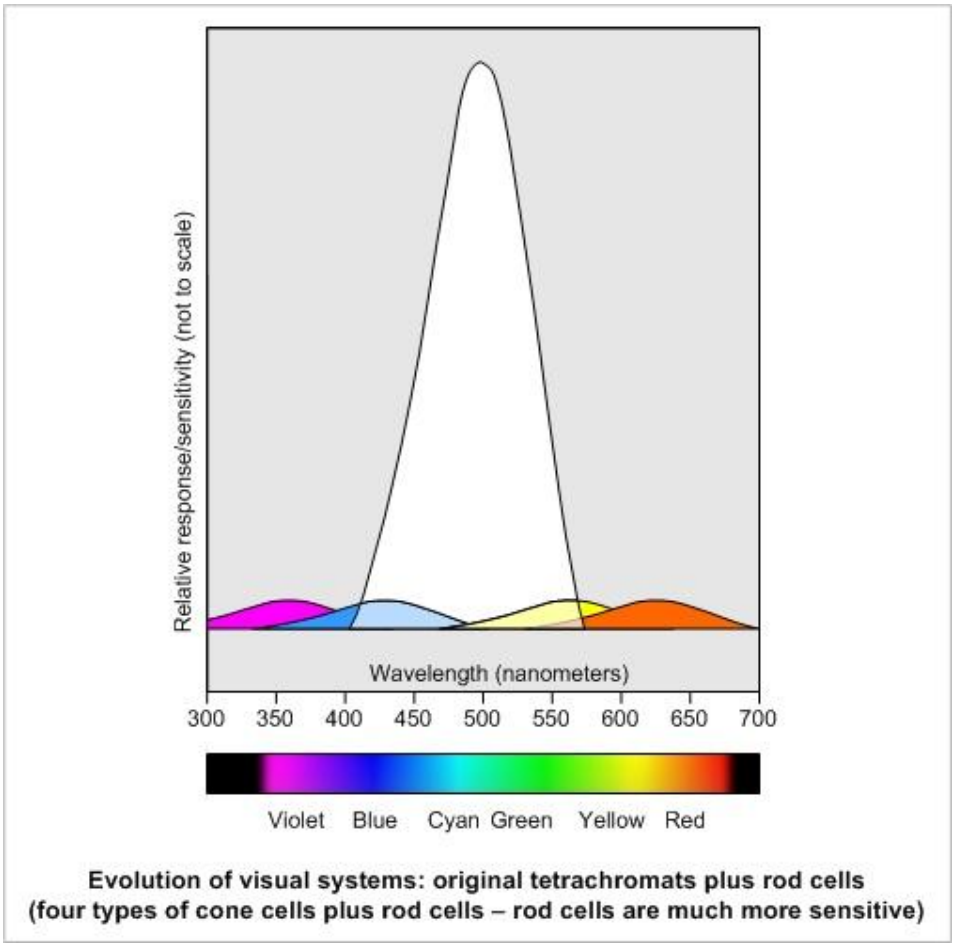
در حقیقت علت حساسیت حداکثر سلول‌های میله‌ای به یک طیف خاص مشخص نیست. در مقاله‌ی چاپ شده در فصل‌نامه‌ی بیولوژی (Quarterly Review of Biology) در سال ۱۹۹۰، Tim Goldsmith چند توضیح ممکن برای مکان نقطه‌ی قله در رنگ‌دانه‌های سلول‌های میله ای مهره‌داران می‌دهد (به طور فرضی تمام این رنگ‌دانه‌ها در موجودات ساکن خشکی دارای قله‌ای نزدیک ۵۰۰نانومتر هستند) و در نهایت به این نتیجه می‌رسد که هیچ‌کدام از توضیحات جاری برای این پدیده، قابل اتکا نیست.

سوالی که در این جا مطرح می‌شود این است که چرا سلول‌های میله‌ای به طیف‌هایی از نور واکنش می‌دهند که آن‌ها را به عنوان محدوده‌ی فیروزه‌ای-سبز از طیف می‌شناسیم و چرا هیچ فرمی از رنگ را دریافت نمی‌کنند و چرا موجوداتی که این سلول‌ها را دارند به عنوان pentachromat (دارای ۵ نوع سلول دریافت‌کننده‌ی رنگ) طبقه بندی نمی‌شوند.

تمام نمایش‌های قبلی پاسخ طیفی سلول‌های مخروطی و میله‌ای بر روی محور عمودی پاسخ نرمال شده را نمایش می‌دادند. به عبارت دیگر، منحنی‌ها به صورتی رسم شده‌اند که ارتفاع حداکثر یکسانی داشته باشند. اما همان‌طور که پیش‌تر اشاره شده، سلول‌های میله‌ای بسیار حساس‌تر از سلول‌های مخروط هستند. نمایش بعدی که اندازه‌بندی نشده است، قصد دارد تا این تفاوت را نشان دهد. به این ترتیب باید توجه کرد که سلول‌های مخروطی و استوانه‌ای در شرایط نوری یکسان رفتار مشابهی ندارند. سلول‌های مخروطی برای عملکرد صحیح نیاز به نور روشن دارند در حالی که سلول‌های میله‌ای در نور روشن اشباع می‌شوند و اطلاعات مفیدی تولید نمی‌کنند. در مقایسه، در نور کم در حالی که سلول‌های میله‌ای عملکرد مناسبی دارند سلول‌های مخروطی از کار افتاده و اطلاعات کم یا بی فایده‌ای تولید می‌کنند.

در مورد حیوانات امروزی، تنها اطلاعات استفاده شده از سلول‌های میله‌ای شدت نور است که از کانال‌های نوری چشم منتقل می‌شود. به عبارتی سیگنال‌های سلول‌های میله‌ای در کانال‌های رنگی چشم نقشی ندارند.

عبارات pentachromat، tetrachromat، trichromat و dichromat به صورت عمده متناظر با داشتن پنج، چهار، سه یا دو نوع سلول مخروطی هستند. به طور مشابه موجوداتی مانند میمون جغدی که تنها یک نوع سلول مخروطی دارند (در کنار سلول‌های میله‌ای) به عنوان monochromat شناخته می‌شوند(میمون جغدی به همین دلیل به عنوان میمون شب نیز شناخته می‌شود). به علاوه در مورد موجودات امروزی مانند ماهی skate که تنها سلول‌های میله‌ای دارند و فاقد سلول‌های استوانه‌ای هستند و همچنین در مورد انسان‌هایی که سلول‌های مخروطی چشم آن‌ها به درستی عمل نمی‌کند عبارت monochromat میله‌ای استفاده می‌شود تا این نوع از monochromat را از monochromatهایی که تنها یک نوع سلول مخروطی دارند تفکیک کند(شکل ۲۰).



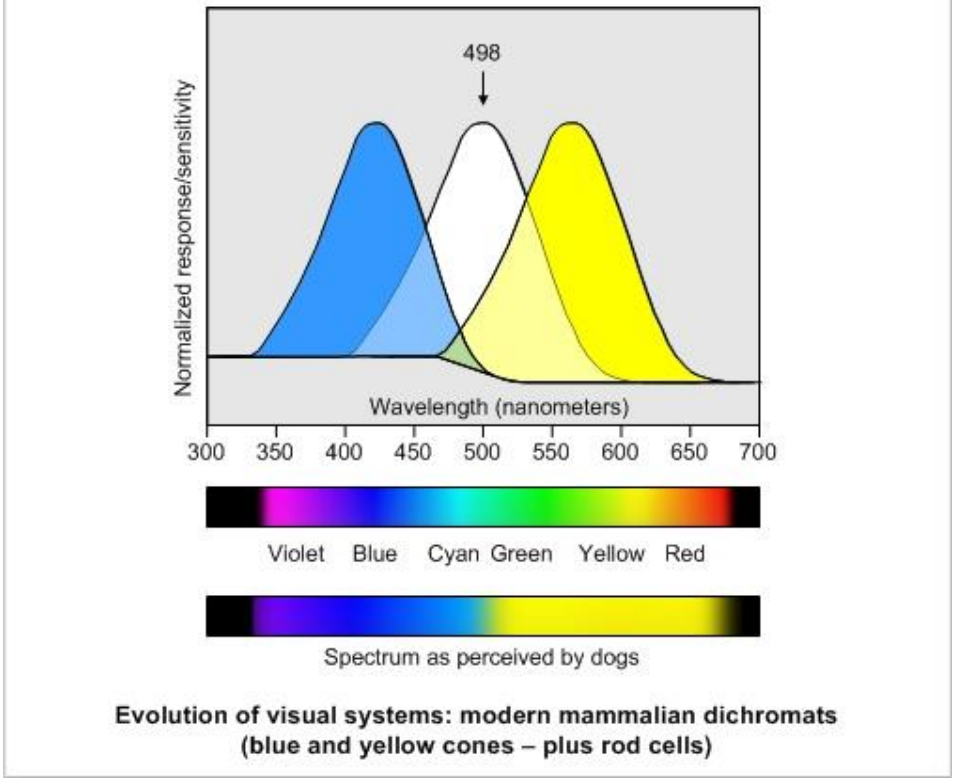
شکل ۲۰- وضعیت سلول‌ها در موجودات با بینایی تک رنگ که هر چهار نوع سلول مخروطی و سلول استوانه‌ای را دارا هستند

هر چند که در شکل ۲۰ دیده می‌شود که این موجودات دارای چهار نوع سلول مخروطی و همچنین سلول‌های میله‌ای بوده‌اند اما در حدود ۳۱۰ تا ۱۲۵ میلیون سال پیش، گونه‌های اجدادی اولین و سپس دومین نوع سلول رنگ‌دانه‌ای را از دست دادند. گرچه علت دقیق این پدیده مشخص نیست، اما یک احتمال این است که این موجودات شب‌رو شده باشند.

