

Я занимаюсь нейрофизиологией зрения: измеряю активность нейронов в зрительной системе и пытаюсь понять, как видит человек, но охотно признаю, что художники начали изучать этот вопрос гораздо раньше нас, ученых. Произведение искусства — это в том числе эксперимент. Пока работа не закончена, художник не знает, какое воздействие она окажет на зрителя и даже на своего создателя. А некоторые художественные произведения позволяют узнать о нашем зрении важные вещи, настолько фундаментальные, что о них можно говорить с позиций нейробиологии, которая за всем этим стоит.

МАРГАРЕТ ЛИВИНГСТОН

Теперь мы неплохо понимаем, почему желтый с синим светом дают белый, почему краски одинаковой светлоты мерцают, почему черный предмет остается черным, смотрите ли вы на него в сумерках или на солнечном пляже. Книга, которую вы держите в руках, отвечает на эти и многие другие вопросы, показывая, что в искусстве все определяется работой мозга. Если мы поймем, что происходит в мозге, когда мы смотрим на художественное произведение, возможно, это укрепит уважение людей как к искусству, так и к науке. Дистанция между этими областями сложилась в нашем сознании в силу академической традиции разделять знание на отдельные сферы. Одна из целей данной книги — преодолеть разделение, и никто не может положить этому процессу более достойное начало, чем Маргарет Ливингстон.

ДЭВИД ХЬЮБЕЛ

**VISION AND**

**THE BRAIN**

**THE BIOLOGY OF SEEING  
BY MARGARET LIVINGSTONE**

[Купить книгу на сайте kniga.biz.ua >>>](http://kniga.biz.ua)

МАРГАРЕТ ЛИВИНГСТОН

ИСКУССТВО И ВОСПРИЯТИЕ  
БИОЛОГИЯ ЗРЕНИЯ

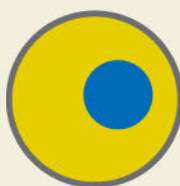
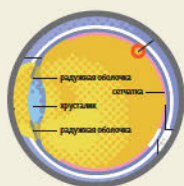


[Купить книгу на сайте kniga.biz.ua >>>](http://kniga.biz.ua)

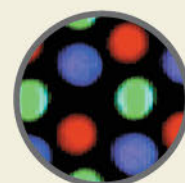
Моим мальчикам:  
Дэвиду, Дуайту и Кевину

# СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ ДЭВИДА ХЬЮБЕЛА .....	8
ВВЕДЕНИЕ .....	10
<b>1. Свет</b> .....	12
<b>2. Глаз и мозг</b> .....	24
<b>3. Светлота (валёр)</b> .....	30
<b>4. Цвет</b> .....	38
<b>5. Контрасты (воздействие окружения)</b> .....	48
<b>6. Воздействие окружения и восприятие цвета</b> .....	62
<b>7. Резкость и пространственное разрешение</b> .....	78
<b>8. Резкость и цвет</b> .....	94
<b>9. «Где» и «Что»</b> .....	118
<b>10. Спецэффекты при равной светлоте цветов и иллюзия движения</b> .....	128



<b>11.</b> Как сделать двумерное изображение объемной сцены трехмерным: светотень .....	146
<b>12.</b> Как сделать двумерное изображение объемной сцены трехмерным: перспектива .....	172
<b>13.</b> Как сделать двумерное изображение объемной сцены трехмерным: стереопсис .....	180
<b>14.</b> Локальное и глобальное .....	194
<b>15.</b> Лица .....	202
<b>16.</b> Кино, телевидение и компьютерная графика .....	210
<b>17.</b> Талант, музыка и трудности в обучении .....	220
ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА .....	234
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ .....	235
ФОТОМАТЕРИАЛЫ .....	238
БЛАГОДАРНОСТИ .....	240



# ПРЕДИСЛОВИЕ

Мы с Маргарет Ливингстон больше 35 лет работаем вместе. Первые 15 из них мы были как пара лошадей в одной упряжке, а где-то с 1990 года ведем исследования независимо, но в соседних лабораториях с общими студентами и сотрудниками, неизменно продолжая диалог о своей науке. Маргарет уже давно интересуется искусством и тем, как оно связано с нейробиологией зрения, так что для нее вполне естествен вопрос: можно ли глубже понять изобразительное искусство благодаря тому, что мы узнали за последние десятилетия о зрительной системе? Исследования Ливингстон затрагивают все основные аспекты нейробиологии зрения, включая восприятие движения, объема, цвета и формы.

