

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

ОПЫТЫ ПО ЦВЕТОВОМУ ЗРЕНИЮ

Э. Х. Лэнд *)

С детства мы испытываем очарование богатства красок в окружающем нас мире. С детства же зарождаются у нас вопросы: «Как мы видим цвет? Откуда вы знаете, что видите тот же самый цвет, что и я? Почему при смешении цветов иногда получается совершенно другой цвет?»

Исаак Ньютон еще в 1660 г. исследовал свойства видимого спектра. Но на упомянутые вопросы наука смогла дать ответы лишь много позже. Ученые установили, что красота внешнего мира целиком определяется технической «красотой» механизма видения цветов глазом.

Человеку, незнакомому с цветовым зрением, может внушить благоговение поразительная чувствительность глаза к различению огромного разнообразия воспринимаемых им раздражений. Недавно я и мои коллеги обнаружили, что механизм цветового зрения еще более удивителен, чем можно было бы думать. Глаз производит различение цветов с поразительной тонкостью. Ему, в сущности, не нужно слишком много «информации», получаемой из повседневной жизни. Глаз может строить окрашенные миры сам по себе на основе тех сигналов, которые, как до сих пор предполагали, являются одноцветными или даже вовсе бесцветными.

Наш рассказ, видимо, лучше всего начать с описания двух опытов. Первым из них является знаменитый опыт Ньютона, положивший начало огромному числу исследований цветового зрения, продолжающихся и по сей день. Второй опыт кажется тривиальным видоизменением опыта Ньютона, но он, однако, опровергает некоторые основные выводы Ньютона.

Как часто случается с действительно революционными открытиями, простота открытия, сделанного Ньютоном, настолько велика, что вызывает удивление: как это никто до Ньютона не догадался об этом! Ньютон пропустил узкий пучок солнечных лучей через призму и обнаружил, что пучок растягивается в цветную полосу, которая известна под названием видимого спектра. Этот спектр представляет собой переходящие плавно один в другой красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый цвета. Когда Ньютон «обратил» это разложение света, пропустив весь спектр через вторую призму, то цвета исчезли и снова появился белый свет. Затем Ньютон начал комбинировать друг с другом отдельные участки спектра, располагая на пути лучей света доску с прорезанными в ней щелями, закрывающую весь спектр, за исключением

*) E. H. Land, Scientific American 200, № 5, стр. 84—99 (1959). Перевод В. Н. Рыдника.

некоторых выбранных участков (рис. 1). При комбинировании двух таких участков, сводя лучи света так, что они совмещались на экране, Ньютон обнаружил появление третьего цвета, чаще всего занимавшего положение того участка спектра, который лежал между двумя выбранными спектральными участками.

Повторим этот последний опыт, сделав в доске отверстия, соответствующие как раз границам узкого желтого участка спектра. При сведении полученных двух желтых пучков света на экран они, комбинируясь, дадут, как и наблюдал Ньютон, желтый цвет.

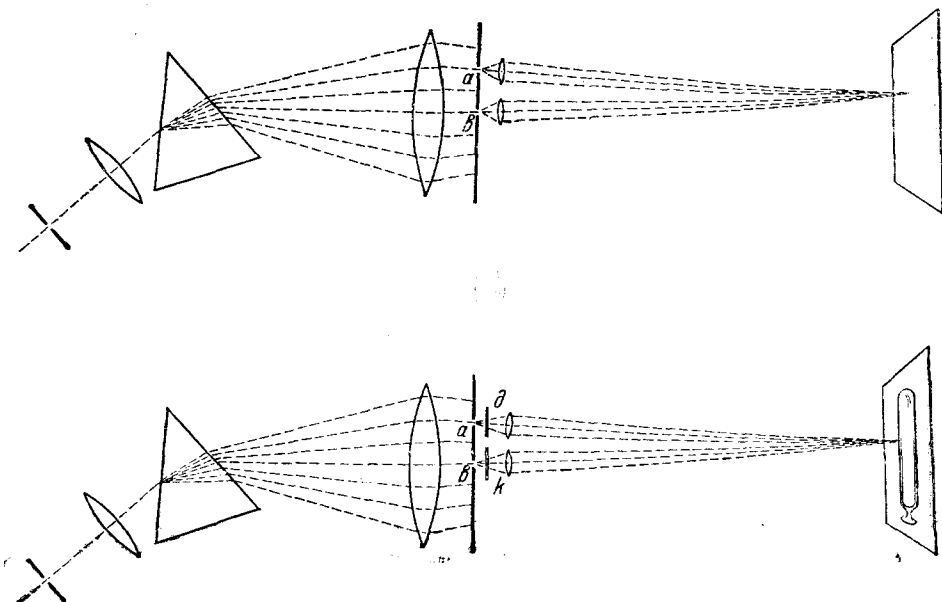


Рис. 1. Опыт Ньютона по смешению спектральных цветов (наверху); видоизменение опыта Ньютона: на пути пучков света устанавливаются два черно-белых диапозитива (внизу). Когда щели a и b приходятся на желтый участок спектра, в опыте Ньютона получается желтое пятно на экране, в опыте автора изображение на экране содержит полную гамму цветов. Символами δ и κ на этой и последующих схемах соответственно обозначены диапозитивы, снятые в более длинноволновом и более коротковолновом свете.

А теперь несколько видоизменим опыт. Перед щелями поставим пару обычных черно-белых диапозитивов. На каждом из них изображена одна и та же картинка: собрание различно окрашенных предметов. Разумеется, никакого цвета на диапозитивах нет. На них видны просто более светлые и более темные участки, образованные непрозрачными зернами серебра на прозрачной целлулоидной подложке. Если присмотреться к диапозитивам, то можно заметить, что изображения на них не абсолютно одинаковы. Некоторые детали изображения на первом диапозитиве выглядят более светлыми, чем на втором. Другие детали, наоборот, на первом диапозитиве более темные. В целом диапозитив пропускает большую или меньшую долю падающего на него света.

Желтые пучки проходят через эти диапозитивы и падают на экран. Но теперь они уже не желтые! Каким-то образом, когда они соединились в изображение, они уже освободились от ограничения создавать только «свой» спектральный цвет. На экране мы видим группу предметов, цвета которых, хотя и бледные и ненасыщенные, все же можно четко различить:

это—красный, серый, желтый, оранжевый, зеленый, голубой, черный, коричневый и белый (рис. 2, вклейка, стр. 182).

Описанный опыт приводит к поразительному выводу, что сами лучи света не обладают способностью «создавать цвет». Они скорее являются лишь «носителями информации», сигналами, которые уже в самом глазу подвергаются обработке, в результате которой различным деталям изображения приписываются соответствующие цвета.

СТАРАЯ ТЕОРИЯ

Этот вывод находится в резком противоречии с современной теорией цветового зрения, возникшей на основе опытов Ньютона. Ньютон и его последователи, в первую очередь Юнг, Максвелл и Гельмгольц, много занимались проблемой простых цветов и тех ощущений, которые вызываются комбинациями этих цветов. Сам Ньютон разработал довольно хорошие правила для предсказания цветов, которые можно было бы наблюдать на экранах при сведении различных спектральных лучей в одно световое пятно. Эти правила можно изобразить в виде диаграмм, старейшей из которых является так называемый цветовой треугольник (рис. 3). На современных цветовых диаграммах можно сразу прочесть результат смешения двух любых цветов в любых пропорциях.

Когда было установлено, что свет есть волновое явление, классические исследования цвета обрели глубокий и прочный фундамент. Порядок цветов в спектре, как оказалось, определяется порядком их длин волн: наибольшая видимая длина волны приходится на красный конец спектра, а наименьшая—на фиолетовый. Чистый цвет должен соответствовать одной длине волны, сложные цвета должны быть смесями чистых цветов.

Пытаясь получить различные цвета путем смешения узких спектральных полос, Максвелл и Гельмгольц установили, что для получения всех возможных цветов достаточно световых волн трех различных длин, выбранных из красного, зеленого и голубого участков спектра. В соответствии с этим красный, зеленый и голубой цвета были названы основными. На базе своих опытов Максвелл и Гельмгольц предложили «трехцветную» теорию цветного зрения. Мы здесь не будем вдаваться в ее подробности. Основная идея этой теории состоит в том, что глаз способен воспринимать три разных рода колебаний и что все ощущения цвета есть результат возбуждения упомянутых «способностей» с различной силой. Таким образом, «символом веры» этой господствующей теории является утверждение, что цвет любой точки поля зрения определяется теми длинами волн света, которые испускаются этой точкой, и относительной силой, или интенсивностью, света.