اولین حذف پس از تفکیک بین پستانداران و خزندگان در حدود ۲۸۸ تا ۳۳۸ میلیون سال پیش رخ داده است. سپس پستانداران به سه گروه تقسیم شدند: monotreme (تخم گذاران)، placental (زنده زاها) و marsupial (زنده‌زاهایی که نوزادان آن‌ها پس از تولد در کیسه نگه‌داری می‌شوند). با توجه به اطلاعات موجود، حذف اولین سلول مخروطی قبل از تقسیم placentalها و marsupialها روی داده است که مربوط به ۱۳۰ تا ۱۷۵ میلیون سال قبل است.

اولین پستاندار placental شناخته شده Eomaia Scansoria است در حالی که قدیمی‌ترین پستاندار marsupial شناخته شده Sinodelphys Szalayi است. هر دوی این موجودات در حدود ۱۲۵ میلیون سال قبل و در دوره‌ی Cretaceous می‌زیسته‌اند. دومین سلول مخروطی به احتمال زیاد قبل از ظهور جد اولیه‌ی placentalها رخ داده است که به نظر می‌رسد تنها دارای دو سلول رنگی مخروطی بوده است. موجوداتی که هنوز هم از این سیستم

برخوردار هستند(مانند سگ‌ها) به عنوان dichromat شناخته می‌شوند. پاسخ طیفی گیرنده‌های نوری این موجودات در شکل ۲۱ نشان داده می‌شود.



شکل ۲۱- وضعیت بینایی در موجودات دارای دو نوع سلول رنگی

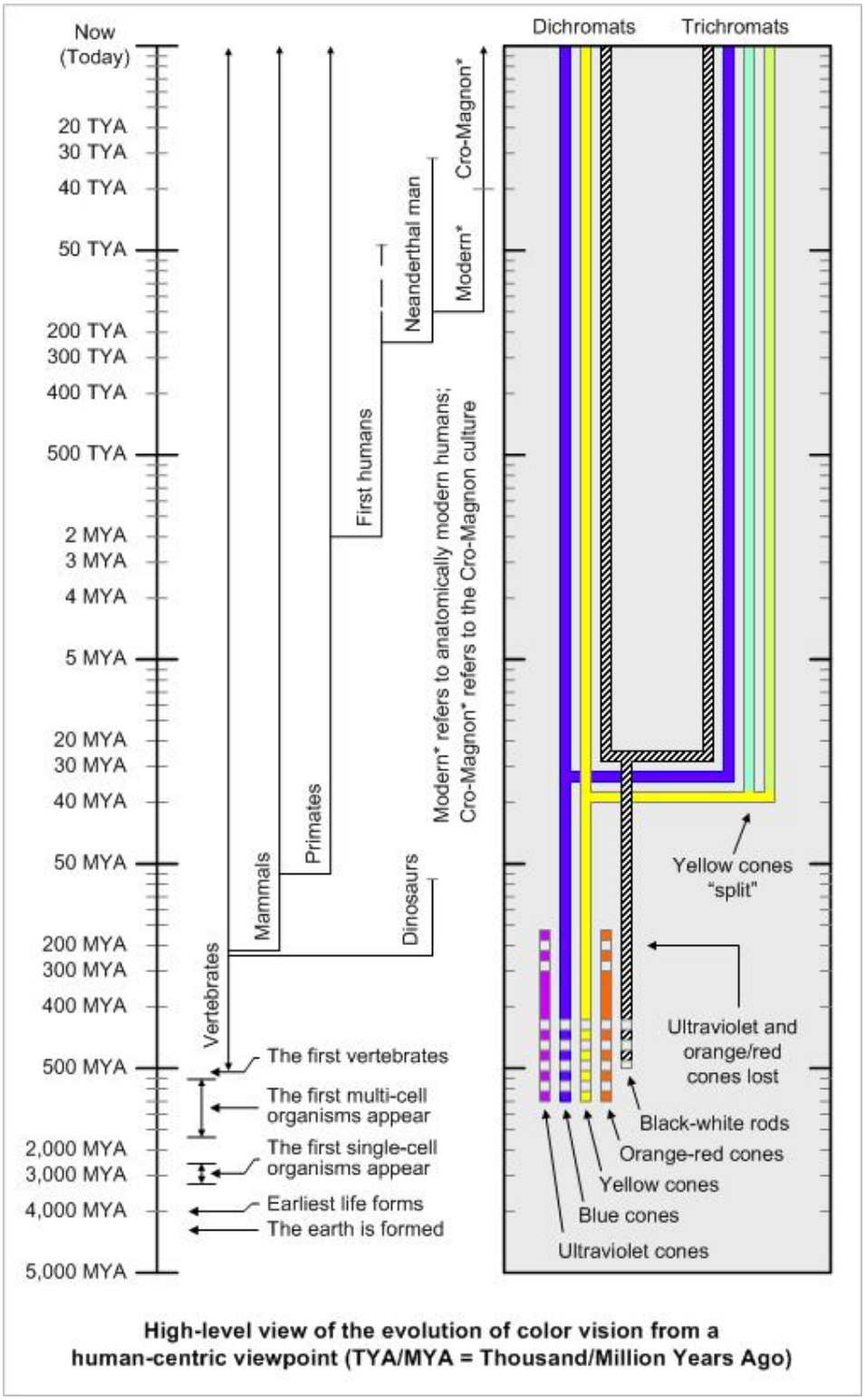
همچنین در طول دوره‌ی تکامل، موجودات به سلول‌های مقایسه‌گر در چشم خود دست یافتند که به آن ها امکان مقایسه‌ی سیگنال‌های خروجی از سلول‌های مخروطی مختلف و دریافت نتایج به عنوان رنگ‌های مختلف را می‌داده است. این به این معنی است که dichromatهای امروزی مانند سگ‌ها از قدرت بصری بسیار قوی‌تری از همتایان قدیمی خود برخوردارند.

در حدود ۳۰ تا ۴۰ میلیون سال قبل، نخستین‌هایی که بعدا به انسان تکامل یافتند سلول‌های مخرطی زرد خود را به دو نوع جدید آبی-سبز و زرد-سبز تقسیم کردند. گرچه تحلیل این مساله با توجه به نخستین‌ها و میمون‌های امروزی که غیر معمول هستند سخت است؛ اما می‌توان با اطمینان گفت که فرایند تقسیمی که به انسان سومین سلول رنگی نوری را داد، به فاصله‌ی کوتاهی بعد از تقسیم بین میمون‌های امروزی و قدیمی روی داده است. این مساله احتمالا مربوط به زمانی پس از Eosimias است که یک نخستین بود که در حدود ۴۰ تا ۴۵ میلیون سال پیش در چین امروزی می‌زیسته است.

به علاوه تحلیل استخوان‌های جمجه‌ی برخی از نخستین‌ها پیشنهاد می‌کند که تقسیم سلول‌های مخروطی در زمانی نزدیک به ظهور Aegyptopithecus Zeuxis رخ داده است (این تحلیل شامل مقایسه‌ی فسیل جمجمه‌ی موجودات باستانی با حیوانات امروزی‌ای که توانایی‌های بصری آن‌ها شناخته شده است و همچنین استفاده از شباهت‌ها و تفاوت‌های آن‌ها برای طراحی سناریوهای مختلف تکاملی است). این موجود که همچنین به نام میمون سحرگاهی هم

شناخته می‌شود، حیوانی کوچک جثه، دارای زندگی درختی و تغذیه از میوه‌ها بوده است که در حدود ۳۵ تا ۳۳ میلیون سال قبل در اوایل دوره‌ی Oligocene می‌زیسته است. بنابراین می‌توان ۳۴ میلیون سال قبل را زمانی مناسب برای آغاز تقسیم سلول‌های مخروطی به حساب آورد.

