

Вопросы ФИЗИКИ И ТЕХНИКИ

СУЩНОСТЬ НЕКОТОРЫХ НОВЫХ ОПЫТОВ ПО ЦВЕТНОМУ ЗРЕНИЮ

М. М. Бонгард и М. С. Смирнов

(Институт биофизики АН СССР)

В последнее время значительно повысился интерес к проблеме цветного зрения, чему в немалой степени содействовало появление сенсационных сообщений об опытах американского исследователя Ленда, описания которых зачастую сопровождались утверждениями, что эти опыты опровергают трехкомпонентную теорию цветного зрения.

Сущность опытов Ленда состоит в следующем.

С одного и того же набора разноцветных предметов делается две черно-белых фотографии через два разных светофильтра (например, через красный и желтый) и изготавливаются два диапозитива. Затем эти диапозитивы проецируются на один и тот же экран через соответствующие фильтры (красный и желтый). Когда человек смотрит на полученное таким способом совмещенное изображение, ему кажется, что оно содержит не только красные, оранжевые и желтые цвета, но и зеленые и синие. Ленд утверждает, что таким способом можно все цвета получить с помощью только двух и что это опровергает трехкомпонентную теорию зрения. Чтобы решить, опровергается ли опытами Ленда трехкомпонентная теория цветного зрения, рассмотрим сущ-

ность этой теории, опыты, на которых она базируется, и сопоставим их с опытом Ленда.

Что такое цветное зрение

К сожалению, иногда еще можно встретить утверждение, что цветное зрение — это по сути дела различная чувствительность глаза к световым лучам разных длин волн. Это неверно. В самом деле, даже полностью цветнослепые люди (они составляют примерно одну миллионную часть человечества), воспринимающие мир как черно-белый, имеют весьма неравномерное распределение чувствительности по спектру. Максимальная в сине-зеленой части спектра чувствительность спадает к красному и фиолетовому его концам.

Ближе к истине утверждение, что цветное зрение — это способность человека (или животного) различать предметы по цвету, именно по цвету, а не по яркости. Однако и это утверждение нуждается в существенном дополнении. Дело в том, что необходимо еще указать, каким способом можно определить «по цвету» или «по яркости» различает предметы наблюдатель.

Может показаться, что проще всего спросить об этом самого испытуемого. Однако если, например, показать цветнослепому человеку огурец и морковь и спросить его, чем они различаются, то он ответит: огурец зеленый, а морковь красная. Дело в том, что для него все красные предметы кажутся темными, а зеленые — относительно светлыми. Поэтому он с детства знает, что нельзя называть светлые (для его глаза) предметы красными, а темные зелеными. Конечно, цветнослепой человек часто ошибается, но разбираться в его «высказываниях о цвете» довольно сложно. Во всяком случае, на вопрос о том, видят ли они различные цвета, большинство цветнослепых с уверенностью отвечает утвердительно.

Чтобы обойти трудность выяснения того, «по цвету» или «по яркости» различает предметы наблюдатель, можно воспользоваться следующим методом (см. рис. 1).

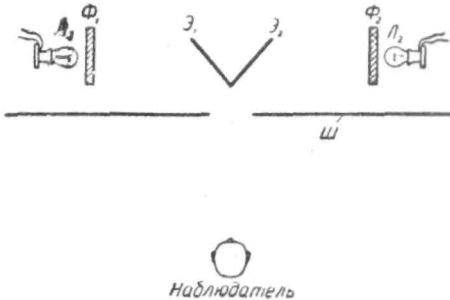


Рис. 1.

Два белых экрана \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 освещаются лампами L_1 и L_2 через разные (например, зеленый и красный) светофильтры Φ_1 и Φ_2 . Накал ламп можно изменять. Испытуемый наблюдатель через отверстие в непрозрачной ширме $Ш$ видит одновременно часть экрана \mathcal{E}_1 и часть экрана \mathcal{E}_2 (рис. 2).

Если наблюдатель обладает цветным зрением, то, как бы ни изменялся накал ламп L_1 и L_2 (лишь бы они не были обе погашены), экраны \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 не могут стать для него неотличимыми друг от друга.