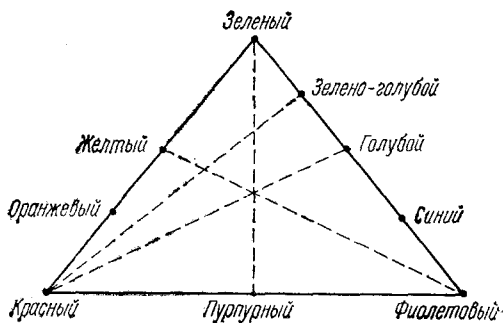


Рис. 3. Цветовой треугольник классической теории. Точки пересечения линий представляют цвета, полученные смешением основных цветов в количествах, пропорциональных расстояниям этих точек от соответствующих сторон треугольника. Центральная точка соответствует равным пропорциям основных цветов и поэтому представляет белый цвет.

Однако, как мы убедились в нашем видоизмененном опыте Ньютона, свет в любой точке экрана складывается только из двух желтых цветов, и тем не менее, изображение оказывается окрашенным во все цвета. Кроме того, как мы узнаем далее, эти цвета в изображениях являются замечательно постоянными даже при варьировании в широких пределах как длин волн, так и относительных интенсивностей обоих лучей света.

ЕСТЕСТВЕННЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

В чем же состоит «ошибка» классической теории? Тот факт, что проблемой цветового зрения занималось столь большое число исследователей, исключает возможность ошибки. Ответ заключается в том, что почти все работы по цветовому зрению имели очень малое отношение к ...цвету

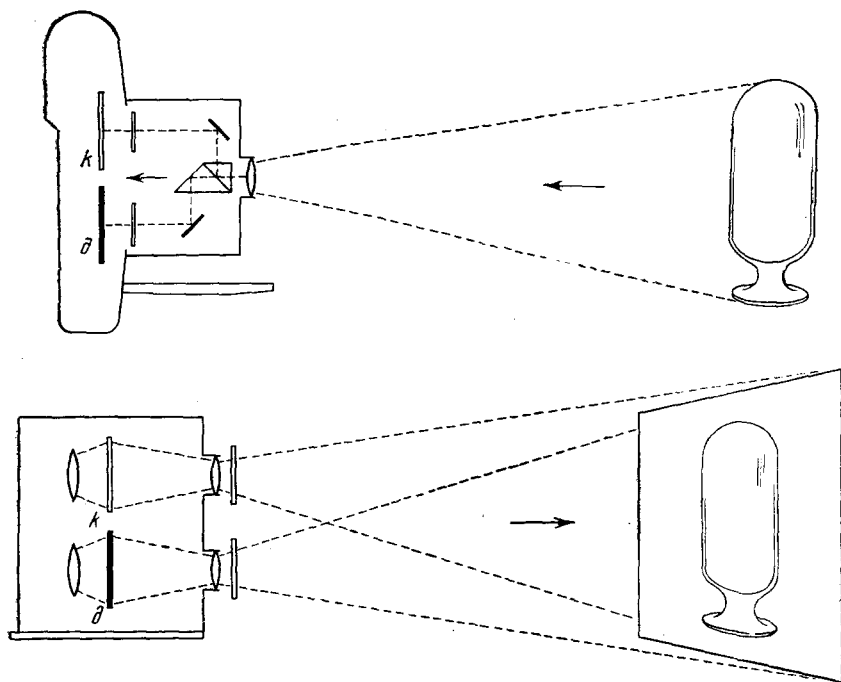


Рис. 4. Длинноволновые и коротковолновые диапозитивы изготавливаются фотографированием с помощью двойной камеры (наверху). Маленькие светлые прямоугольники—светофильтры; фильтр перед длинноволновым снимком—красный, перед коротковолновым снимком—зеленый. Совмещенное изображение создается наложением длинноволнового и коротковолнового изображений (д и к) на экране с помощью двух проекторов (внизу).

в том виде, в каком мы воспринимаем его. В этих работах, по сути дела, изучались цветовые пятна, в частности пары таких пятен, подбиравшиеся до их совпадения по цвету. Заключение, к которым приходили ученые, молчаливо принимались законными для любых цветовых ощущений. Это утверждение, казавшееся весьма убедительным, прочно вошло во все учебники физики. Лишь немногие ученые позволили себе усомниться в нем: среди них можно назвать немецких ученых Геринга и Гесса, а также современных исследователей Доротею Джеймсон и Л. Гурвича (которые изучали эффект, вызываемый внесением окрашенного цветного пятна в цветное же окружение).

Таким образом, цветовое зрение в естественных условиях при наблюдении полных изображений (а не цветовых пятен в окружении фона) оказалось совершенно неисследованной областью. Мы начали работу в этой области—области видения естественных изображений, как мы ее назвали,—пять лет назад. В настоящей статье описываются некоторые сюрпризы, которые нас здесь встретили.

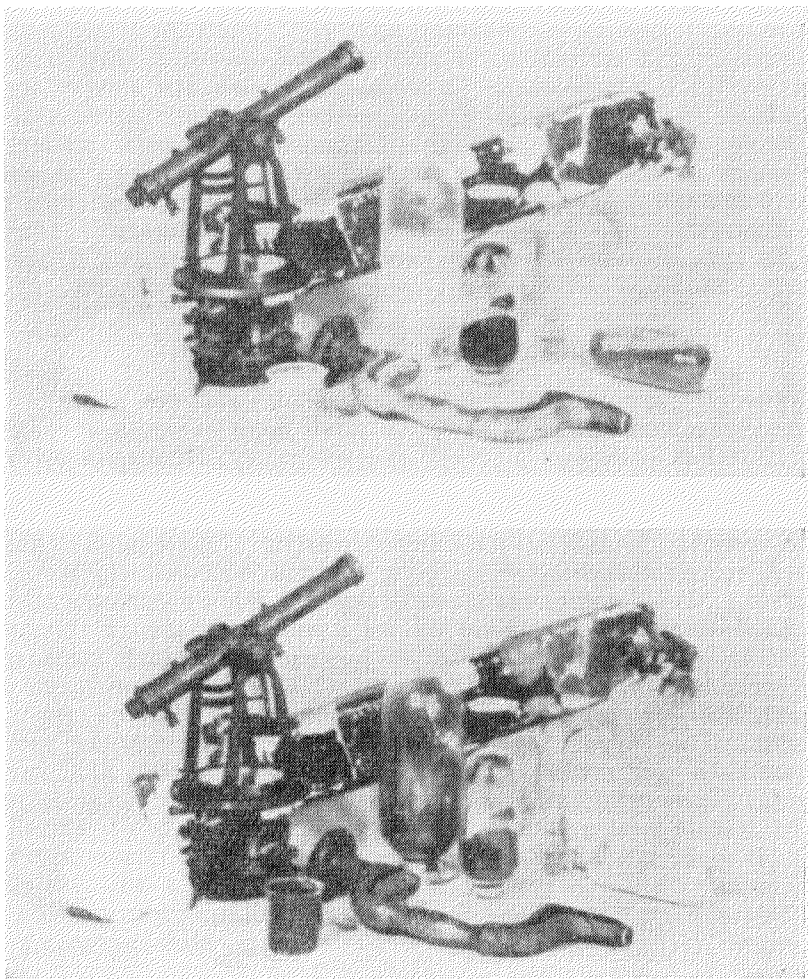


Рис. 6. Длинноволновые и коротковолновые снимки являются диапозитивами с этих черно-белых фотографий, снятых через красный фильтр (наверху) и через зеленый фильтр (внизу). При просектировании верхнего диапозитива он освещается большей длиной волны света или более длинноволновой спектральной полосой, чем нижний диапозитив.