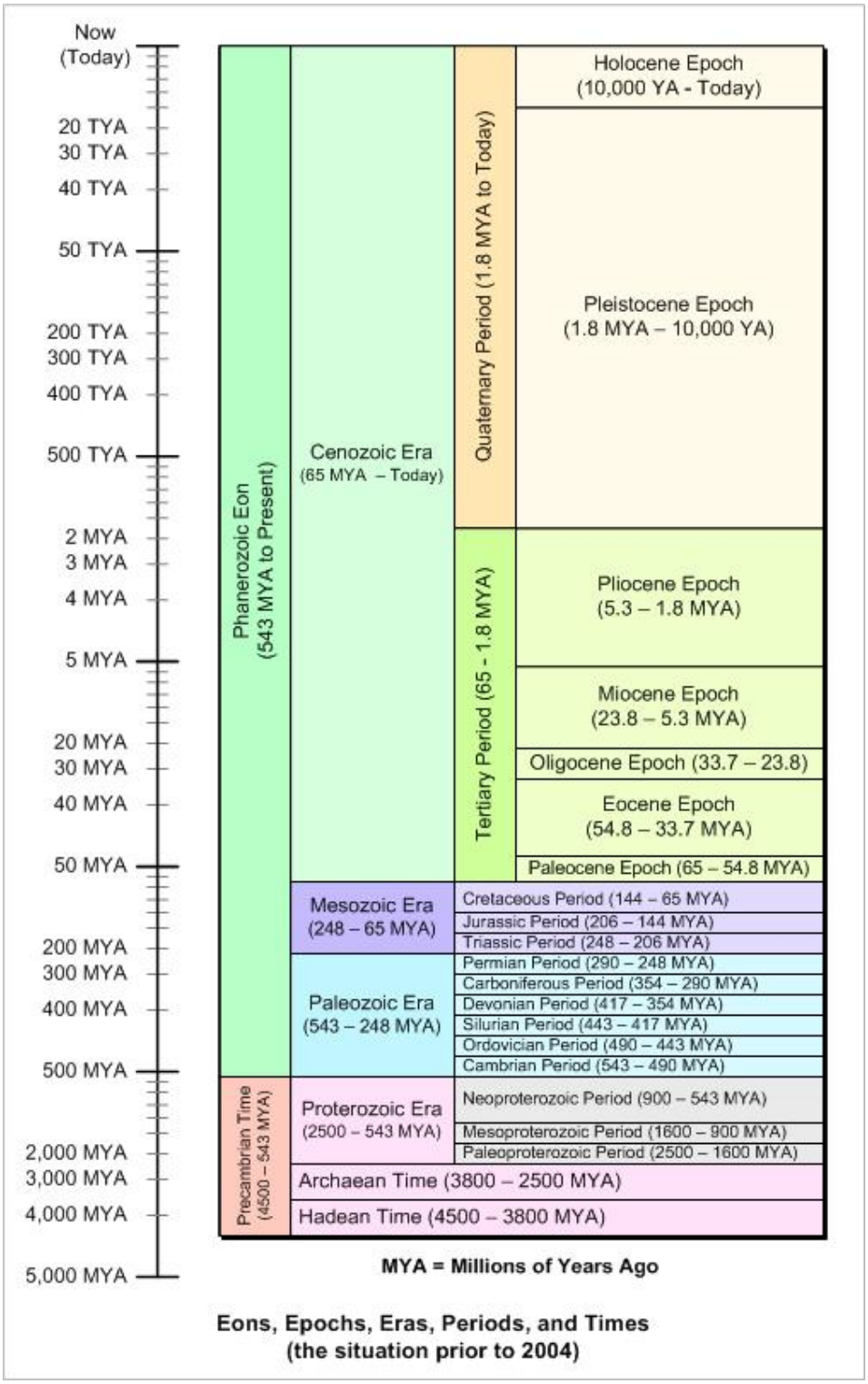
به علاوه انسان دارای سلول‌های مقایسه‌گر نیز هست که این امکان را به وی می‌دهند تا کل طیف بصری را دریافت و درک کند. در حال حاضر انسان دارای سه نوع سلول مخروطی است و به همین دلیل به عنوان trichromat شناخته می‌شود. در شکل ۲۲ دیاگرام زمانی‌ای که فرآیند تکامل را با تکامل بینایی رنگی ترکیب می‌کند، مشاهده می‌شود.



شکل ۲۲- ترکیب فرآیند تکامل با تکامل بینایی رنگی

قبل از ادامه، لازم است چند اصطلاح دیرینه‌شناسی و زمین‌شناسی بیشتر مورد بررسی قرار بگیرند. "eon" به عنوان بزرگ‌ترین تقسیم بندی زمان در زمین شناسی تلقی می‌شود و شامل دو یا چند "era" است. هر "era" به عنوان بخش بزرگی از زمان است و شامل چندین "period" است. هر "period" به عنوان واحد زمانی پایه‌ی زمین‌شناسی مطرح می‌شود که در آن یک سیستم سنگی شکل گرفته است و شامل دو یا چند "epoch" می‌شود که به عنوان زیر بخشی از واحد زمانی مطرح می‌شود. در نهایت هر "age" به بازه‌ای زمانی کوتاه‌تر از epoch گفته می‌شود که یک ویژگی خاص و منحصر به فرد دارد مانند Ice Age.

مشکلی که مطرح می‌شود این است که این اصطلاحات به صورت مداوم از طرف زمین‌شناسان در حال تغییر هستند. شکل ۲۳ نشان‌دهنده‌ی مثالی از این ترتیب دوره‌ها است که در منابع کنونی یافت می‌شود:



شکل ۲۳- مثالی از ترتیب دوره‌های زمین‌شناسی

۱۰– بینایی رنگی با بیش از سه دریافت‌کننده‌ی رنگ: Tetrachromatها و Pentachromatها.

برخی از حیوانات قابلیت تشخیص نور مادون قرمز را نیز دارند. برای مثال مارهای زنگی دارای حسگرهای مادون قرمز در سوراخ یا حفره‌ی در جلوی هر چشم خود هستند (به همین دلیل به آن‌ها مار حفره‌ای هم گفته می‌شود)
به علاوه برخی از پرنده‌ها و زنبورها چهار دریافت‌کننده‌ی رنگی مختلف در چشم خود دارند و به همین دلیل به عنوان tetrachromat شناخته می‌شوند (به طور خاص زنبورها در نور فرابنفش دید بسیار بیشتری نسبت به انسان دارند).
برخی از پروانه‌ها نیز دارای پنج دریافت‌کننده‌ی رنگ مختلف هستند و به عنوان pentachromat شناخته می‌شوند.
اخیرا برخی اکتشافات، گونه‌هایی از ماهی‌ها را شناسایی کرده‌اند (ماهی Cichlid از دریاچه های شرقی آفریقا) که ژن آن‌ها قابلیت کد کردن هفت نوع مختلف دریافت‌کننده‌ی رنگی مخروطی را دارا است. اما در هر ماهی منحصر به فرد تنها سه رنگ‌دانه فعال است. به این ترتیب در صورتی که یک دسته از این ماهی‌ها در شرایط نوری خاصی قرار بگیرند، نسل جدید دارای سه رنگ‌دانه‌ی فعال خاص خواهند بود و اگر همین دسته‌ی اولیه در شرایط نوری جدیدی قرار بگیرند، نسل جدید دارای سه رنگ‌دانه‌ی فعال متفاوت با قبل خواهد داشت. به این ترتیب این ماهی‌ها می‌توانند با شرایط نوری محیط جدید سازگار شوند.
میگوهای مانتیسی که قبلا به عنوان ملخ دریایی شناخته می‌شدنددر واقع میگو یا مانتیس نیستند و تنها ساختار فیزیکی مشابه این دو موجود دارند. این موجودات کوچک که گاها تا ۳۰ سانتی‌متر رشد و تا ۲۰ سال عمر می‌کنند، پیچیده‌ترین ساختار چشم را در قلمرو حیوانات دارند. جزییات پیچیده‌ی ساختار سیستم بینایی این موجودات (سه ناحیه‌ی متفاوت در هر چشم، حرکت مستقل هر چشم، بینایی سه‌وجهی (trinocular)، و ...) فراتر از حوصله‌ی این بحث است. اما دانشمندان دریافته اند که برخی از گونه‌های میگوی مانتیسی دارای ۱۶ گیرنده‌ی نوری مختلف هستند: ۸ گیرنده برای نور حوزه‌ی طیف مرئی، ۴ گیرنده‌ی فرابنفش و ۴ گیرنده‌ی تحلیل‌کننده‌ی نور قطبی‌شده. به عبارت دیگر، تنها در نور فرابنفش، سیستم بینایی این موجودات به اندازه‌ی انسان در نور مرئی قدرت دارد.
اما نکته‌ی جالب در این جا این است که درصد بسیار کمی از جنس مونث انسان tetrachromat هستند چرا که دارای چهار سلول مخروطی در چشم خود می‌باشند. هر سلول مخروطی می‌تواند حدود ۱۰۰ درجه از رنگ را تشخیص دهد، به این ترتیب سه سلول مخروطی امکان دیدن ۱۰۰*۱۰۰*۱۰۰=۱میلیون فام رنگ را به فرد می‌دهد. یک tetrachromat واقعی دارای سلول مخروطی چهارمی نیز هستن که قله‌ی حساسیت آن در جایی بین سلول‌های مخروطی آبی-سبز و زرد-قرمز قرار دارد. از نظر تئوریک، این افراد می‌توانند ۱۰۰*۱۰۰*۱۰۰*۱۰۰ = ۱۰۰ میلیون فام مختلف را تفکیک کنند.

پاسخ به این سوال که یک tetrachromat چگونه می‌بیند غیر ممکن است چرا که راهی برای تشریح این مساله وجود ندارد. اما مشخص است که این افراد بین رنگ‌هایی که ممکن است برای افراد عادی یکسان باشند تفاوت قائل هستند. برای مثال خانم Susan Hogan که یک طراح داخلی است این ویژگی را دارد. وی می‌تواند با نگاه کردن به نمونه‌های رنگی که مشتریانش آن‌ها را یکسان می‌بینند، در آن‌ها رگه‌های مختلف رنگی را مشاهده کند. یا در مثالی دیگر می‌تواند بین عمق‌های مختلف رودخانه و میزان گل در نقاط مختلف آب در نقاطی که برای سایر افراد یکسان به نظر میرسد، تفاوت قائل شود.

به این ترتیب tetrachromatها سیستم بینایی غنی‌تری از سایر افراد دارند. هر چند که این سیستم بینایی مشکلاتی نیز دارند چرا که برای مثال تصاویر نمایش داده شده بر روی صفحه‌ی تلویزیون و کامپیوتر که با ترکیب سه رنگ اولیه ساخته می‌شوند برای این افراد، واقعی به نظر نمی‌رسند (یا به طور مشابه تصاویر تشکیل شده توسط چاپگرهای رنگی).