Иная картина будет, если наблюдатель цветнослепой. В этом случае

при любом накале лампы L_1 всегда можно подобрать такой накал лампы L_2 , что экраны будут для этого наблюдателя неотличимыми.

Таким образом, нам удалось обойти трудность выяснения того,

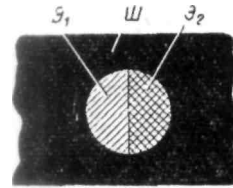


Рис. 2.

«по цвету» или «по яркости» различает предметы наблюдатель. Мы можем теперь вести эксперимент, спрашивая наблюдателя лишь о том, различает ли он между собой половины поля, и никогда не спрашивая его о том, чем они отличаются друг от друга.

Воспользовавшись описанным методом, можно объективно судить о том, какой из испытуемых наблюдателей обладает цветным зрением, а какой является цветнослепым.

Теперь можно уточнить, что же следует понимать под цветным зрением. Цветное зрение — это зрение, исключающее возможность сделать два излучения разного спектрального состава неотличимыми для наблюдателя с помощью одного лишь изменения мощностей этих излучений.

Мы видим, что для определения понятия «цветное зрение» нам пришлось рассмотреть способ экспериментального обнаружения цветного зрения. Это понятно: ведь «определить величину — это значит указать способ ее измерения».

Спектральная чувствительность

«Чувствительность селенового фотоэлемента к свету с длиной волны 6000 \AA в два раза больше, чем к свету с длиной волны 4000 \AA ». Каков точный смысл этой фразы? Вообще говоря, можно по-разному условиться, что понимать под «спектральной чувствительностью». По ряду причин, которые мы не имеем возможности подробно здесь рас-

смаатривать¹, удобнее всего придавать приведенной выше фразе следующий смысл: если при воздействии на селеновый фотоэлемент света с длиной волны 6000 \AA при мощности этого света W фотоэлемент дает ток I , то при воздействии света с длиной волны 4000 \AA при мощности $2W$ фотоэлемент также даст ток I .

Другими словами, относительная спектральная чувствительной некоторой системы (фотоэлемента, фотопластинки, глаза) для двух длин волн — это величина, обратная отношению энергий излучений этих длин волн, взаимозаменяемых для системы, то есть приводящих систему в одно и то же состояние²².

Пользуясь таким определением, легко измерить спектральную чувствительность глаза человека, не имеющего цветного зрения. Очевидно, для этой работы нам придется только несколько изменить прибор, изображенный на рисунке 1. Вместо осветителей, состоящих из ламп и светофильтров, нужно поставить два монохроматора. Кроме того, надо добавить устройство, позволяющее измерять мощности световых потоков (например, зачерненная термопара).

Опыт будет заключаться в подборе таких мощностей излучений с разными длинами волн, чтобы наблюдателю половинки поля зрения казались одинаковыми, а затем — в измерении этих мощностей.

Такой прибор в принципе годится для определения спектральной чувствительности любого светочувствительного устройства. Например, если сделать серию фотографий поля зрения прибора при разных соотношениях мощностей двух излучений и добиться одинаковой черноты половинок изображений, то можно определить спектральную чувствительность фотоэмульсии.

¹ Одна из них — это нелинейная зависимость фототока от мощности света.

² Отметим, что существуют системы, для которых можно подбирать взаимозаменяемые излучения с разными длинами волн, и все же бессмысленно говорить о спектральной чувствительности. Здесь такие системы не рассматриваются.

Однако если воспользоваться универсальностью этого прибора и попытаться определить спектральную чувствительность глаза человека, имеющего цветное зрение, то такая попытка обречена на полную неудачу. Ни при каких соотношениях мощностей такой человек не перестанет различать между собой половинки поля зрения. Ведь в этом и есть смысл самого утверждения, что он обладает цветным зрением. Получается заколдованный круг: если удастся измерить кривую спектральной чувствительности, значит человек цветнослепой; если у человека есть цветное зрение, принципиально не удастся измерить его спектральную чувствительность.