Для получения изображения в нашем видоизмененном опыте Ньютона были нужны две совокупности элементов: пара разных диапозитивов, полученных от одного и того же объекта, и свет двух различных длин волн для освещения этих диапозитивов. Различие в диапозитивы можно внести осветлением снимков лабораторным путем, произвольно меняя оптические плотности различных их участков. Однако, как известно любому фотографу, существует простой способ получения двух

различных изображений с одного объекта, называемый цветоделительным; фотографирование в этом способе ведется через два светофильтра, пропускающие свет двух различных длин волн (или спектральных полос). Пленка одновременно экспонируется в одном случае на более длинноволновом, а в другом случае—на более коротковолновом свете. В наших исследованиях мы обычно использовали красный светофильтр для получения более длинных и зеленый фильтр для получения более коротких длин волн (рис. 4, 5, вклейка, 6).

Теперь, когда мы освещаем диапозитивы светом практически любой пары длин волн и совмещаем изображения на экране, мы получаем цветное изображение (рис. 7, вклейка). Если пропустить свет с большей длиной волны через диапозитив, снятый в более длинноволновом свете, а свет с меньшей длиной волны—через «коротковолновый» диапозитив, то мы получим большинство цветов оригинала-объекта в их действительных местах. Если обратить процесс, т. е. осветить «коротковолновый» диапозитив более длинноволновым светом и наоборот, то «обратятся» и цвета изображения: красный перейдет в зелено-голубой и т. п.

ДЛИННЫЕ ВОЛНЫ ПРОТИВ КОРОТКИХ

Таким образом, можно прийти к заключению, что цвета в изображениях обуславливаются не выбором длин волн света, а «игрой» длинных и коротких световых волн по всему объекту. Проверим это предположение в некоторых дальнейших опытах.

Существует ряд более удобных способов совмещения изображений, нежели способ, используемый в опыте Ньютона. Простейший из них состоит в том, что диапозитивы помещаются в два обычных проектора, причем выбор нужных длин волн света осуществляется введением светофильтров. Изображение, получаемое таким путем, показано на рис. 7.

При работе со светофильтрами нет необходимости использовать монохроматический свет; полосы спектра имеют большую или меньшую ширину в зависимости от характеристик светофильтров. Ширина этих полос, по-видимому, не играет существенной роли. Единственное требование заключается в том, чтобы «длинноволновая» фотография, или, как мы ее называли, «красный снимок», освещалась при проектировании на экран светом большей длины волны, а «синий снимок»—светом меньшей длины волны. В действительности одна из спектральных полос могла иметь такую ширину, что охватывала собой весь видимый спектр. Иными словами, в одном из проекторов вообще можно было обойтись без светофильтра, он давал белое освещение. Фотографии, приводимые на рис. 7, получены при помощи красного светофильтра для освещения «красного снимка» и без фильтра (т. е. в белом освещении) для «синего снимка».

Одно из преимуществ такой постановки опыта состоит в том, что наблюдатель может очень легко проверить правильность нашего основного предположения. Согласно классической теории цветового зрения комбинация красного и белого цветов не должна давать никаких цветов, кроме розового. Если перед проекторами нет диапозитивов и в один из проекторов вставлен красный светофильтр, то экран, действительно, окрасится в розовый цвет. Стоит, однако, вставить диапозитивы, и мгновенно на экране появится полная гамма ярких цветов. Если теперь убрать красный фильтр, цвет снова исчезнет и изображение будет выглядеть как обычное черно-белое. Если фильтр поставить обратно, то сразу же появятся и цвета.

Случайное преимущество использования красного освещения «красного снимка» и белого освещения «синего снимка» объясняется тем, что

получающиеся цвета выглядят почти одинаковыми как на цветной пленке, так и непосредственно в глазу. Таким образом, изображение на экране не можно сфотографировать. Поскольку, однако, пленка чувствительна к более узкой области длин световых волн, нежели глаз, то она воспринимает изображение несколько иначе, и репродукции приходится изготовлять искусственно (см. рис. 2).

С помощью проекторов легко исследовать и другую характеристику изображения—яркость. Помещая перед линзами проекторов поляри-

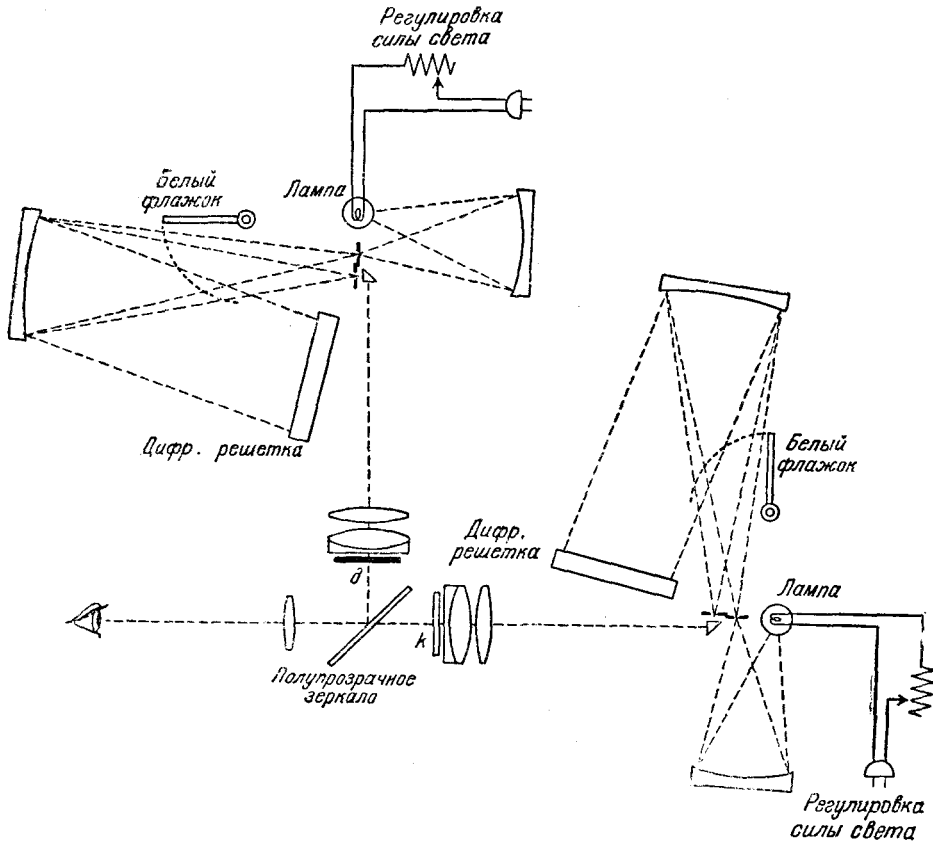


Рис. 8. Схема двойного монохроматора, использовавшегося в описываемых опытах. Две дифракционные решетки вырезают из любой части видимого спектра очень узкие полосы длин волн. Назначение белых флажков—давать белый свет. Узкие прямоугольники d и k —черно-белые диапозитивы, которые служат соответственно длинноволновым и коротковолновым снимками.

зующие светофильтры, можно варьировать количество света, приходящего на экран от каждого из источников света. Если удалить диапозитивы и оставить лишь красный фильтр в одном из проекторов, то экран окрасится в гамму розовых цветов, от красного до белого, по мере изменения относительной интенсивности обоих пучков света. Если теперь вставить диапозитивы, то цвета изображения на экране останутся строго постоянными в широкой области изменения относительных интенсивностей обоих пучков.

Прервем на минуту наш рассказ и задумаемся в результате последнего опыта. Вспомним, что диапозитив есть не что иное, как кусочек целлюлоида, обработанный так, что в одних участках он пропускает больше

света, чем в других. Все его действие на красный и белый пучки света сводится к тому, что он меняет интенсивность этих пучков от точки к точке. Но этим диапозитив вызывает появление на экране целой гаммы цветов, причем эти цвета остаются неизменными, даже если менять относительные интенсивности пучков, освещающих поле зрения в целом. Очевидно, хотя глазу и нужны различные соотношения яркостей, чтобы возникли ощущения цвета, эти соотношения не сводятся к простому «суммированию» интенсивностей глазом. Каким-то образом они охватывают все поле зрения. Как это происходит, мы узнаем несколько позже.