در این جا سعی شده است تا نمایی از تصویری که شاید برای افراد عادی واقعی به نظر برسد، از دید یک tetrachromat نمایش داده شود. در تصویر زیر لباس فرد قرمز است و در جلوی یک خودروی آبی و زرد در یک محوطه‌ی سبز رنگ و آسمان آبی روشن در پس زمینه ایستاده است. در تصویر بالا از تمامی رنگ‌های ممکن استفاده شده است اما در شکل۲۴ تنها از یک پالت ناقص رنگ استفاده شده است که باعث شده تا همه چیز تخت‌تر و غیر یکنواخت‌تر به نظر برسد.

شکل ۲۴- نمایی از تصویری که شاید برای افراد عادی واقعی به نظر برسد، از دید یک tetrachromat

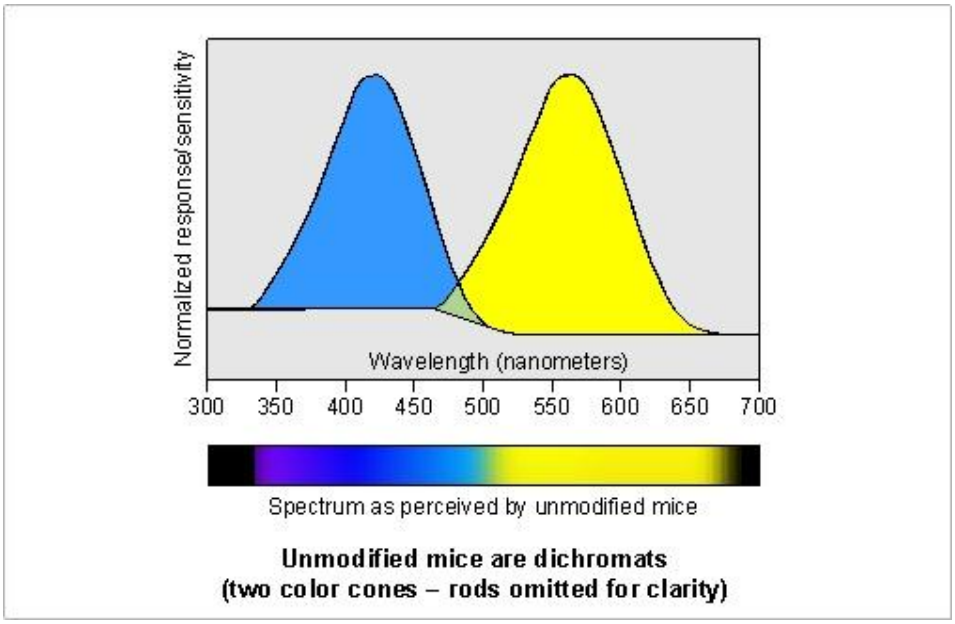
گرچه این تصویر کمی اغراق آمیز است اما ایده‌ی خوبی از مشکلات بینایی افراد tetrachromat می‌دهد. برای مثال این مساله در مورد تصاویر با کیفیت بالا که برای چشم افراد عادی لذت بخش است به وضوح نمایان خواهد شد و فرد tetrachromat نمایش مشابه واقعیت از این تصاویر نمی‌بینند.

با توجه به قسمت قبل، این سوال مطرح می‌شود که بینایی یک tetrachromat چگونه است و یا حتی چه می‌شد اگر انسان بینایی یک پروانه با پنج دریافت‌کننده‌ی رنگی مختلف و یا یک میگوی مانتیسی با ۱۶ دریافت کننده‌ی نوری را می‌داشت.

دو مشکل عمده با این مساله وجود دارد. اول این که آیا ساختار چشم انسان می‌تواند انواع بیشتری از دریافت‌کننده‌های نوری را در خود جای دهد. و دوم این که آیا مغز انسان قادر خواهد بود اطلاعات رسیده از این دریافت‌کننده‌های نوری جدید را به درستی پردازش کند؟

هر دوی این سوالات توسط محققین دانشگاه John Hopkins و دانشگاه کالیفرنیا در سانتا باربارا پاسخ داده شده‌اند و در ژورنال Science تاریخ ۲۳ مارس ۲۰۰۷ در قالب مقاله‌ای به چاپ رسیده‌اند.

همان طور که در مبحث تکامل بینایی رنگی بحث شد، در زمانی حدود ۴۵۰ میلیون سال قبل برخی موجودات اولیه که به مهره‌داران، دایناسورها، پستانداران و نخستین‌ها تکامل یافتند، دارای چهار سلول رنگ‌دانه‌ی مختلف بودند. سپس در بازه‌ی ۳۱۰ تا ۱۲۵ میلیون سال قبل، اجداد اولیه‌ی انسان‌ها امروزی اولین و سپس دومین نوع از این رنگ‌دانه‌ها را از دست دادند. نتیجه این شد که بسیاری از پستانداران –از جمله موش‌ها– dichromat هستند و تنها دو نوع سلول مخروطی دارند(شکل ۲۵) که به این ترتیب پالت رنگ دریافتی توسط آن‌ها به صورت زیر خواهد بود:



شکل ۲۵- وضعیت سلول‌های بینایی در موجودات dichromat

پس دنیای اطراف از دید یک موش معمولی چگونه است؟ برای جواب به این سوال دو تصویر زیر ارایه شده اند. در شکل ۲۶ تصویر بالا تصویر اصلی و تصویر پایین تغییر یافته‌ی تصویر اصلی به صورتی است موش با داشتن سلول‌های مخروطی زرد و آبی می‌بیند.

شکل ۲۶- دنیا از دید یک موجود dichromat

با همین ایده محققان یک ژن منفرد انسان را به کرومزم موش وارد کردند. نتیجه‌ی این کار اضافه شدن سلول مخروطی آبی-سبز انسان به سلول‌های مخروطی آبی و زرد قبلی موش بود. به علاوه آزمایشات نشان می‌دهند که مغز این موش‌های تغییر ژن یافته، خود را با فرآیند دریافت اطلاعات حسی از این دریافت‌کننده های جدید منطبق می‌کند و به این ترتیب به موش اجازه می‌دهد تا رنگ‌های بیشتری را مطابق دیاگرام زیر دریافت کند.

البته مشخص نیست که آیا این موش‌های تغییر یافته قادرند تا ژن جدید را به نسل‌های بعد از خود منتقل کنند. هرچند که به نظر می‌رسد کپی ژن تولید شده در کلنی پایدار است و به این ترتیب تا زمانی که اولا این کلنی به حیات خود ادامه می‌دهد و ثانیا سعی نشود تا از کلنی حذف شود، در مجموعه‌ی ژن‌ها باقی خواهد ماند.

گرچه اعمال این روش بر روی انسان هنوز زمان می‌برد اما اولین گام در این زمینه می‌تواند استفاده از این فرآیندها برای رفع نواقص در بینایی رنگی باشد. به عبارت دیگر به جای دادن توانایی‌های ویژه به مردم عادی، می توان به افراد غیر عادی (افرادی که از انواع مختلف کوررنگی رنج می‌برند) توانایی‌های عادی داد. برای مثال یک تا دو درصد از جمعیت انسان‌های مذکر تنها دو نوع سلول مخروطی دارند و می‌توانند از این روش برای به دست آوردن سومین نوع سلول بهره ببرند. به علاوه در حدود هفت درصد از مردان سه نوع سلول مخروطی دارند اما یکی از آن‌ها غیر عادی است و توانایی این افراد را در تفکیک رنگ‌ها کاهش می‌دهد. تمامی این افراد را می‌توان با این دستکاری‌های ژنتیکی درمان کرد.

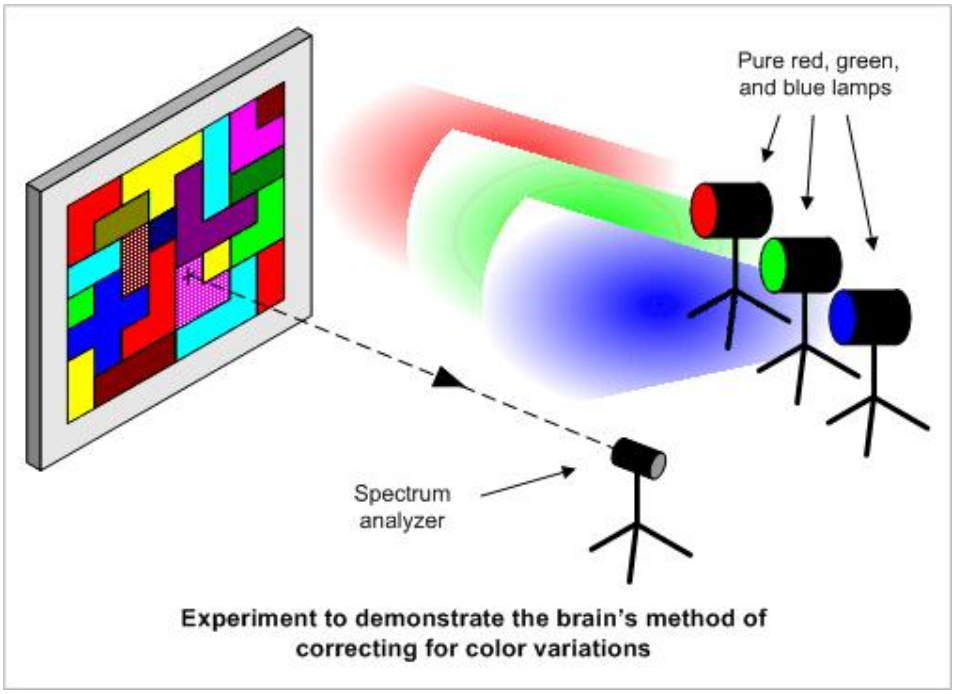
می‌توان متصور شد که در آینده علاوه بر استفاده از ویژگی‌های انسان‌های tetrachromat، سلول‌های مخروطی فرابنفش نیز به چشم انسان اضافه شوند. یا ممکن است همین نوع از ارتقاها برای سیستم بویایی یا چشایی انسان نیز مورد استفاده قرار بگیرند. همانند سگ‌های بازرس مواد مخدر که از این توانایی‌های ویژه استفاده می‌کنند.