Обойти эту трудность невозможно. Свойства «иметь цветное зрение» и «иметь спектральную чувствительность» несовместны.

К сожалению, в некоторых книгах по физиологической оптике и по физике можно встретить известный график, называемый кривой спектральной чувствительности человеческого глаза. Эта кривая имеет определенный физиологический смысл (не будем здесь подробно на нем останавливаться), но получена она не в опытах на полную взаимозаменяемость излучений и поэтому лишь по недоразумению иногда называется кривой спектральной чувствительности.

Итак, систему, обладающую цветным зрением, невозможно охарактеризовать спектральной чувствительностью. Однако нельзя ли ввести какие-то другие характеристики, пригодные для описания таких систем?

Модели цветного зрения

«Цветное зрение» цветнослепого наблюдателя можно воспроизвести с помощью простой модели (рис. 3).

Действительно, система, изображенная на рисунке 3, «цветнослепая», так как для любых двух спектральных составов можно подобрать такие мощности излучений, что гальванометр даст одинаковые отклонения.

Процедура измерения спектральной чувствительности такой систе-

мы³ совершенно эквивалентна процедуре измерения спектральной чувствительности цветного человека. Нужно подбирать такие мощности монохроматических излучений с разными длинами волн, чтобы получать отклонения стрелки

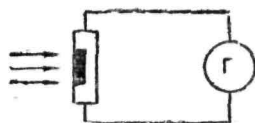


Рис 3.

гальванометра до одного и того же (безразлично какого) деления.

Может показаться, что полученная с помощью таких измерений кривая спектральной чувствительности характеризует всю систему в целом (и фотоэлемент и гальванометр). Однако это не так. Легко видеть, что если между фотоэлементом и гальванометром включить некоторый преобразователь с произвольной⁴ характеристикой (рис. 4),

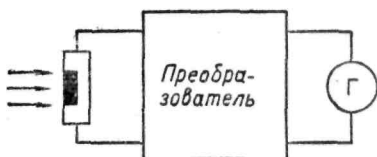


Рис. 4.

то, измерив относительную спектральную чувствительность этой новой системы, мы получим ту же самую кривую. Для доказательства этого положения достаточно отметить, что вследствие монотонности функции $i_{\text{вых}} = f(i_{\text{вх}})$ совпадение токов $i_{\text{вых}}$ при различных излучениях, попадающих на фотоэлемент,

³ Мы всюду будем считать, что рассматриваемые фотоэлементы имеют спектральную чувствительность и, кроме того, «аддитивны»; последнее означает, что если излучения A и B вызывают равные фототоки и излучения C и D также вызывают равные фототоки (не обязательно такие же, как A и B), то излучения $A+C$ и $B+D$ будут вызывать одинаковые токи.

⁴ Единственное ограничение, налагаемое на свойства преобразователя, — это монотонная зависимость выходного тока от входного.

может иметь место только при совпадении токов $i_{\text{вх}}$.

Таким образом, хотя в процессе измерения спектральной чувствительности участвует вся система, полученная кривая характеризует свойства лишь фотоэлемента («приемника света»).

Только если заменить, например, селеновый фотоэлемент на купроксильный, то спектральная чувствительность модели может измениться. Того же результата можно добиться, поставив перед фотоэлементом цветной светофильтр.

Читатель, вероятно, заметил, что измерения спектральной чувствительности аналогично взвешиванию методом тарирования, когда тело неизвестного веса заменяется (а не уравнивается) гирями. При этом даже на неверных весах получается верный результат.

Перейдем к рассмотрению работы модели с «цветным зрением» (рис. 5).

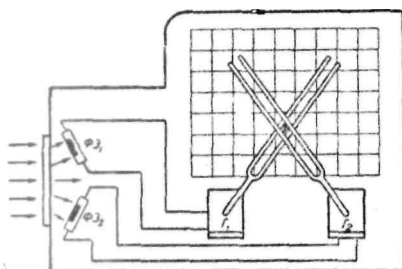


Рис. 5.