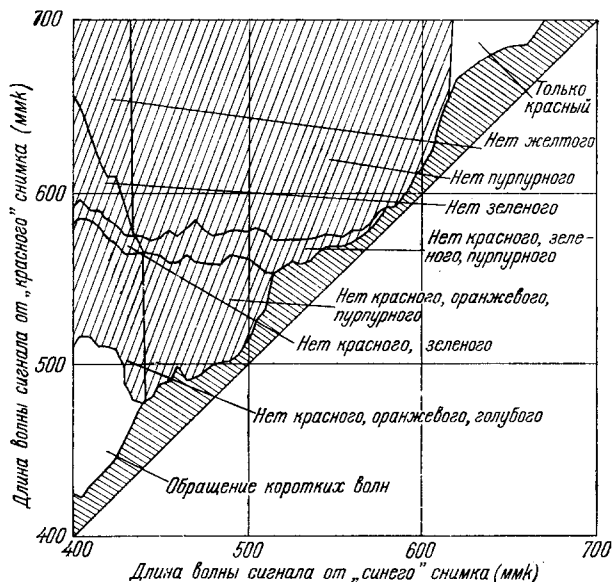


Рис. 9. Цветовая карта, показывающая пределы ощущения цветов, которые можно получить с различными парами длин волн света. Серый участок карты соответствует бесцветной области, в которой длины волн света слишком близки друг к другу, чтобы вообще создать ощущения цвета. В области «обращение коротких волн» цвета нормальны, но коротковолновый свет проходит через длинноволновый диапозитив и наоборот. Незакрашенный участок под диагональю соответствует области обращенных цветов, получаемых при освещении коротковолнового снимка длинноволновым светом и наоборот.

Описанная двухпроекторная система является удобной, но неточной. Длины волн даваемого ею света ограничиваются характеристиками применяемых светофильтров. Можно, конечно, использовать светофильтры с узкими полосами пропускания, но они сильно ослабляют проходящий через них свет. Мой коллега Грей поэтому сконструировал для наших целей двойной монохроматор для освещения диапозитивов (рис. 8). Этот прибор состоит из пары спектро스코пов, которые позволяют освещать диапозитивы столь узкими спектральными полосами, какие мы пожелаем выбрать, и притом с известной длиной волны света. Удаляя спектроскопы и используя светофильтры, мы можем также получить белый свет или широкие спектральные полосы. Два изображения совмещаются посредством маленького полупрозрачного зеркала; свет от одного из диапозитивов проходит через зеркало, а свет от другого отра-

жается передней поверхностью зеркала. Интенсивности каждого из источников света можно точно регулировать.

С помощью двойного монохроматора нам удалось подтвердить основное предположение, что цвет в естественных изображениях зависит от переменного соотношения между более длинными и более короткими световыми волнами по всему полю зрения. Мы смогли также установить пределы, в которых возможно восприятие цветов. Оказалось, что существует некоторая минимальная спектральная разность между длинами волн света, применяемого при съемках «красного» и «синего» диапозитивов. Эта минимальная разность различна для разных участков спектра. Любая пара длин волн, достаточно разнесенных друг от друга (а минимальная разность их удивительно мала), будет создавать не только серый и белый цвета, но также и гамму цветов, выходящих далеко за пределы той области, которая устанавливается для этой пары классической теорией. Ряд комбинаций таких пар длин волн охватывает всю гамму спектральных цветов, а также цвета, отсутствующие в спектре,—такие, как коричневый или пурпурный. Все эти результаты мы суммировали на цветовой карте, показывающей пределы ощущений цвета, создаваемых различными парами длин волн (рис. 9). Мы также исследовали пределы относительной интенсивности обоих пучков света. Для некоторых пар длин волн, используемых для освещения диапозитивов, цвета сохраняются в исключительно широкой области изменения относительных интенсивностей; для других пар цвет начинает исчезать при меньших изменениях интенсивностей. Снова, как мы убеждаемся, результат зависит от используемых длин волн света. Выше приведена таблица, показывающая устойчивость цветов для выбранных пар длин волн.

Видимый цвет	Область видимости цвета	Изменения в цвете в пределах области его видимости
Серый . . .	200 : 1	Малые изменения
Коричневый	100 : 1	От желто-коричневого до темно-коричневого
Белый . . .	100 : 1	От желто-белого до голубовато-белого
Желтый . . .	30 : 1	От желтого до чисто-белого
Желто-зеленый . . .	30 : 1	От желто-зеленого до желто-оранжевого
Голубой . . .	10 : 1	От фиолетово-голубого до зелено-голубого
Зеленый . .	6 : 1	От зелено-голубого до зелено-серого
Красный . .	5 : 1	От темно-красного до красно-темно-оранжевого
Оранжевый	5 : 1	От желтого до оранжево-красного

НОВАЯ КООРДИНАТНАЯ СИСТЕМА

Цветовая карта отвечает на вопрос, чего мы не увидим, комбинируя пары изображений, снятых в свете различных длин волн. Можно ли с ее помощью делать положительные предсказания? Нам даны: пара снимков одного и того же объекта и пара спектральных участков, которыми освещаются снимки; какой цвет возникнет в каждой отдельной точке совмещенного изображения? Иными словами, мы хотим установить правила, которые были бы применимы к нашим изображениям в той же мере, в какой цветовой треугольник применим к опытам по подбору совпадающих цветов (большинство этих опытов базируется на ошибочном предположении о тождестве этих цветов и цветов естественных изображений).

Мы построили новую координатную систему, которую можно, на первое время, использовать для предсказания цветов, появляющихся в естественных изображениях. По-видимому, наилучшим способом получения этой системы являются реальные эксперименты. Установим двойной проектор (или монохроматор) на любую пару «длинноволновых» и «коротковолновых» полос спектра, скажем на красную и белую; тогда мы можем получить полноцветное изображение. Мы знаем, что местные вариации светопропускания обоих снимков должны каким-то образом

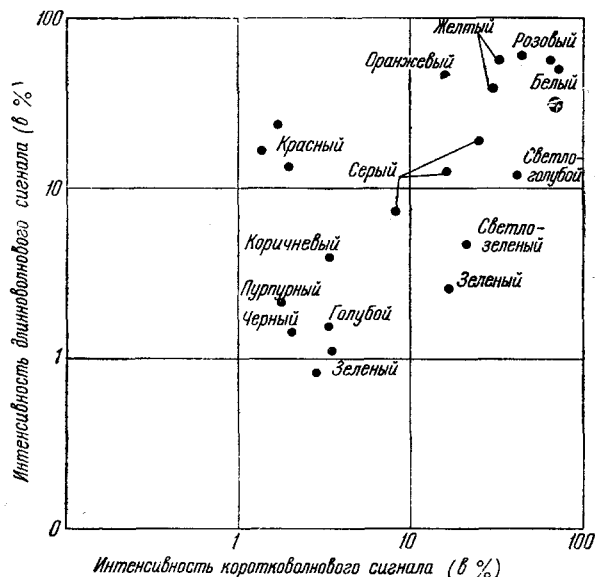


Рис. 10. Координатная система для предсказания цветов в естественных изображениях. По осям отложены безразмерные величины отношений количеств света, падающих на диапозитивы (максимальных интенсивностей) и прошедших через диапозитивы в каждой их точке.

вызывать ощущение цвета. Но мы также установили, что регулярное изменение освещенности всего поля зрения в целом, например ослабление света, идущего от «красного» проектора, не дает никакого эффекта. Так мы приходим к описанию наблюдаемых результатов посредством величин, не зависящих от полного светового потока, падающего на каждый из диапозитивов.

Это описание можно осуществить следующим образом. Включим один лишь «длинноволновый» проектор, установив яркость его на любом уровне. Мы увидим, что светлые пятна на красном изображении будут соответствовать точкам, в которых «длинноволновый» черно-белый снимок пропускает максимальное количество света. Мы измеряем интенсивность света, прошедшего через эти точки, и приравниваем ее 100%. Эта интенсивность определяет наибольшую энергию, переносимую длинными световыми волнами в нашем опыте. Измеряем затем интенсивность света, прошедшего через остальную часть диапозитивного изображения, выражая ее в каждой точке в процентах от максимальной интенсивности. Затем мы выключаем «длинноволновый» проектор, включаем «коротковолновый» и повторяем описанные измерения на более коротких световых волнах (в нашем случае—на всей спектральной полосе). После этого мы строим двумерный график (рис. 10), откладывая по одной из осей

относительную интенсивность более длинных волн в процентах, а по другой оси—интенсивность более коротких волн. На этот график можно нанести любую точку изображения. Каждый раз при построении точек графика мы указываем возле них, какому цвету изображения на экране они соответствуют.