۱۱– یک آزمایش جالب

روندی که در آن چشم رنگ‌های مختلف را تشخیص می‌دهد به صورت جالبی هوشمندانه است؛ اما این بخش فیزیکی از سیستم بینایی توسط بخش بسیار پیچیده پردازش تصویر در مغز کامل می‌شود. به عنوان مثال در نظر بگیرید که موکتی سبز رنگ و همرنگ چمن جلوی خانه سفارش داده شده است. اگر موکت را کنار چمن قرار دهید، این دو همرنگ به نظر می‌رسند، حال اگر همین موکت به داخل خانه منتقل شود، با این که شرایط نوری فرق کرده است، موکت همچنان به همان رنگ قبلی است یا به بیان بهتر، به همان رنگ قبل به نظر می‌رسد.

این حقیقت که یک شی مستقل از این که در کجا قرار گرفته است و چه نوری به آن می‌رسد، از نظر رنگ یکسان به نظر می‌رسد نکته‌ی قابل توجهی است. سازندگان اولین دوربین‌های رنگی تلویزیونی از این که اشیا رنگ‌های بسیار متفاوتی در فضای داخلی یا خارجی دارند، بسیار شگفت زده شدند.

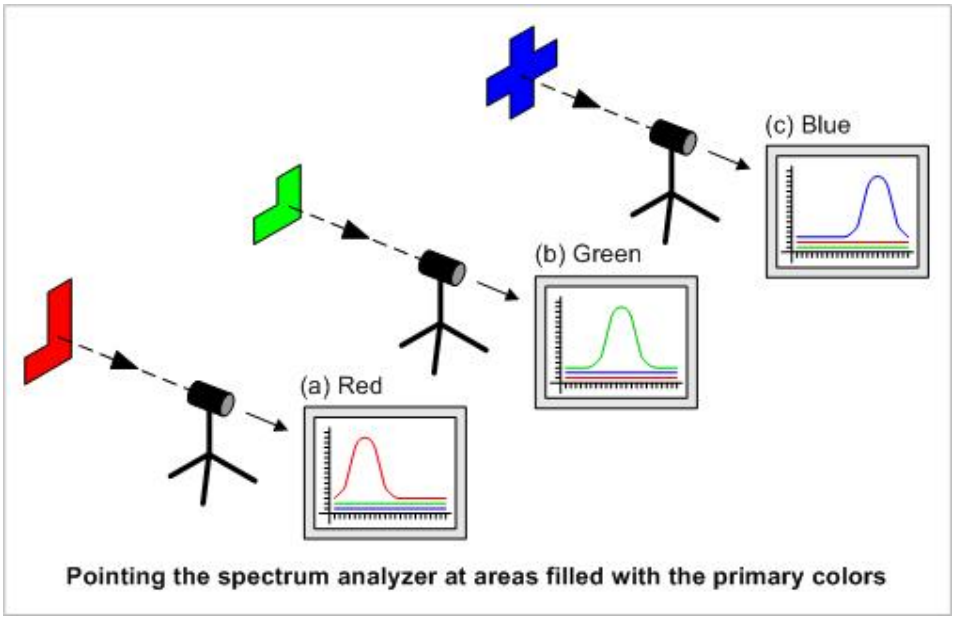
اولین سوالی که در این‌جا مطرح می‌شد این بود که چرا انسان این رنگ‌ها را متفاوت نمی‌بیند. در نهایت مشخص شد که این پدیده در حقیقت اتفاق می‌افتد اما مغز انسان بدون این که وی متوجه شود، این تغییر رنگ را اصلاح می‌کند. یکی از بهترین روش‌ها برای درک نحوه‌ی کار مغز در چنین شرایطی، در شکل ۲۷ آورده شده است:



شکل ۲۷- تحربه‌ی برای نمایش رفتار مغز در اصلاح رنگ‌ها

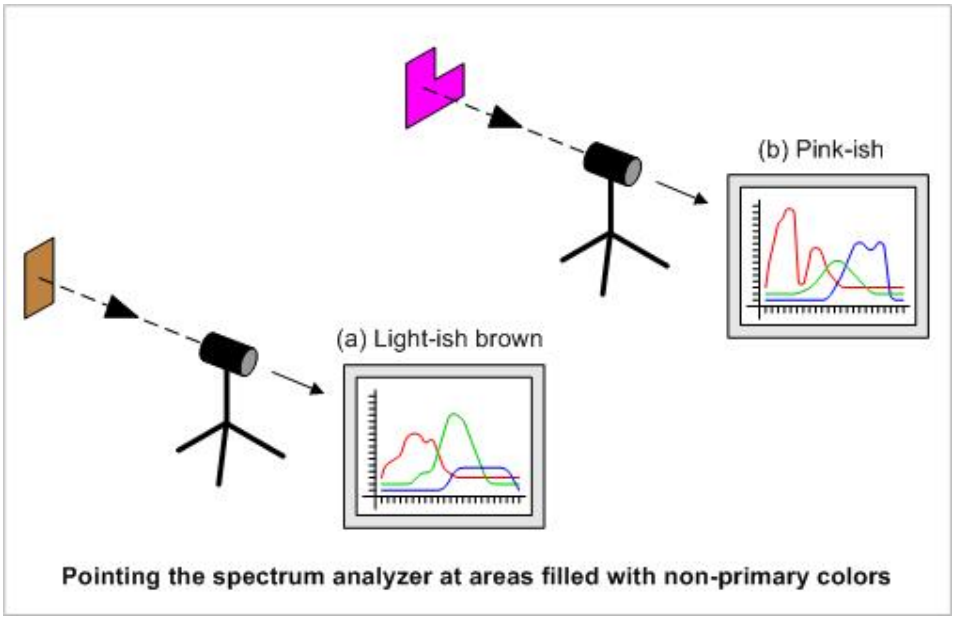
به منظور انجام این آزمایش، یک تخته با تعداد زیادی از انواع مختلف رنگ‌ها به صورت اشکال هندسی درهم نقاشی می‌شود. بعد از این سه منبع نوری که نورهای خالص قرمز، سبز و آبی را تولید می‌کنند و شدت یکسانی دارند برای نور دهی به این تخته در مقابل آن قرار می‌گیرند. ترکیب این سه منبع نوری خالص صفحه را با نور سفید روشن می‌کند.

در گام بعد، یک تحلیل‌گر طیفی به طرف تخته نشانه می‌رود. این تحلیل‌گر این امکان را دارد تا باندهای مختلف طیفی‌ای را که دریافت می‌کند از یکدیگر تفکیک کند. همچنین تحلیل‌گر به یک لنز تلسکوپی مجهز است که به آن امکان تمرکز بر روی اشکال خاص رسم شده بر روی تخته را می‌دهد. در صورتی که یک شکل با رنگ اولیه‌ی قرمز در نظر گرفته شود، شکل نور تابیده شده از منبع قرمز را به مقدار زیادی بازتاب می‌دهد در حالی که نور دریافت شده از منابع آبی و سبز را جذب می‌کند. در این صورت اگر تحلیل‌گر طیفی به این منطقه‌ی قرمز متمرکز شود، نور دریافت شده توسط آن حاوی جزء زیادی از نور قرمز با مقادیر کم از اجزای سبز و آبی مطابق شکل ۲۸ (قسمت a) خواهد بود.



شکل ۲۸- پاسخ اسپکتروم آنالایزر هنگام دریافت رنگ‌های اصلی

به طور مشابه اگر تحلیل‌گر به نقاط با رنگ‌های اولیه سبز یا آبی متمرکز شود، به ترتیب اجزای طیفی بزرگ سبز و آبی را خواهد دید. بعد از شکلی بر روی تخته در نظر گرفته می‌شود که با رنگ‌های اولیه (قرمز، سبز، آبی) رنگ‌آمیزی نشده باشد. فرض کنیم یکی از این اشکال دارای رنگ قهوه‌ای روشن و دیگری دارای رنگ صورتی باشد. هر دوی این رنگ‌ها مقادیری از نورهای قرمز، سبز و آبی را در مقادیر مختلف منعکس می‌کنند. به این ترتیب اگر تحلیل‌گر طیفی به سمت این دو شکل متمرکز شود، تفاوت دراجزای رنگی آن‌ها مشهود خواهد بود(شکل ۲۹).