Свет попадает на молочное стекло, рассеивается и освещает два фотоэлемента $\Phi Э_1$ и $\Phi Э_2$ с разными кривыми спектральной чувствительности. Гальванометры Γ_1 и Γ_2 , с которыми соединены фотоэлементы, имеют не стрелки, а вилки, перемещающие штифт, несущий на своем конце лампочку. Обращенная к читателю стенка ящика сделана из молочного стекла и имеет координатную сетку, на которой мы видим светящуюся точку (над лампочкой).

Покажем, что эта система обладает цветным зрением. Для этого нам нужно доказать, что никакой мощностью света с одной длиной

волны систему нельзя привести в такое же состояние, в какое ее приводит свет с другой длиной волны. Напомним, что о состоянии системы мы узнаем по положению светящейся точки на панели прибора.

Два излучения приводят систему в одинаковые состояния в том и только в том случае, если они вызывают одинаковые отклонения обоих гальванометров, а значит, и одинаковые фототоки обоих фотоэлементов. Пусть относительная спектральная чувствительность фотоэлемента $\Phi_{Э1}$ есть $K_1(\lambda)$, а фотоэлемента $\Phi_{Э2}$ — $K_2(\lambda)$ (рис. 6).

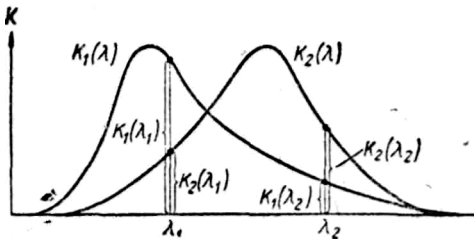


Рис. 6.

Допустим, мы хотим «уравнять» для прибора излучения с длинами волн λ_1 и λ_2 . Для того чтобы эти излучения вызывали одинаковый фототок первого фотоэлемента, требуется отношение мощностей излучений

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{K_1(\lambda_1)}{K_1(\lambda_2)}. \quad (1)$$

С другой стороны, для равенства фототоков второго фотоэлемента должно выполняться соотношение

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{K_2(\lambda_1)}{K_2(\lambda_2)}. \quad (2)$$

Рассмотрим два случая.

1. Спектральные чувствительности $\Phi_{Э1}$ и $\Phi_{Э2}$ таковы, что для всех λ выполняется соотношение

$$\frac{K_1(\lambda)}{K_2(\lambda)} = \text{const.} \quad (3)$$

В этом случае соотношения (1) и (2) совместны и можно подобрать мощности W_1 и W_2 так, чтобы излучения были взаимозаменяемы для модели. Но выполнение условия (3) означает, что взятые фотоэлементы

имеют одну и ту же относительную спектральную чувствительность, а это и приводит к отсутствию цветного зрения у системы.

2. Существуют две такие длины волны λ_1 и λ_2 , что

$$\frac{K_1(\lambda_1)}{K_2(\lambda_1)} \neq \frac{K_1(\lambda_2)}{K_2(\lambda_2)}.$$

Тогда соотношения (1) и (2) — несовместны. Это значит, что невозможно подобрать мощности W_1 и W_2 так, чтобы привести систему в одно и то же состояние, то есть модель обладает цветным зрением.

Итак, нельзя излучение с одной длиной волны заменить на излучение с другой длиной волны так, чтобы наша модель этого «не заметила» (светящаяся точка не переместилась бы). Попробуем, нельзя ли «обмануть» модель несколько более сложным способом — произвести замену не на монохроматическое излучение, а на смесь двух монохроматических излучений.

Пусть мы имеем излучение с длиной волны λ_3 и мощностью W_3 . Допустим, что можно подобрать такую смесь излучений с длинами волн λ_1 и λ_2 , что наша модель не может отличить эту смесь от излучения λ_3 (рис. 7). Обозначим мощ-

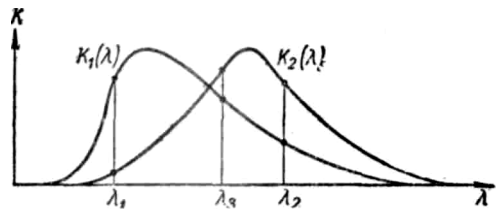


Рис. 7.