В результате мы получаем ряд точек, каждая из которых соответствует определенному цвету. Проводя на готовой карте под углом 45° к ее осям линию из левого нижнего в правый верхний угол карты, мы делим карту на две части. На самую линию ложатся, как видно, «серые» точки. Если перед каждым из проекторов установить совершенно одинаковые диапозитивы, то все точки совмещенного изображения должны будут попасть на «серую» линию, так как во всех точках этого изображения, созданного обоими проекторами, относительные интенсивности света будут попарно одинаковыми. Другие цвета, как видно из рассмо-

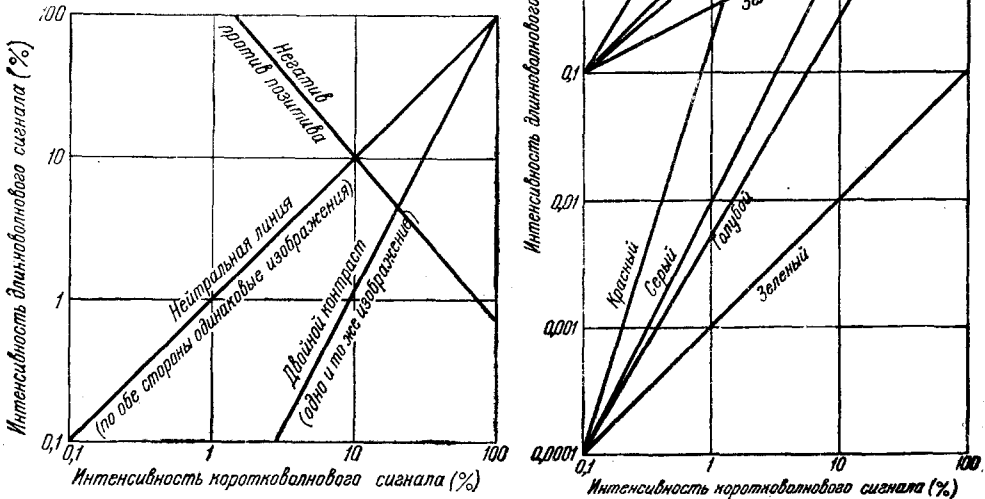


Рис. 11. Диаграммы, иллюстрирующие свойства координатной системы. Слева—графики экспериментальных ситуаций, в которых изображение остается бесцветным. Эти графики всегда прямолинейны. Справа—оси растянуты. При смещении серой линии, разделяющей области «теплых» и «холодных» цветов, цвета также смещаются, но сохраняют неизменным взаимное расположение.

трения графика, систематически располагаются по обе стороны от «серой» линии. «Теплые» цвета лежат выше нее, «холодные» цвета располагаются под ней. Таким образом, мы приходим к заключению, что реальная шкала цветного зрения не является ньютоновым спектром. Богатство спектра оказывается всего лишь случайной последовательностью сигналов, упорядоченных по их длинам волн. Реальная шкала цветов изображений простирается от «теплых» цветов через «нейтральные» к «холодным» цветам.

Повторяя наш опыт с различными длинами волн или спектральными полосами для освещения диапозитивов, можно установить, что для любой пары длин волн, дающих полную цветовую гамму изображения,

положения цветов в нашей координатной системе остаются неизменными. Таким образом, мы приходим к упоминавшемуся выше правилу, которое позволяет предсказывать цвет в любой точке изображения. Мы можем взять любую пару диапозитивов и измерить их относительное светопропускание в различных участках изображения. Затем, перед проектированием их на экран, мы предсказываем цвета, которые будут иметь эти участки. Мы не ошибемся при том условии, что длины волн освещающего света вообще смогут возбудить ощущение цвета. В тех случаях, когда цвета не появляются, мы должны соответственно изменить координатную карту цветов. Таким образом, полная совокупность «правил» представляет собой набор координатных цветовых графиков, по одному для каждого из участков цветовой карты, показанной на рис. 9.

Отметим, что каждая из координатных систем сама по себе безразмерна. По ее осям откладываются не длины волн, не яркости и вообще не физические величины. Цифры на осях координат обозначают отношения интенсивностей при одной длине волны или для широкого спектрального интервала. Эти оси обладают и другим интересным свойством: их можно «растягивать». Предположим, что мы вставили в держатель «длинноволнового» проектора два одинаковых «длинноволновых» диапозитива, а в держатель «коротковолнового» проектора — один соответствующий снимок. Мы найдем, что эта комбинация несколько не меняет цветов изображения на экране. Что вообще при этом изменилось? Точки «красного» диапозитива, прежде пропускавшие $\frac{1}{2}$ падающего на них света, теперь пропускают $\frac{1}{4}$, точки, пропускавшие $\frac{1}{5}$ света, теперь пропускают лишь $\frac{1}{25}$ его, и т. д. На логарифмической шкале нашего графика это соответствует растяжению оси «красного» снимка вдвое по сравнению с ее прежней длиной. «Серая» линия теперь примет новое положение, но все цветные точки также сместятся вместе с ней, сохраняя неизменными свои относительные положения (рис. 11).

НЕРЕГУЛЯРНОСТЬ РАСПОЛОЖЕНИЯ ТОЧЕК

Изучая цветовые графики, нам удалось открыть еще одно интересное и тонкое соотношение. Строя графики для разных опытов, мы все более приходили к мысли, что любой диапозитивный снимок, обладающий тем свойством, что соответствующие ему точки на графике попадают на прямую линию или даже на простую плавную кривую, должен давать на экране бесцветное изображение. Для проверки этого предположения мы вставили негатив в один проектор и позитив с этого негатива — в другой проектор. Такая пара диапозитивов должна дать график в виде прямой, проходящей под прямым углом к «серой» линии. Изображение на экране действительно оказалось бесцветным, обнаруживая только два «цвета» от лучей каждого из проекторов и следы их ньютонова смешанного цвета.

Чтобы изображение было полноцветным, его координатный график должен содержать точки, распределенные в двух измерениях. Но даже этого недостаточно. Точки должны располагаться на координатной сетке совершенно случайно, так, как цвета «располагаются» на любом естественном объекте. Необходимость этого требования можно продемонстрировать в одном поразительно эффектным опыте. Допустим, что в держатель «красного» проектора мы вставили клиновый светофильтр. Этот фильтр будет плавно менять интенсивность проходящего через него света, скажем, слева направо. Тогда, если включен «красный» проектор и выключен «белый», то левая сторона экрана будет красной, а правая — темной, с постепенными градиентами освещенности между ними. Теперь

введем такой же клин, но вертикально, в «белый» проектор, так что верх экрана будет белым, а низ—темным. Включив оба проектора, мы получим бесконечное разнообразие отношений красного и белого цветов, воспроизводящие, в частности, все цвета, которые могут встретиться в цветном изображении. Однако здесь эти цвета находятся в строго упорядоченных соотношениях. В них нет случайности. Поэтому нет цветов и на экране: на нем видны лишь «переливы» розового цвета.

Повторяем еще раз, что цвета в естественном изображении определяются соотношениями длинных и коротких световых волн по всему объекту, причем эти соотношения меняются совершенно случайно от точки к точке. Действительные значения длин волн освещающего света или общая освещенность каждого из диапозитивных изображений, проектируемых на экран, не оказывает никакого влияния при их изменениях в широких пределах.

Независимость цвета от длины волны заставляет предположить, что глаз—поразительно гибкий инструмент. Глаз не только адаптируется к разным цветам в окружающем нас мире, которые он реально воспринимает. Глаз также способен возбуждаться на всю область цветов даже в более бедном по цвету «мире». Убедительное доказательство этого было получено нами в описываемых ниже опытах.