شکل ۲۹- پاسخ اسپکتروم آنالایزر هنگام دریافت رنگ‌های فرعی

نتیجه‌ی منطقی این خواهد بود که تفاوت در مقادیر نور قرمز، سبز و آبی منعکس شده از این سطوح به آن‌ها رنگ خاص خود را می‌دهد؛ گرچه این نتیجه‌گیری درست است اما چشم فرآیند پیچیده‌تری را طی می‌کند. فرض کنیم که

تحلیل‌گر طیفی بر روی شکل صورتی متمرکز شده باشد و سپس شدت سه نور تابیده شده به آن را تغییر دهیم تا محیطی مصنوعی درست شود که در آن نور بازتابیده شده از این شکل دارای خصوصیاتی کاملا مشابه نور بازتابیده شده از شکل قهوه‌ای باشد. سوالی که مطرح می‌شود این است که اکنون شکل صورتی چه رنگی دارد؟

پاسخ اول این خواهد بود که از آن‌جا که اکنون اجزای رنگی دریافت شده از شکل صورتی مشابه شکل قهوه‌ای هستند، شکل صورتی باید همرنگ شکل قهوه‌ای (بدون دستکاری شدت‌ها) به نظر برسد. اما در حقیقت این طور نیست و رنگ جدید شکل صورتی، قهوه‌ای نخواهد بود (رنگ بقیه‌ی اشکال روی تخته نیز تغییر می‌کند).

حالا فرض کنیم که یک قطعه‌ی بزرگ سفید به اندازه‌ی تخته انتخاب شود و تنها قسمتی دقیقا هم اندازه‌ی شکل صورتی از آن بریده شود و این قطعه به صورتی بر روی تخته قرار بگیرد که تنها شکل صورتی قابل مشاهده باشد. در صورتی که شرایط نور مصنوعی به همان صورت قبل حفظ شود، شکل صورتی اکنون قهوه‌ای روشن به نظر خواهد رسید. به طور مشابه اگر این مراحل را برای هر یک از شکل‌های دیگر انجام می‌دادیم، تغییر رنگ به همین صورت اتفاق می‌افتاد.

اگرچه اگر قطعه‌ی سفید اکنون برداشته شود به صورتی که تمام تخته قابل دیدن باشد، شکل صورتی دوباره صورتی رنگ به نظر می‌رسد و سایر رنگ‌ها نیز طبق انتظار مانند قبل خواهند بود.

آن چه که در حقیقت اتفاق می‌افتد این است که در صورتی که تنها یک شکل دیده شود، مغزهیچ منبع دیگری به جز این که رنگ شکل را با تحلیل سه طیف قرمز، سبز و آبی منعکس شده از آن، تفسیر کند در اختیار ندارد. در مقابل اگر بتوان رنگ شکل را در کنار رنگ سایر اشیا دید، مغز با انجام عملیات خاص پردازش سیگنال، رنگی را که اشکال باید داشته باشند تعین می‌کند و تمامی رنگ‌ها را قبل از تحویل اطلاعات به بخش خودآگاه خود، تنظیم می‌کند.

به بیانی دیگر، مغز یک نقشه‌ی رنگ سه بعدی تهیه می‌کند که در آن هر رنگ نسبت به تمام سایر رنگ‌ه، یک وزن دارد. به این ترتیب هنگامی که بتوان تمام تخته را دید، مغز به صورت خودکار تمامی نسبت‌های رنگی را محاسبه کرده و آن چه که واقعا دیده می‌شود را تنظیم می‌کند تا با آن چه که انتظار می‌رود، تطبیق داشته باشد.

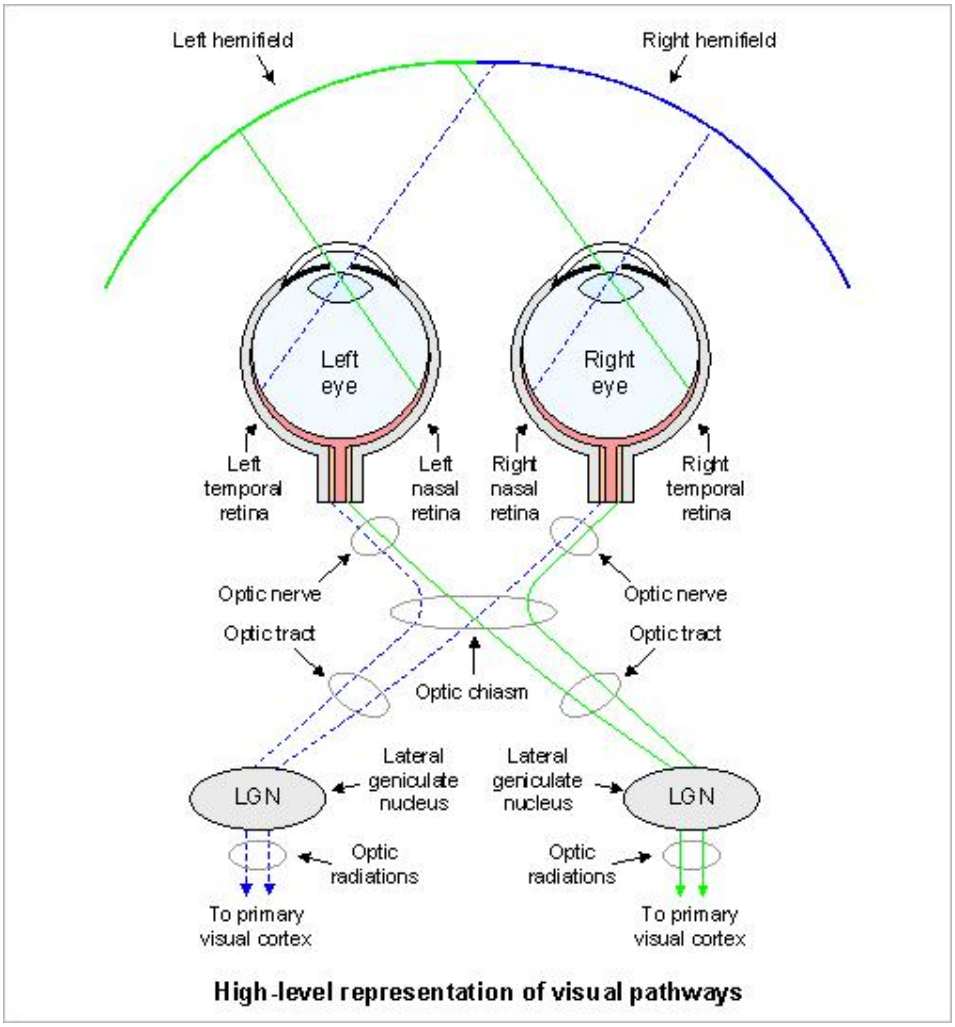
سوالی که مطرح می‌شود این است که چرا طبیعت این کار را انجام می‌دهد؟ آیا واقعا مهم است که رنگ اشیا ثابت به نظر برسد. در حقیقت این امکان وجود دارد که یک دوربین تلویزیونی را به نحوی تنظیم کرد تا تصاویر را به نحوی ثبت کند که اگر مغز عملیات پردازشی خود را انجام نمی‌داد، به نظر می‌رسیدند. به این ترتیب برای مثال اگر یک فیلم از یک تاکسی زرد رنگ گرفته شود، هنگامی که تاکسی وارد سایه می‌شود، تغییر رنگ قابل ملاحظه‌ای می‌دهد.

به این ترتیب پردازش سیگنال انجام شده توسط مغز ارزش حیاتی دارد چرا که در حیات وحش تغییر رنگ مداوم باعث سردرگمی موجودات زنده و در خطر قرار گرفتن آن ها می‌شود.

۱۲- چپ به راست و بالا به پایین

در مبحث "چگونه بینایی رنگی کار می‌کند" گفته شد که بعد از انجام برخی پردازش بر روی سیگنال‌ها در چشم، این سیگنال‌ها در داخل عصب بینایی به ناحیه‌ی کورتکس بصری مغز منتقل می‌شوند. همچنین گفته شد که در این بیان کمی ساده‌سازی وجود دارد و آن چه در عمل اتفاق می‌افتد از این پیچیده‌تر است.

همچنین در انتهای مبحث "معکوس کردن اجسام" گفته شد که وجود لنز در چشم به این معنی است که تصاویر به صورت معکوس بر روی شبکیه می‌افتند. در واقعیت، تصاویر همان طور که در شکل ۳۰ نشان داده شده است، در صفحه‌ی افقی نیز معکوس می‌شوند:



شکل ۳۰- بیان سطح بالایی از مسیر سیگنال در سیستم بصری

عبارت hemifield به هر یک از دو نیمه‌ی منطقه‌ی حسی اشاره می‌کند. در مورد بینایی، در صورتی که خطی مستقیم از بینی فرد به فاصله‌ی دور رسم شود، منطقه‌های بینایی سمت چپ و راست این خط به عنوان hemifield چپ و hemifield راست شناخته می‌شوند.

برای هر دو چشم، اطلاعات از hemifield چپ بر روی سمت راست شبکیه منعکس می‌شود و اطلاعات از hemiofield سمت راست بر روی سمت چپ شبکیه منعکس می‌شود. در مورد چشم چپ، قسمت سمت راست شبکیه، شبکیه‌ی چپی سمت بینی (left nasal retina) نامیده می‌شود چرا که نزدیک به بینی است و قسمت سمت راست آن، شبکیه‌ی سمت گیجگاه چپ نامیده می‌شود چون نزدیک به گیجگاه سمت چپ است. در مقابل و در مورد چشم راست، قسمت سمت راست شبکیه، شبکیه‌ی سمت گیجگاه راست و قسمت سمت چپ آن، شبکیه‌ی سمت بینی راست نامیده می‌شود.