ности компонент с длинами волн λ_1 и λ_2 через W_1 и W_2 . Условие взаимозаменяемости⁵ для первого фотоэлемента запишется так:

$$W_3 K_1(\lambda_3) = W_1 K_1(\lambda_1) + W_2 K_1(\lambda_2). \quad (4)$$

⁵ При выводе 4 и 5 используется свойство «аддитивности» фотоэлементов (см. сноску 3).

Требование взаимозаменяемости для второго фотоэлемента приводит к аналогичному уравнению:

$$W_3 K_2(\lambda_3) = W_1 K_2(\lambda_1) + W_2 K_2(\lambda_2). \quad (5)$$

В случае, если

$$\left. \begin{matrix} K_1(\lambda_1) & K_1(\lambda_2) \\ K_2(\lambda_1) & K_2(\lambda_2) \end{matrix} \right\} \neq 0, \quad (6)$$

эти уравнения совместны и, значит, для любого монохроматического излучения можно подобрать такие мощности W_1 и W_2 , что смесь будет неотличима от монохроматического излучения.

Следует отметить, что решение системы уравнений может привести к отрицательному значению одной из мощностей (W_1 или W_2). Допустим, что получилась отрицательной мощность W_1 . Физический смысл этого таков: если взять смесь излучения с длиной волны λ_1 мощностью «— W_1 » и излучения с длиной волны λ_3 мощностью W_3 , то такая смесь неотличима для модели от излучения с длиной волны λ_2 мощностью W_3 .

В дальнейшем мы будем для краткости говорить про излучения, для которых можно так подобрать мощности, чтобы смесь одной группы излучений была неотличимой от смеси другой группы, что они линейно зависимы для системы.

Мы рассмотрели только случай, когда выполняется соотношение (6). Добавив к этому случай, когда детерминант в формуле (6) равен нулю, легко прийти к заключению: для рассматриваемой модели любые три монохроматических излучения являются линейно зависимыми. Нескольким труднее доказать, но справедливо и следующее утверждение: «для модели (рис. 5) линейно зависимы произвольные три излучения».

Напомним, что доказанное ранее наличие у модели цветного зрения можно описать так: «существуют два излучения, линейно независимые для модели». Эти свойства относятся к схеме, содержащей два фотоэлемента с разными кривыми спек-

тральной чувствительности (два «приемника света»).

Цветослепая модель (рис. 3) имеет один приемник света и для нее любые два излучения линейно независимы.

Аналогично можно показать, что для системы, содержащей три приемника света с разными кривыми спектральной чувствительности, будут существовать тройки линейно независимых излучений, но любые четыре излучения будут линейно зависимыми и т. д.

Эти соображения дают в руки исследователя метод, с помощью которого он может узнать, сколько «приемников света» содержит система даже в случаях недоступности для наблюдения ее внутреннего устройства. Действительно, нужно только экспериментально проверить, какое существует максимальное число линейно независимых излучений для системы. Если, например, существует 5 линейно независимых излучений, а любые 6 излучений линейно зависимы, то это означает, что система обладает пятью приемниками.

Опыты со смесями излучений (их обычно называют опытами по «сложению цветов») могут дать сведения не только о числе приемников. Измерения мощностей излучения, входящих во взаимозаменяемые смеси, дают возможность определить так называемые «кривые сложения спектральных цветов». Эти кривые являются линейными комбинациями кривых спектральной чувствительности отдельных приемников, входящих в систему. Кривые сложения спектральных цветов и являются обобщением понятия «спектральная чувствительность» для систем, имеющих цветное зрение.

Цветное зрение человека

Для исследования зрения человека нам понадобится некоторое усложнение прибора, изображенного на рисунке 1. Нужно иметь возможность освещать каждый из экранов \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 смесью нескольких излучений (для этого придется увеличить число осветителей) и измерять мощности этих излучений.