ЦВЕТОВЫЕ «МИРЫ»

В этих опытах мы работали с парой смотровых камер, совмещавших на экране прекрасные большие изображения с помощью полупрозрачных зеркал (рис. 12). В каждой камере помещались вольфрамовая лампа,

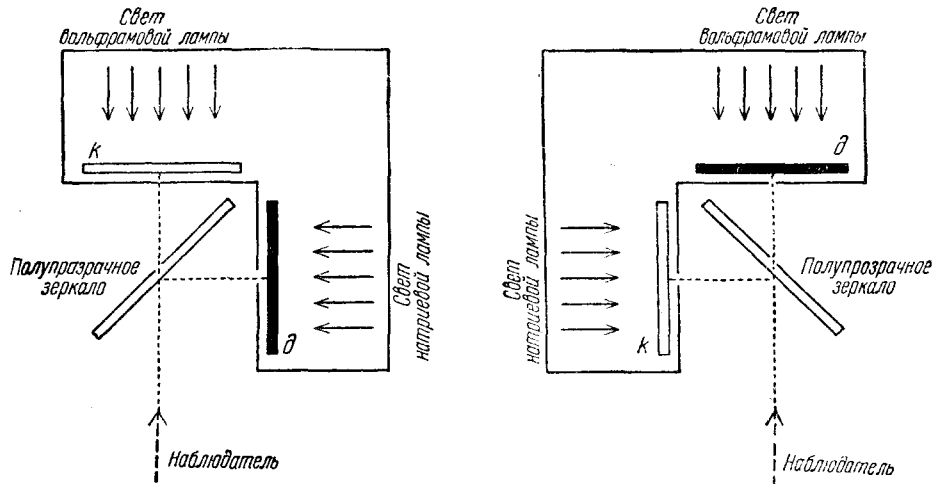


Рис. 12. Схема смотровых камер с натриевой лампой. Каждая из камер создает большое совмещенное изображение посредством полупрозрачного зеркала. Свет вольфрамовых ламп белый; выделение из него узких спектральных полос производится светофильтрами.

дававшая белый свет для освещения одного диапозитива, и натриевая лампа для освещения другого. Мы включали одну камеру, вставляли в нее «красный» и «синий» снимки и располагали перед вольфрамовой лампой красный светофильтр. Совмещенное изображение было полноцветным, включая зеленые и голубые цвета, хотя наименьшая длина волны, идущей от зеркала, лежала в желтой части спектра. Затем мы включали вторую камеру, помещая в ней перед источником света зеленый свето-

фильтр. Наблюдатель мог видеть изображения в обеих камерах одновременно. Каждое из изображений имело одни и те же цвета, но представляло собой разные цветовые «миры». В первом из них натриевая лампа (линия спектра с длиной волны 589 миллимикрон) служила источником

света с наименьшей длиной волны и стимулятором ощущения зеленого и голубого цветов. Во втором «мире» эта лампа давала наибольшую длину волны и стимулировала ощущение красного цвета. Если наблюдатель находился на достаточном расстоянии от камер, он мог также видеть «естественные» цвета предметов в комнате. Это был уже третий «мир», в котором желтое является «действительно» желтым.

Другой способ наблюдения заключался в том, что зеленый светофильтр располагался не в камере перед вольфрамовой лампой, а непосредственно перед глазом. Этот фильтр пропускал как линию натрия, так и зеленую полосу в спектре (рис. 13, внизу). Когда через него наблюдатель рассматривал предметы в комнате, то красные цвета представлялись ему черными, а остальные цвета — различных оттенков зеленого цвета. Но когда наблюдатель смотрел через этот фильтр на изображение во второй смотровой камере, он видел его полноцветным, различая в нем в том числе и красные цвета.

Цветовые «миры» в камерах создавались у нас «картинками». Можно ли было сделать физические модели этих «миров», наделив их реальными пред-

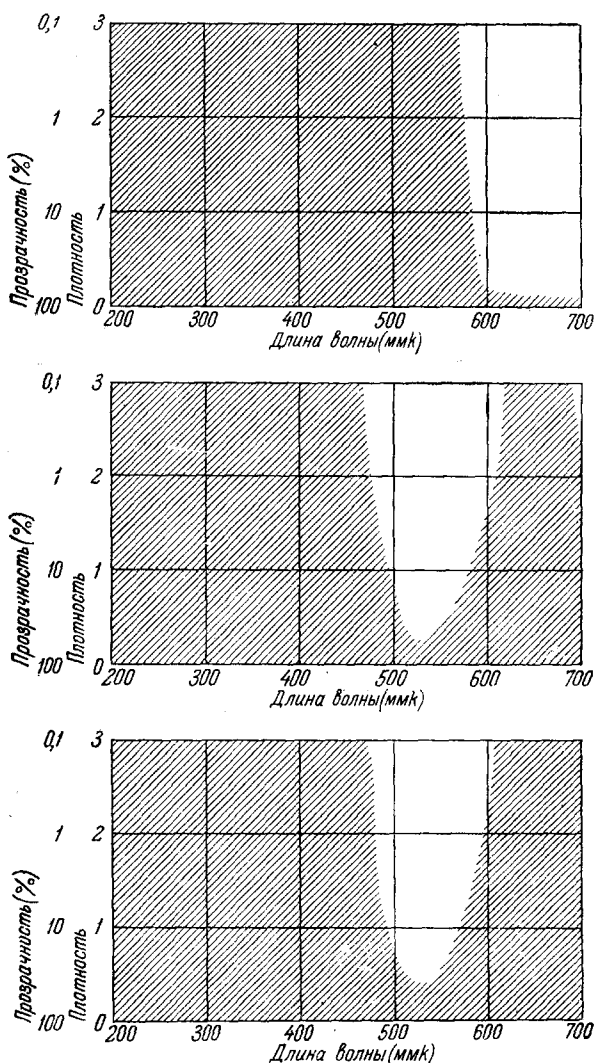


Рис. 13. Спектральные характеристики светофильтров, использовавшихся в опытах. Наверху — кривая для красного светофильтра, через который снимался длинноволновый диапозитив; в середине — кривая для зеленого светофильтра, через который снимался коротковолновый диапозитив; внизу — кривая для зеленого светофильтра, использовавшегося в опыте с натриевой лампой.

метами, которые имели бы те же цвета, что и изображения в камерах при тех же условиях освещения? Это можно было бы сделать, если бы мы располагали идеальными красками. Однако краски в окружающем нас мире таковы, что даже наилучшие из них окрашивают предметы,

в сущности, во все спектральные цвета, с длинами волн от 400 до 700 миллимикрон. Каждая из этих красок отражает широкую полосу длин волн и пик наибольшего отражения не резок (рис. 14).

Таким образом, наши красящие материалы не создают четко-го различия между цветами, соответствующими близким друг к другу длинам волн. Если удалось бы найти краски с гораздо более узкими спектральными характеристиками, то можно было бы убедиться в том, что они дали бы полноцветные изображения в более бедном по цвету «мире», например в мире, освещенном лишь теми лучами, которые прошли через зеленый светофильтр. За отсутствием этих красящих материалов тографическому «созданию» такого

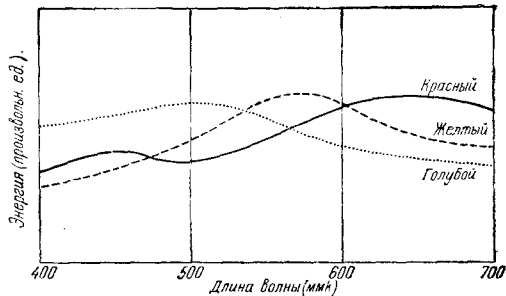


Рис. 14. Краски в нашем мире имеют широкие спектральные характеристики. Любая краска в какой-то мере отражает свет во всем видимом спектре (от 400 до 700 миллимикрон).

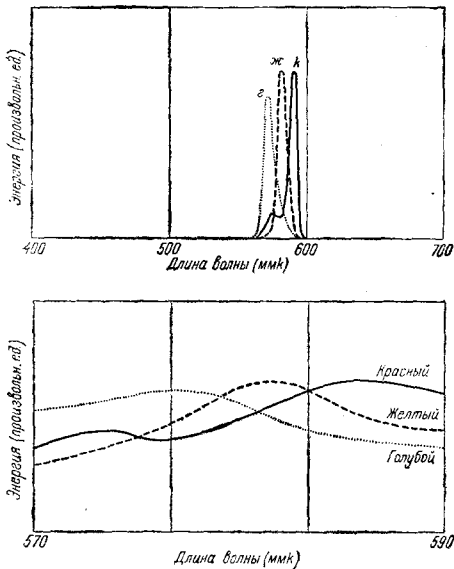


Рис. 15. Краски в «мире» изображений, отражающие свет только в области длин волн от 570 до 590 миллимикрон, должны обладать весьма избирательными спектральными характеристиками. Кривые на верхнем графике представляют отражательные характеристики красок, которые давали бы абсолютно насыщенный цвет в нашем мире. На нижнем графике эти кривые растянуты так, что полосу 570—590 миллимикрон охватывает область всего видимого спектра (400—700 миллимикрон).