نیمه‌ی سمت چپ مغز، سمت راست بدن و نیمه‌ی سمت راست آن، سمت چپ بدن را کنترل می‌کند. به این ترتیب می‌توان گفت که نیمه‌ی سمت چپ مغز تنها به اطلاعات hemifield راست و نیمه‌ی سمت راست آن تنها به اطلاعات hemifield چپ علاقه‌مند هستند.

مشکل این جاست که مقدار زیادی هم پوشانی در تصاویر دریافت شده توسط دو چشم وجود دارد. برای تعامل با این مساله، توده‌های فیبرهای تشکیل دهنده‌ی عصب‌های بینایی از هر دو چشم، ابتدا از ناحیه‌ای به نام optic chiasm عبور می‌کنند و در آن جا به صورتی مرتب می‌شوند تا اطلاعات دریافت شده از hemifieldهای چپ و راست از یکدیگر تفکیک شوند.

بعد از تقسیم‌بندی صورت گرفته در optic chiasm، توده‌های فیبر خروجی، optic tract یا رشته‌های بینایی نامیده می‌شوند. این رشته‌ها به ناحیه‌ای در مغز میانی به نام lateral geniculate nucleus (LGN) یا هسته‌ی خمیده‌ی پسین منتهی می‌شوند و بعد از این فیبرهای عصبی به عنوان optic radiations یا تشعشعات نوری شناخته می‌شوند؛ این سیگنال‌ها نهایتا به کورتکس بصری اولیه در پس مغز تحویل داده می‌شوند.

در صورت نیاز به اطلاعات بیش‌تر می‌توان به مقاله با عنوان گذرگاه‌های بصری پایه (Basic Visual Pathways) از دانشکده‌ی پزشکی دانشگاه واشنگتن مراجعه کرد. همچنین پایگاه WebVision دانشگاه Utah نیز حاوی اطلاعات مفیدی در این زمینه است.

۱۳– دیدن صداها و چشیدن رنگ‌ها

لغت synaesthesia،از کلمات یونانی syn به معنی واحد و همزمان و aesthesis به معنی حس یا درک مشتق شده است و به معنای حس همزمان یا هماهنگ است.

در کاربرد این لغت اشاره به شرایط مختلفی دارد که در آن‌ها تحریک یک مجموعه از ورودی‌های حسی (مانند صدا) به صورت همزمان توسط سایر حس‌ها مانند بینایی یا لامسه درک می‌شود.

انواع مختلفی از synaesthesia وجود دارد اما در این‌جا به طور ویژه به آن‌هایی علاقه‌مند هستیم که با بینایی رنگی سروکار دارند. یکی از انواع رایج این پدیده هنگامی است که افراد، اعداد و حروف الفبا را به رنگ‌های مختلف نسبت می‌دهند. برای مثال، حالتی را در نظر بگیرید که یک شخص غیر synaesthete (شخص با عدم توانایی synaesthesia)، حروف چاپ شده به رنگ سیاه بر روی یک صفحه‌ی سفید را می‌بیند (شکل ۳۱).

شکل ۳۱- تصاویر مورد استفاده برای نمایش رفتار افراد با عدم توانایی synaesthesia

حال همان حروف که هنوز در قالب متن سیاه رنگ نمایش داده شده‌اند از دید یک شخص دارای توانایی synaesthete به صورت شکل ۳۲ خواهند بود:

شکل ۳۲- تصویر شکل (۳۱) از دید یک شخص دارای توانایی synaesthete

توجه کنید که شکل ۳۲ تنها یک نمایش ساده است که توسط نویسنده‌ی این مقاله تهیه شده است. هر شخص synaesthete (از این نوع) رنگ‌های مخصوص به خود را برای الفبا در نظر می‌گیرد. تحقیقات بر روی تعداد زیادی از اشخاص synaesthete نشان می‌دهد که برای مثال برای حرف ’a‘ اغلب رنگ قرمز، برای حرف ’b‘ اغلب رنگ آبی، برای ’c‘ رنگ زرد و به همین ترتیب در ذهن اشخاص در نظر گرفته می‌شود.

نکته‌ی دیگر این است که برخی از افراد synaesthete، حروف را سیاه می‌بینند اما رنگ‌ها را به عنوان وابستگی به این حروف درک می‌کنند. در مقابل، سایر synaesthete واقعا حروف را با رنگ‌های گفته شده می‌بینند و درک می‌کنند.

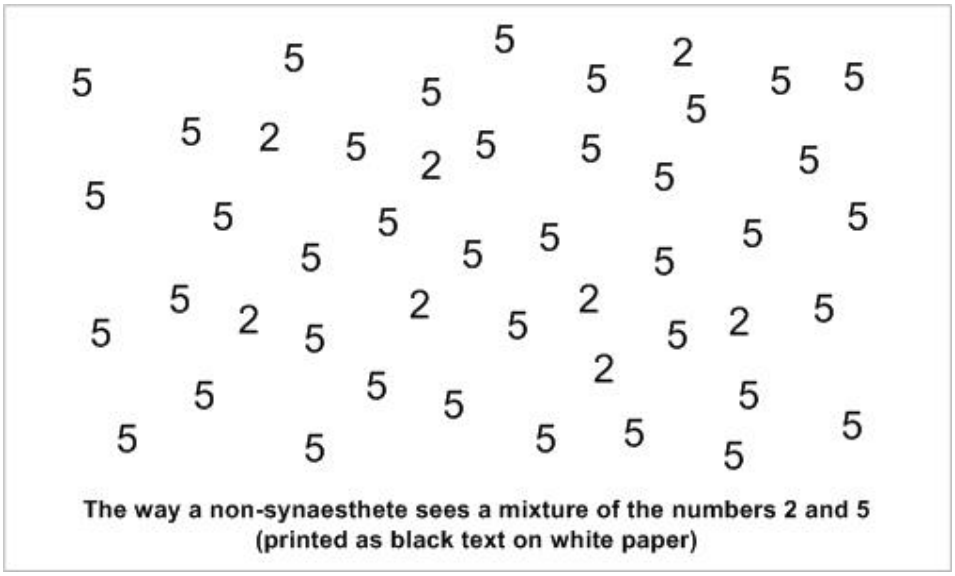
در مورد کلمات نیز می‌توان به شکل ۳۳ اشاره کرد که دید یک شخص غیر synaesthete از یک مجموعه کلمات سیاه چاپ شده بر روی یک صفحه‌ی سفید است.

شکل ۳۳- تصویر شکل (۳۱) از دید یک شخص بدون توانایی synaesthete

برای برخی افراد synaesthete هر کلمه رنگی مشتق شده از حروف سازنده‌ی آن را دارد (یا این رنگ به عنوان وابستگی برای این کلمه درک می‌شود) و در مقابل برای سایر افراد synaesthete کلمات دارای رنگ‌هایی هستند که ربطی به حروف تشکیل دهنده‌ی آن‌ها ندارد. یک مثال از این مورد درشکل ۳۴ نمایش داده شده است:

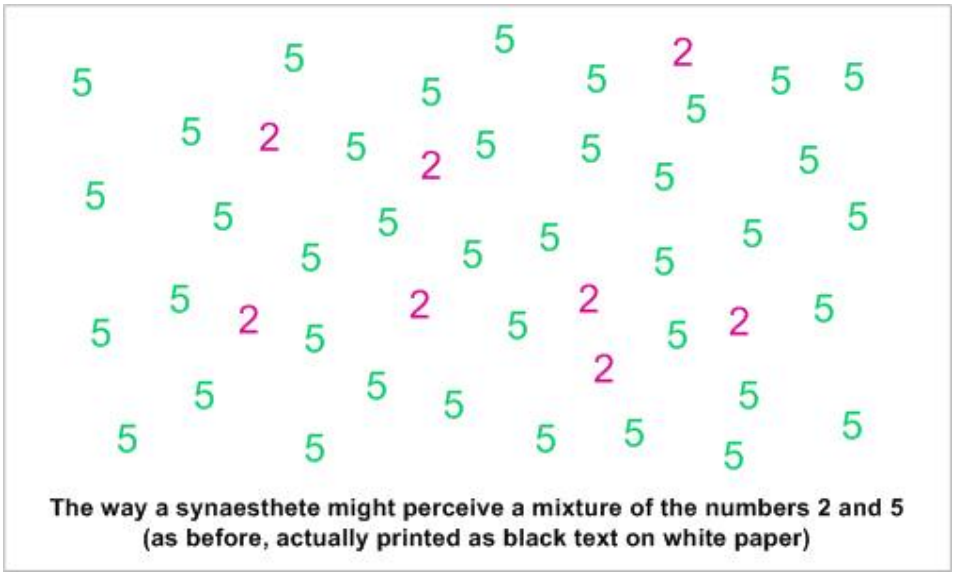
شکل ۳۴- تصویر شکل (۳۱) از دید برخی افراد دارای توانایی synaesthete

در مثالی مشابه، شکل ۳۵ را در نظر بگیرید که نمایشی تصادفی از اعداد ۲ و ۵ است. آیا می‌توان به سرعت تعداد ۲ ها را در این شکل شمرد؟



شکل ۳۵- تصویری نمونه برای ارزیابی synaesthete

برای اشخاص غیر synaesthete شمردن تعداد ۲ها در شکل ۳۵ نیاز با تمرکز دارد. اما یک شخص synaesthete این تصویر را به صورت شکل ۳۶ دریافت می‌کند.