Опыты по «сложению цветов» обнаруживают для большинства людей следующие свойства цветного зрения:

а) существуют тройки линейно независимых излучений;

в) любые четыре излучения линейно зависимы;

с) система цветного зрения «аддитивна».

Таким образом, опыты по «сложению цветов» приводят нас к выводу, что глаз человека содержит три «приемника» с разными кривыми спектральной чувствительности. Эти опыты ничего не говорят о том, как устроены приемники, как передаются сигналы от них в мозг, какие ощущения возникают при возбуждении каждого из них и т. д., но можно абсолютно строго утверждать, что никакая система, содержащая, например, только два приемника, не может обладать такими же свойствами, как человеческий глаз. Это и есть точный смысл утверждения, что цветное зрение человека «трехкомпонентно».

По поводу трехкомпонентности нужно сделать несколько оговорок.

Во-первых, встречаются люди, глаз которых содержит меньше приемников, чем обычно. Около 4% мужчин обладают только двумя приемниками (так называемые дихроматы или «дальтоники»). У женщин эта особенность цветного зрения встречается заметно реже. Бывают и полностью цветнослепые люди.

Во-вторых, три приемника содержится только в центральной части сетчатки, состоящей из одних колбочек и не имеющей палочек. В периферических частях сетчатки, содержащих также и палочки, имеется четыре приемника.

И, наконец, следует сказать, что линейная зависимость для глаза человека любых четырех излучений соблюдается лишь приблизительно. Правда, приближение это очень хорошее, но все-таки не абсолютно точное. Причины этой неточности мы еще не знаем. Ею может быть, в частности, некоторый разброс окраски разных мест сетчатки.

В настоящее время изучено цветное зрение не только человека, но и некоторых животных⁶.

Цветовой контраст, поправки на освещение

Видимый цвет какого-либо предмета зависит не только от спектрального состава излучения, отражаемого этим предметом. В самом деле, все знают про явление так называемого цветового контраста. Серая бумажка, лежащая на красном фоне, кажется нам голубоватой, а та же бумажка на зеленом фоне кажется красноватой. Значит, видимый цвет предмета зависит не только от спектрального состава отражаемого им излучения, но и от излучений, отражаемых окружающими предметами.

Наш мозг выносит решение о цвете на основании обработки сигналов, приходящих со всей сетчатки. Целесообразность такого механизма указывал еще Гельмгольц, назвавший это явление «поправками на освещение».

Допустим, мы хотим сконструировать прибор, «узнающий» предметы по их цвету. На первый взгляд кажется, что для этого достаточно, например, измерить спектральный состав света, отраженного от каждого предмета, и запомнить полученные кривые. После этого, когда прибору «покажут» неизвестный предмет, снова промеряется спектральный состав отраженного света и сравнивается с кривыми, хранящимися в памяти прибора.

Такая система будет работать лишь в том случае, если для освещения предметов будет применяться некоторый стандартный источник света с неизменным спектральным составом излучения. Если же в разных случаях предметы могут освещаться разными источниками света (с разными спектральными составами излучений), то предложенная система работать не сможет. В самом деле, спектральный состав отраженного света будет зависеть не только

⁶ М. М. Бонгард и М. С. Смирнов, Цветное зрение человека и животных, журн. «Природа», 1959, № 5.

от свойств поверхности предмета, но и от свойств источника света.

В ходе эволюции зрительная система животных и человека приспособлялась к решению именно этой более сложной задачи. Спектральный состав дневного света очень сильно меняется в зависимости от погоды, времени суток и т. п. Если бы мы могли одновременно увидеть три белые бумажки, одна из которых освещена прямым солнечным светом, вторая — светом пасмурного дня, а третья — рассеянным светом голубого неба, то они показались бы нам разноцветными (желтой, белой и синей). И несмотря на такую большую разницу отражаемых излучений, мы всегда называем бумажку белой. Происходит это благодаря «поправке на освещение» — механизму, выработавшемуся у животных для узнавания предметов по цвету. Целый ряд признаков⁷ дает возможность мозгу определить цвет источника света. Затем мозг автоматически делает поправку в цвете всех предметов.