За последние 50 лет в наших знаниях о том, как мозг интерпретирует полученную от глаза информацию, произошел огромный прогресс — во многом благодаря новым инструментам, которые дали нам возможность задавать правильные вопросы. С помощью микроэлектродов можно наблюдать за деятельностью отдельных клеток мозга; электронная аппаратура позволяет усилить и записать эти сигналы; а благодаря новой нейроанатомической технике можно выяснить, как клетки связаны между собой. Теперь мы знаем — если не во всех подробностях, то в общих чертах, — что мозг делает с базовыми составляющими зрительной информации на первых этапах восприятия. Эти сведения побуждают нас глубже ценить изобразительное искусство. В будущем нейробиология зрения станет служить искусству подобно знаниям о костях и мышцах, которыми веками пользовались художники, изображая человеческое тело.

Такие отношения между искусством и современной наукой могли бы остаться лишь призрачной, несбыточной мечтой, если бы нейробиологические исследования зрения были слишком абстрактны и высокоразвиты, чтобы оказаться доступными людям без серьезного научного и математического образования. К счастью, в нашей области нет таких премудростей, как в теории относительности или квантовой механике. Я никогда не сомневался, что за пару часов смогу посвятить любого человека с хорошим школьным образованием во все главные достижения зрительной нейронауки за последние 50 лет. Как-то я прочел персональную лекцию по нейробиологии Франсуазе Жило (той, которая с Пикассо), и по ее вопросам было очевидно, что ей все понятно, включая то, что я говорил о рецептивных полях и сложных клетках. Очень приятно, что мы можем побеседовать о своей области науки с друзьями и соседями, и я во многом сочувствую своим приятелям-физикам, которым, вероятно, весьма одиноко.

Учитывая, насколько легко донести эти идеи, очень печально, что они так малодоступны людям вообще и особенно художникам. Во многом здесь виноваты мы сами, поскольку не уделяем достаточно времени общению и, возможно, думаем, что наши мысли неспециалистам будут неясны. Вот два примера неизвестных большинству людей фактов. Я как-то прочел в статье о ткацком деле, что из желтой основы с синим утком получается зеленая ткань, хотя со времен Ньютона, с XVII века, известно, что эти цвета должны давать белый или серый. А еще большинство людей, похоже, считает то, что мы видим на рисунке углем или в черно-белом фильме, чем-то не встречающимся в обычной жизни, хотя в сумерках зрение становится черно-белым, а значит, цветовая слепота — часть нашего повседневного (или повсенощного) опыта.

Это не значит, что теперь мы понимаем устройство зрения достаточно глубоко или точно, чтобы объяснить, чем работы Вермеера (Вермера) лучше карикатур в ежедневной газете. Наши знания о зрительной системе зачаточны, они охватывают всего лишь три или четыре стадии восприятия в зрительной коре, тогда как известно, что в одной только затылочной доле протекает еще по крайней мере несколько десятков этапов этого процесса, и все они пока что не изучены. Нам известно о нескольких первых кирпичиках, из которых строится зрение, и это уже гораздо больше, чем мы знали полвека назад, но никто по-прежнему не представляет себе, что происходит в мозге, когда человек распознает шляпу, английскую булавку или лодку или когда он смотрит на картину, обладающую сильным эмоциональным воздействием. И все же теперь мы неплохо понимаем некоторые элементарные вещи: почему желтый с синим светом дают белый, почему краски одинаковой светлоты мерцают, почему черный предмет остается черным, смотрите ли вы на него в сумерках или на солнечном пляже.

Книга, которую вы держите в руках, отвечает на часть этих вопросов, показывая, что в искусстве все определяется работой мозга. Если мы поймем, что происходит в мозге, когда мы смотрим на художественное произведение, возможно, это укрепит уважение людей как к искусству, так и к науке. Дистанция между этими областями сложилась в нашем сознании искусственно, в силу академической традиции разделять знание на отдельные сферы. Одна из целей данной книги — преодолеть это разделение, и никто не может положить этому процессу более достойное начало, чем Маргарет Ливингстон.