или «точка обращения цвета» где-то между ними, такая, что все длины волн по одну сторону от нее следует считать «длинными», а все по другую

мы вынуждены прибегнуть к фотомира. Но прежде нужно доказать, что это вообще возможно. Рассмотрение графиков на рис. 14 и 15 приводит к обнадеживающему выводу, что двухцветная цветоделенная фотография в мире, освещенном светом с любой шириной спектральной полосы, одинакова с двухцветной фотографией в мире с любой другой шириной полосы длин волн, в том числе и в нашем мире, но при условии, что изменениям в ширине спектральной полосы цветного мира соответствуют точно пропорциональные изменения в полосах поглощения красок. Для «переселения» в новые «миры» с их узкими по спектральным характеристикам красками, следовательно, мы можем использовать наши обычные черно-белые «красные» и «синие» снимки, снятые через красный и зеленый светофильтры.

МЕХАНИЗМ ЦВЕТОВОГО ЗРЕНИЯ

Демонстрация изображения посредством камеры с натриевой лампой приводит к важному соображению, которое еще не упоминалось нами, хотя и содержится в сказанном выше. Если глаз воспринимает цвет путем сравнения более длинных и более коротких световых волн, то должна существовать «точка равновесия»,

сторону—«короткими». Из опыта с камерами можно заключить, что «точка обращения цвета» должна смещаться; это делает натриевый свет «длинноволновым» в одном случае и «коротковолновым»—в другом.

Где же находится эта точка в обычном, освещенном солнцем мире? Опыты, проведенные с большим числом наблюдателей, показывают, что ей соответствует длина волны света в 588 миллимикрон. Когда мы использовали эту длину волны в одной части двойного монохроматора, а белый свет—в другой части, изображение оказывалось почти бесцветным. При освещении длинами волн короче 588 миллимикрон белый свет

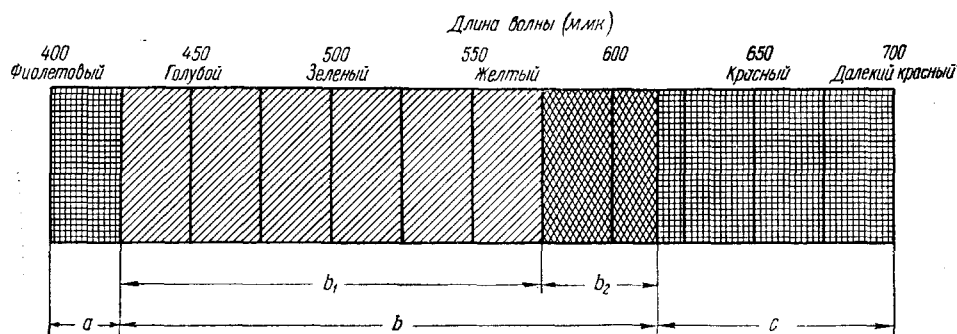
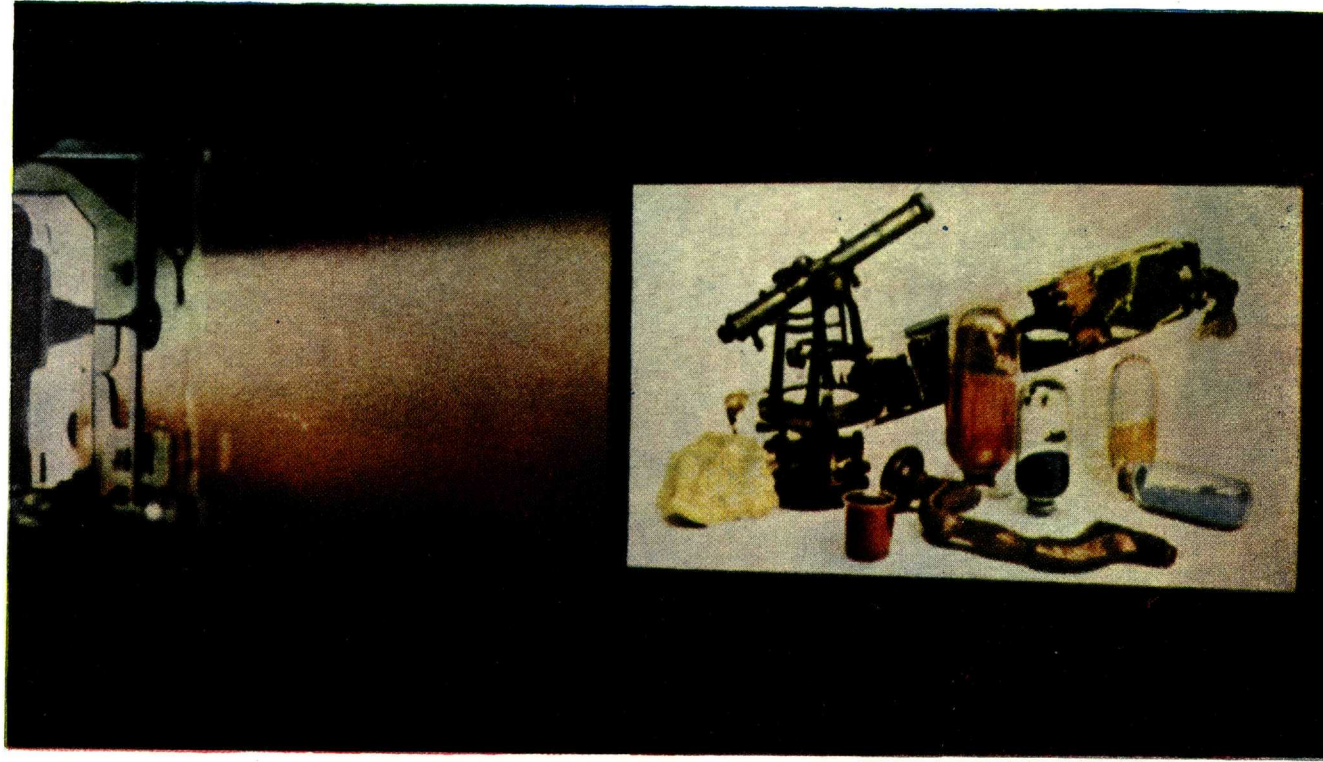


Рис. 16. Длина волны света и цвет не зависят друг от друга, за исключением соотношения между более короткими и более длинными волнами. На схеме показана роль, которую играют различные длины волн. Те из них, которые находятся в интервале a , служат только коротковолновым стимулятором ощущения цвета; находящиеся в интервале b могут быть как коротковолновым, так и длинноволновым стимуляторами; в интервале c находятся длины волн, которые могут быть только длинноволновым стимулятором цвета. Если длины волн в интервале b_1 служат коротковолновыми стимуляторами, то для получения полной гаммы цветов их следует комбинировать с волнами большей длины. Если же они используются в качестве длинноволновых стимуляторов, то они смогут создать только ограниченное разнообразие цветов. Длины волн в интервале b_2 будут давать полную гамму цветов независимо от того, служат они стимуляторами для длинноволнового или коротковолнового снимков. Если освещение обоих диапозитивов производится светом с длинами волн в области от 405 до 520 миллимикрон, происходит «обращение коротких волн» (см. цветовую карту на стр. 174).

служит длинноволновым стимулятором цвета; при длинах волн более 588 миллимикрон белый свет играет обратную роль.

Из опытов с двойным изображением мы уже знаем, что цвет, как его видит глаз, есть информация о распределении коротких и длинных световых волн по полю зрения (рис. 16). При этом лишь небольшое значение имеет та «полоса частот», по которой «сообщения» передаются в глаз. Эта ситуация отчасти аналогична той, которая имеет место в радиовещании: одна и та же информация может быть передана любой из радиостанций, работающих на различных несущих частотах. Наши глаза всегда готовы воспринять любую частоту из видимого спектра. И они обладают поистине фантастической способностью отличать более

Рис. 2. При освещении длинноволновых и коротковолновых диапозитивов близко расположенными друг от друга узкими спектральными полосами появляются цвета, воспроизводимые на приведенных фотографиях. Длины волн освещения показаны стрелками на спектрах под каждой из фотографий. Эти изображения нельзя было сфотографировать непосредственно, так как спектральные характеристики цветных пленок в ограниченной области используемых здесь длин волн сильно отличаются от соответствующих характеристик глаза. Приведенные фотографии получены при искусственном подборе видимых глазом цветов изображения до их совпадения при цветной печати.