شکل ۳۶- نحوه‌ی رویت یک فرد synaesthete از تصویر (۳۵)

اکنون به سادگی مشخص است که ۸ عدد ۲ در این تصویر با تعداد زیادی ۵ احاطه شده‌اند.

نکته‌ی قابل توجه این است که synaesthesia یک حس اضافی است به این معنی که حس‌های اولیه را می‌پوشاند. همچنین باید به خاطر داشت که انواع مختلفی از synaesthesia وجود دارد. برای مثال هنگامی که برخی از افراد synaesthete صدای موسیقی را می‌شنوند، ممکن است الگوهایی از رنگ‌های متغیر را متصور شوند یا ممکن است یک نواخت صدای فلوت به صورت مجموعه‌ای از اشکال رنگی به نظر برسد.

سوالی که مطرح می‌شود این است که چه تعدادی از افراد، synaesthete هستند؟ شمردن این تعداد به دلیل وجود انواع مختلف، سخت است (شنیدن موسیقی ممکن است احساس لامسه یا بویای را تحریک کند) و همچنین افراد مختلف سطوح مختلفی از این احساس را دارند (از احساس یک رنگ خاص تا دیدن آن رنگ). برخی تخمین‌ها تعداد این افراد را یک نفر در ۲۵۰۰۰ یا یک نفر در ۲۰۰۰ نفر در نظر می‌گیرند؛ حتی اعتقاد به وجود یک نفر در صد نفر با این ویژگی نیز وجود دارد.

در صورتی که از افراد خواسته شود تا برای مثال به هر نت پیانو یک رنگ نسبت دهند، اکثر افراد رنگ‌های تیره را به نت‌های پایین‌تر و رنگ‌های روشن را به نت‌های بالاتر نسبت می‌دهند؛ به این ترتیب هرچند که اعداد بالا نسبتا زیاد به نظر می‌رسند اما اکثر افراد تا حدودی synaesthete هستند.

۱۴– نکات جالب دیگر

در این قسمت نکات کوچک و جالب در مورد بینایی به طور کل و بینایی رنگی به طور خاص مورد اشاره قرار گرفته است. برای مثال موجوداتی با نام ستاره‌دریایی شکننده (brittle star) که با نام علمی Ophiocoma wendtii شناخته می‌شوند دارای پنج بازوی بزرگ خارج شده از بدنه‌ی اصلی خود هستند که گاها طول این بازوها به ۶۰ سانتی‌متر نیز می‌رسد. بدن این موجودات با صدها لنز و گیرنده‌های نوری مرتبط پوشانیده شده است که به آن‌ها اجازه می‌دهد تا نزدیک شدن دشمن را حس کنند و به این ترتیب بدن آن‌ها مانند یک چشم بزرگ عمل می‌کند.

در ادامه به سایر موارد قابل توجه در زمینه‌ی بینایی اشاره می‌شود:

هر چشم مرکب مگس معمولی از ۳۰۰۰ لنز تشکیل شده است.

بعضی از گونه‌های قورباغه بیش‌تر از یک نوع سلول میله‌ای در شبکیه‌ی خود دارند.

ماهی طلایی معمولی (ماهی قرمز) تنها ماهی‌ای است که می‌تواند علاوه بر طیف مرئی، طیف‌های مادون قرمز و فرابنفش را نیز ببیند.

هر چشم ماهی مرکب بزرگ، ۲۵ سانتی‌متر قطر دارد و شبکیه‌ی آن می‌تواند تا یک میلیارد گیرنده‌ی نوری داشته باشد.

در ادامه یک سری سوالات که توسط آقای Mickey P. Rowe که یک محقق دراین زمینه است پاسخ داده شده‌اند، آورده شده است:

آیا موجوداتی وجود دارند که شبکیه‌ی آن‌ها تنها دارای سلول میله‌ای و نه مخروطی باشد؟

تنها موجود مهره‌دار بر روی زمین که شبکیه‌ی آن دارای سلول‌های میله‌ای است و هیچ سلول مخروطی ندارد، Raja Erinacea است. این موجود که یک نوع ماهی دوزیست است از خانواده‌ی ماهیان چهارگوش عظیم‌الجثه‌ای است که در حدود ۴۰۰ میلیون سال در اقیانوس‌ها می‌زیسته‌اند. (تا مدت‌ها تصور بر این بود که موش‌ها سلول مخروطی ندارند اما امروزه می‌دانیم که دارای دو نوع سلول مخروط هستند که یکی به نور فرابنفش حساس است اما تعداد این سلول‌های مخروطی در مقایسه با سایر حیوانات بسیار کم است).

ماربنددار معمولی تنها دارای سلول‌های مخروطی (چهار نوع) است. البته باید توجه کرد که چشم مارها در مقایسه با سایر مهره‌داران، غیر معمول است. همچنین شبکیه‌ی چشم برخی حیوانات به طور عمده با سلول‌های مخروطی پوشانده شده است. برای مثال سنجاب زمینی از این نوع است. این موجودات دارای تعداد کمی سلول میله‌ای هستند.

آیا موجوداتی وجود دارند که تنها دارای یک نوع سلول مخروطی به همراه سلول‌های میله‌ای باشند؟

به دلایل نامعلوم تمام انواع وال‌ها، دلفین‌ها، خوک‌های دریایی، شیرهای دریایی و ... به این صورت هستند. این موجودات قابلیت ساخت سلول‌های مخروطی حساس به امواج کوتاه را از دست داده‌اند.کدینگ ژن‌ها برای رنگ‌دانه‌ها مرتب شده است و سلول‌های مخروطی S در این موجودات کار نمی‌کنند و علاوه بر این مکانیزم تولید سلول‌های مخروطی در این موجودات تخریب شده است.

گونه‌های مختلف ماهی‌ها به طور عمده در محدوده‌های عمقی خاص از آب زندگی می‌کنند و ماهی‌هایی که در اعماق بیش‌تر زندگی م‌کنند تعداد کم‌تری سلول مخروطی دارند. در عمیق ترین دریاچه‌ی شناخته شده (Lake Baikal) می‌توان ماهی‌هایی با یک تا چهار سلول مخروطی را پیدا کرد. این مساله برای اقیانوس‌ها نیز درست است بنابراین نباید تعجب کرد اگر ماهی‌هایی بدون سلول مخروطی و تنها با سلول‌های میله‌ای در این مکان‌ها یافت شوندد. همان‌طور که در مبحث "تکامل بینایی رنگی" گفته شد، تمام این حیوانات از اجدادی مشتق شده‌اند که دارای چهار نوع سلول مخروطی بوده‌اند. هر چقدر که این موجودات با زندگی در سطوح کم‌تر نوری منطبق می‌شوند تعداد بیش‌تری از انواع سلول‌های مخروطی خود را از دست می‌دهند. مشخص نیست که داشتن سلول مخروطی بیش‌تر چه هزینه‌ای دارد و ممکن است که تنها نیازی به مزیت‌های داشتن آن‌ها در نور کم‌تر (و بینایی تک‌رنگی بیشتر) کم‌تر شود و به این ترتیب سلول‌های مخروطی به صورت تصادفی کاهش یابند؛ اما مشخص است که هر چقدر عمق محیط زندگی یک ماهی افزایش می‌یابد، تعداد سلول‌های مخروطی نیز کاهش می‌یابند.

چه نکات قابل توجه دیگری راجع به سلول‌های مخروطی و میله‌ای وجود دارد؟

سلول‌های مخروطی و میله‌ای به دلیل شکل ظاهری به این ترتیب نام‌گذاری شده‌اند. اما بعدا که تفاوت‌های عملکرد این دو نوع سلول مشخص شد، این نام‌ها به عملکرد آن‌ها نسبت داده شد. سلول‌های میله‌ای، گیرنده‌هایی هستند ه تحت شدت نور کم کار می‌کنند و سلول‌های مخروطی، گیرنده‌های نوری‌ای هستند که تحت شدت نور نسبتا بالا کار می‌کنند.

اما مسایل هنگامی که برخی از این سلول‌ها در شرایط نوری متفاوتی با سلول‌هایی که از آن‌ها مشتق شده‌اند، کار می‌کنند پیچیده می‌شود. به طور خاص برخی سلول‌ها در شبکیه‌ی مارمولک خانگی وجود دارند که خواص هر دوی سلول‌های میله‌ای و مخروطی معمول را از خود نشان می‌دهند. در سال ۱۹۳۰، Gordon Walls پیشنهاد کرد که سلول‌های میله‌ای به صورت تکاملی ممکن است به سلول‌های مخروطی تبدیل شوند و برعکس. شواهد اخیر نشان می‌دهد که پیشنهاد Walls درست بوده است. برخی از انواع مارمولک‌ها در ماداگاسکار، شبکیه‌ای دارند که هیچ سلول میله‌ای ندارد اما این مارمولک‌ها از حیواناتی مشتق شده‌اند که شبکیه‌ی آن‌ها تنها دارای سلول میله‌ای است. به این ترتیب با موجودی روبرو هستیم که شبکیه‌ی آن هیچ سلول میله‌ای ندارد اما برخی یا تمام گیرنده‌های نوری آن از سلول‌های میله‌ای مشتق شده است و عقیده بر این است که سلول‌های میله‌ای که این سلول‌های مخروطی از آن ها مشتق شده‌اند، خود از سلول‌های مخروطی مشتق شده بودند.

مراجع

1. http://www.diycalculator.com/sp-cvision.shtml