Задачу, с которой сталкивается мозг, можно пояснить (рис. 8).

Приблизительно известно распределение мощности в спектре источника света (рис. 8, а).

Приблизительно известен спектральный состав света, отраженного бумажкой (рис. 8, в).

Требуется определить зависимость коэффициента отражения бумажки от длины волны.

Решение этой задачи приводит к ответу, изображенному на рисунке 9. Бумажки с такой кривой отражения мы называем голубыми.

Теперь понятно, почему серая бумажка на красном фоне кажется слегка голубоватой. Большой красный фон является для мозга сигналом (в данном случае ложным) красного освещения. Далее мозг решает задачу о том, какой предмет отражал бы при красном освещении такой свет, какой приходит в глаз от серой бумажки.

В результате всей этой скрытой аналитической работы мозга мы

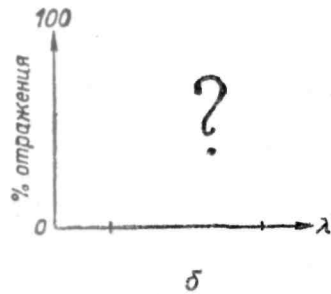


Рис. 8.

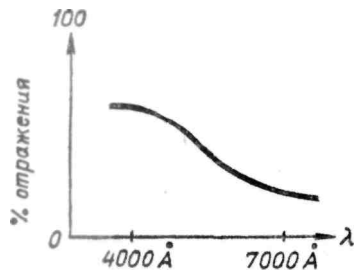


Рис. 9.

«непосредственно видим» бумажку голубоватой.

Однако в такой постановке опыт дает очень слабый эффект. Множество признаков указывает нашему «счетно-решающему устройству», что на самом деле красного освещения нет, что свет вокруг белый, а красной является только бумага фона. В результате возникает очень

⁷ См. Н. Д. Ньюберг, Парадоксы цветного зрения, журн. «Природа», 1960, № 8.

малое «изменение цвета» серой бумаги.

Гораздо более сильный эффект можно наблюдать с помощью установки, изображенной на рисунке 10.

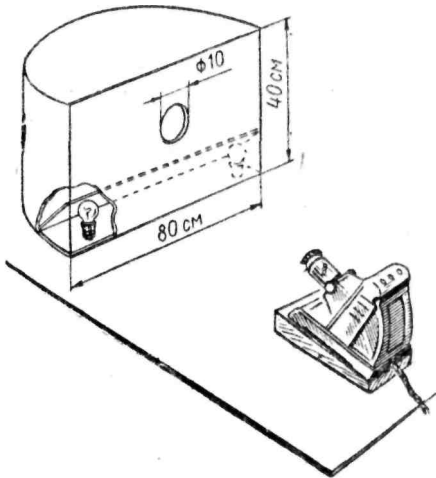


Рис. 10.

Полукруглая коробочка имеет в передней плоской стенке отверстие. Потолок коробочки оклеен изнутри какой-нибудь черной материей (лучше бархатом). Все остальные стенки белые. В нижних передних углах помещаются лампы, прикрытые молочными (хуже — матовыми) стеклами. Яркость внутреннего освещения должна регулироваться. Лучше всего сделать непрозрачные заслонки, которые могут постепенно закрывать лампы, но можно обойтись и автотрансформатором (это несколько хуже, так как при уменьшении накала ламп их свет становится более красным). Передняя белая стенка коробочки ярко освещается любым проекционным фонарем через светло-красный или оранжевый светофильтр. Фонарь располагается несколько ниже коробочки так, чтобы красный свет, проходящий через дырку в передней стенке, попадал бы только на черный потолок.

Опыт проводится в темной комнате, причем наблюдать установку может сразу несколько десятков человек.