579 ↑ ↑ 599

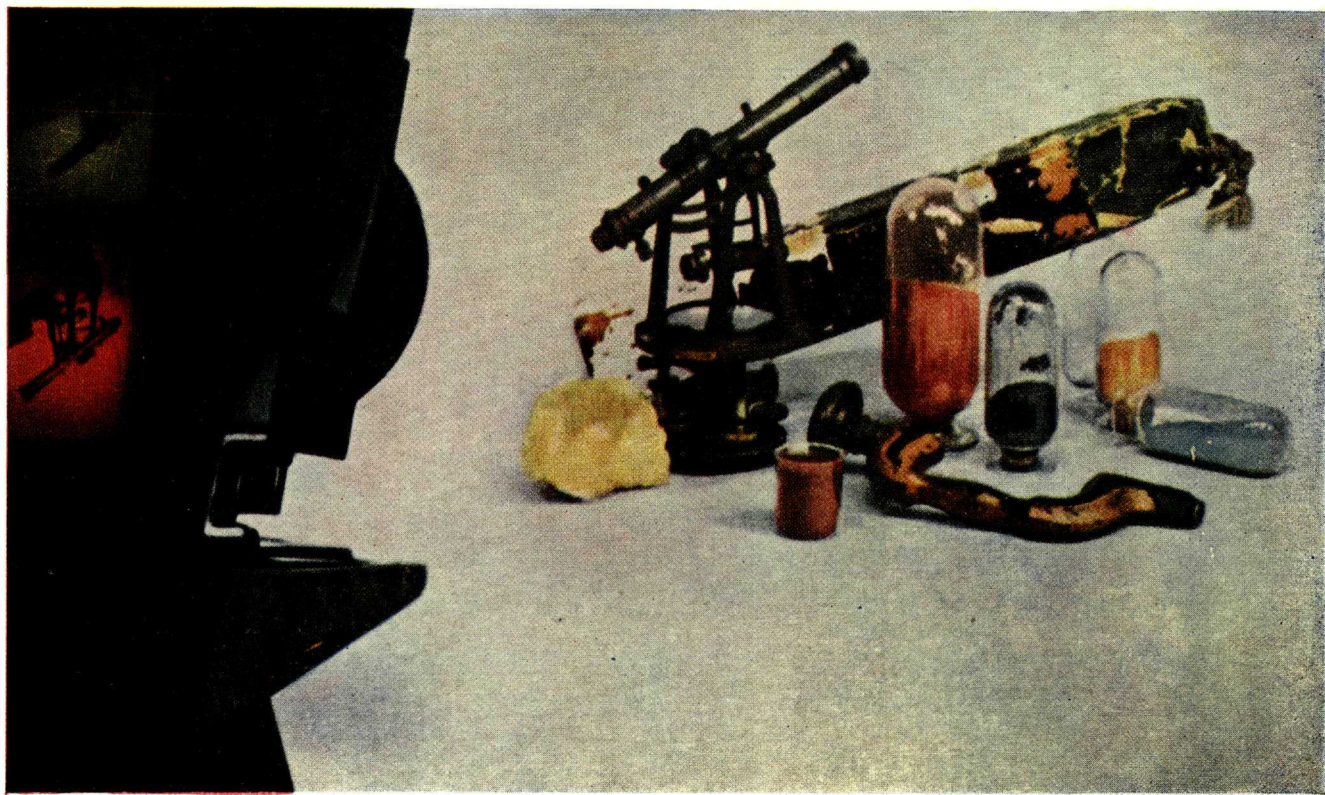


535



589





длинноволновый сигнал от более коротковолнового при любой частоте и ширине спектральной полосы. Каким-то образом глаза отмечают «точку обращения цвета» и делают входящие в них «несущие» волны на длинные и короткие по отношению к этой точке.

В наших опытах мы использовали одну фотографию, усредняющую по всем длинным волнам, и одну, усредняющую по всем коротким волнам. Что происходит в реальном мире, где глаза воспринимают непрерывный спектр длин волн? Можно предполагать, что эти длины волн, по-видимому, регистрируются на сетчатке глаза в виде многих отдельных цветоделенных «фотографий»; число их во много раз больше тех трех, которых, как полагал Максвелл, вполне достаточно для цветового восприятия, или тех двух, которых, как показали мы, достаточно на самом деле. «Вычислительный центр» системы глаз—мозг устанавливает «равновесную» длину волны; затем он усредняет по всем фотографиям с длинноволновой стороны от «равновесной» длины волны и по всем фотографиям с коротковолновой стороны. Два усредненных «изображения» сравниваются как реальные фотографические изображения в наших опытах в соответствии с нашей координатной системой.

В заключение хотелось бы отметить, что, хотя в наших опытах мы имели дело с двумя фотографиями и наша координатная система двумерна, здесь изложена отнюдь не «двухцветная» теория цветового зрения. Когда мы использовали для освещения одного или обоих диапозитивов спектральные полосы, мы получали свет со многими длинами волн, исходящий из каждой точки экрана. И если классическая теория «трех основных цветов» справедлива, то она должна была бы описать цвета каждой из этих точек. А этого, как мы уже видели, классическая теория совершенно не в состоянии сделать. Однако в наших опытах мы действительно работали с двумя «пакетами» информации. Мы продемонстрировали, как глаз может сделать с этими двумя «пакетами» почти все, что требуется. Назначение же третьего «пакета» далеко не очевидно. Мы сейчас создаем тройной монохроматор для освещения диапозитивов, чтобы выяснить этот вопрос.

Третье «изображение» может давать более полные сведения об уровне освещенности объекта или же привносить дополнительные полезные взаимодействия со стимуляторами цвета от первых двух «изображений». Однако в шкале цветовых ощущений нет такой глубокой пропасти, которую следовало бы заполнять третьим «изображением». В данном конкретном изображении какая-либо из комбинаций двух нервных раздражений, быть может, и не вызовет ощущения интенсивного голубого или нежного желтовато-зеленого цвета, но, по-видимому, комбинации двух раздражений более чем достаточны для нормальной жизнедеятельности живых организмов. Тем не менее мы предполагаем, что богатство цветов увеличится при «введении в игру» третьего стимулятора. Но что бы мы ни узнали при добавлении третьего цвета, процесс цветового зрения останется одним из самых удивительных с эволюционной точки зрения. Почему система, которая может столь хорошо работать с двумя «пакетами» информации, развивается

Рис. 5. Цветные объекты были сфотографированы специальной двойной камерой, которая находилась слева. Видны два матовых экрана камеры, причем одно из изображений фотографируется через красный, а другое — через зеленый светофильтр. Изображения снимаются на обычную черно-белую пленку; затем с негативов изготавливаются черно-белые диапозитивы.

Рис. 7. «Красный» диапозитив проектируется через красный светофильтр, а «зеленый» диапозитив — без фильтра. При совмещении обоих изображений на экране справа объект воспроизводится во всех своих цветах.

природой для еще более хорошей работы с тремя? Кто знает, не будет ли эта система работать еще лучше с четырьмя, пятью и более «пакетами»?

Что глаз сам «делает» с полноцветным спектром в нашем мире? Делает ли он только два усреднения по спектру? Или же глаз более полно использует «новую» способность, которую мы обнаружили,—способность четко различать между изображениями в очень близких друг к другу длинах волн света? Видимо, глаз действительно производит большое число усреднений, гораздо больше указанных здесь двух или трех.

Даже если глаз использует более чем два «канала информации», безусловно огромным является скачок от одного к двум «каналам». Здесь, очевидно, и проявляется в полной мере «мощь» наших глаз. И сколько бы ни потребовалось добавить «каналов», основной принцип цветового зрения останется неизменным. Цвета в естественном изображении зависят от случайной «игры» более длинных и более коротких световых волн по всему полю зрения.