Если коробочка ярко освещена изнутри, то отверстие кажется белым (или желтым). По мере уменьшения яркости внутреннего освещения

отверстие становится желто-зеленым, зеленым, синим и, наконец, темно-фиолетовым. При этом кажущаяся насыщенность синего цвета так велика, что наблюдатели часто не верят, что их не обманывают и не изменяют относительный спектральный состав внутреннего освещения. Приходится, выключив (или прикрыв) красный проекционный фонарь, показывать истинный цвет отверстия.

Работа механизма «поправки на освещение» несколько зависит от видимого углового размера отверстия, поэтому в большой аудитории возникают разногласия: при некоторой яркости сидящие ближе к установке называют отверстие зеленым, а находящиеся дальше утверждают, что оно синее.

Можно освещать установку изнутри не белым, а желтым светом. Явление протекает совершенно так же, хотя в этом случае свет, выходящий из отверстия, может совершенно не содержать зеленых и синих лучей спектра.

Вернемся к рассмотрению сущности опытов Ленда.

Допустим, фотографировались красные, желтые и синие предметы. Красные предметы будут светлыми на диапозитиве, снятом через красный фильтр, и сравнительно темными на диапозитиве, снятом через желтый светофильтр. Желтые предметы будут светлыми на обоих диапозитивах. Синие предметы будут темными на обоих диапозитивах, причем более темными — на диапозитиве, снятом через красный светофильтр.

Изображение красного предмета будет проецироваться красным светом, желтого — смесью красного и желтого, а синего — темно-желтым. Поскольку все изображение в целом освещено смесью красного с желтым, мозг введет поправку на освещение. Предыдущий опыт показал, что темно-желтый цвет на красном фоне покажется нам синим. Это имеет место и в опыте Ленда. Зеленый предмет даст на «желтом» диапозитиве более светлое изображение и поэтому при проекции покажется нам не синим, а зеленым.

Таким образом, мы имеем здесь дело с обычными цветовыми контрастами, правда, в довольно сложной и своеобразной обстановке. Однако, по какой бы причине ни удался этот опыт, если все-таки смешением двух излучений удастся получить любой цвет, то не опровергает ли этот факт трехкомпонентной теории цветного зрения?

Дело в том, что Ленд неправ, утверждая, что смешением двух излучений можно получить любой цвет. Если, например, проекция осуществляется с помощью красного и желтого света, то невозможно получить ярко-синий или темно-желтый цвет. В самом деле, при потемнении желтый цвет будет становиться зеленым и синим и уже перестанет казаться нам желтым. Отметим, что вообще каждый оттенок можно получить только одной определенной яркости (это прямое следствие утери одной степени свободы при переходе от смесей трех излучений к смесям двух).

Кроме указанного ограничения возможных цветов, есть еще одно ограничение, связанное с зависимостью достижимых для воспроизведения цветов от цвета фона. Если проекция осуществляется с помощью красного и желтого фильтров, то можно получить впечатление желтого предмета на красном фоне, но нельзя получить впечатления желтого цветка на зеленом лугу (трава будет казаться оранжевой). При других светофильтрах будут

другие ограничения, но они будут обязательно.

В связи с этим не может быть никакой надежды на создание хорошей двуцветной системы телевидения или кино.

Итак, Ленд не открыл новых свойств цветного зрения (он, правда, обнаружил весьма любопытное проявление цветового контраста), а опыты Ленда ни в коей мере не опровергают трехкомпонентную теорию. Вообще трехкомпонентность цветного зрения человека не гипотеза, а сокращенное описание непосредственных результатов экспериментов по «сложению цветов». Поэтому любые разговоры об опровержении этой теории основаны на недоразумении.

Значит ли все сказанное в статье, что мы уже все знаем о цветном зрении человека и изучать в этой области больше нечего? Конечно, нет!

Мы очень мало знаем, например, о том, как устроены «три приемника», а также о том, почему лишь приблизительно осуществляется линейная зависимость между четверками излучений. Только начинаются исследования того, как закодированы для передачи в мозг сигналы приемников глаза и как перерабатываются эти сигналы в мозгу. И кто знает, может быть, именно изучение зрения поможет открыть завесу, скрывающую сейчас от нас законы работы мозга.