*Дэвид Хьюбел, 2002 г.*



# ВВЕДЕНИЕ

Я занимаюсь нейрофизиологией зрения: измеряю активность нейронов в зрительной системе и пытаюсь понять, как видит человек. Но я охотно признаю, что художники начали изучать этот вопрос гораздо раньше нас, ученых. Произведение искусства — это в том числе эксперимент. Пока работа не закончена, художник не знает, какое воздействие она окажет на зрителя и даже на своего создателя. А некоторые художественные произведения хороши тем, что позволяют узнать о нашем зрении важные вещи, настолько фундаментальные, что о них можно говорить с позиций нейробиологии, которая за всем этим стоит.

Мы научились видеть так хорошо, что большинству неспециалистов трудно осознать, насколько сложная вещь — зрение. Миллионы долларов в бюджете США ушли на попытки военных служб создать беспилотное транспортное средство, которое могло бы проехать по дороге, не сбившись с пути. А после катастрофы 11 сентября те же самые подрядчики Министерства обороны потратили еще больше денег на программное обеспечение для распознавания лиц, причем эти программы по-прежнему не идут ни в какое сравнение с возможностями человека, даже когда тот не слишком внимательно смотрит. Наверно, что зрительная система просто передает в мозг изображение внешнего мира в высоком разрешении, а тот «читает» или «просматривает» это изображение, *потому что в мозге некому рассматривать картинку*. Там нет ничего, кроме массы нейронов, а все, на что способен нейрон, — это передавать или не передавать сигнал. Нейрон может проводить импульс быстрее или медленнее, но передать информацию можно только с помощью наличия или отсутствия возбуждения, а значит, ваш мозг представляет собой двоичную, или цифровую, вычислительную машину<sup>1</sup>. Иными словами, все ваши мысли, чувства, осознания и мечты — это просто проявление того, что какая-то группа нейронов возбудилась или не возбудилась. Функция зрительной системы состоит в обработке информации: эта система извлекает ее (в виде паттернов возбуждения различных популяций нейронов) из рисунка, который образует на сетчатке свет. Начиная с сетчатки и далее зрение — это информация в виде нервных импульсов, и на каждом этапе обработки она оказывается представлена все более абстрактными, биологически значимыми способами. Искусство, как и нейронаука, показывает природу этой вычислительной деятельности.

<sup>1</sup> Мозг нельзя однозначно отнести к системе, использующей только аналоговый или только двоичный принцип. Обработка сигналов мозгом имеет черты обеих систем: на уровне нейрона отдельные тормозные и возбуждающие воздействия суммируются с использованием аналогового принципа, однако при превышении определенного порога формируется так называемый потенциал действия, который имеет черты двоичного принципа. — *Здесь и далее, если не указано иное, прим. науч. ред.*

Великие произведения искусства часто сообщают что-то важное о человеческой культуре или психологии, но я ограничусь художественными произведениями, которые могут рассказать о том, как мы видим, поскольку занимаюсь первичным зрительным восприятием. Биологи изучают зрительную систему, потому что она доступна для экспериментального наблюдения, и, если нам когда-либо удастся разобраться в ней, она сможет показать, как действует мозг в целом. Анатом по кусочку коры головного мозга едва ли сумеет сказать, из какой части органа взято серое вещество, даже если ему удастся очень подробно рассмотреть его устройство<sup>1</sup>. Иными словами, большинство участков мозга производит одни и те же вычисления независимо от типа информации, которая в эти области поступает. Так что, если мы разберемся со зрением, нам станут ясны и основы слуха, обоняния, движения и даже мышления. Надеюсь, к концу моей книги вы убедитесь, что работы некоторых художников могут рассказать нечто важное не только о том, как мы видим, но и о том, как мы думаем.

<sup>1</sup> Это справедливо для многих ассоциативных областей новой коры, однако для некоторых узкоспециализированных областей, например моторной или зрительной, существуют очень выраженные нейроанатомические особенности, позволяющие их однозначно идентифицировать.

# 1

## СВЕТ

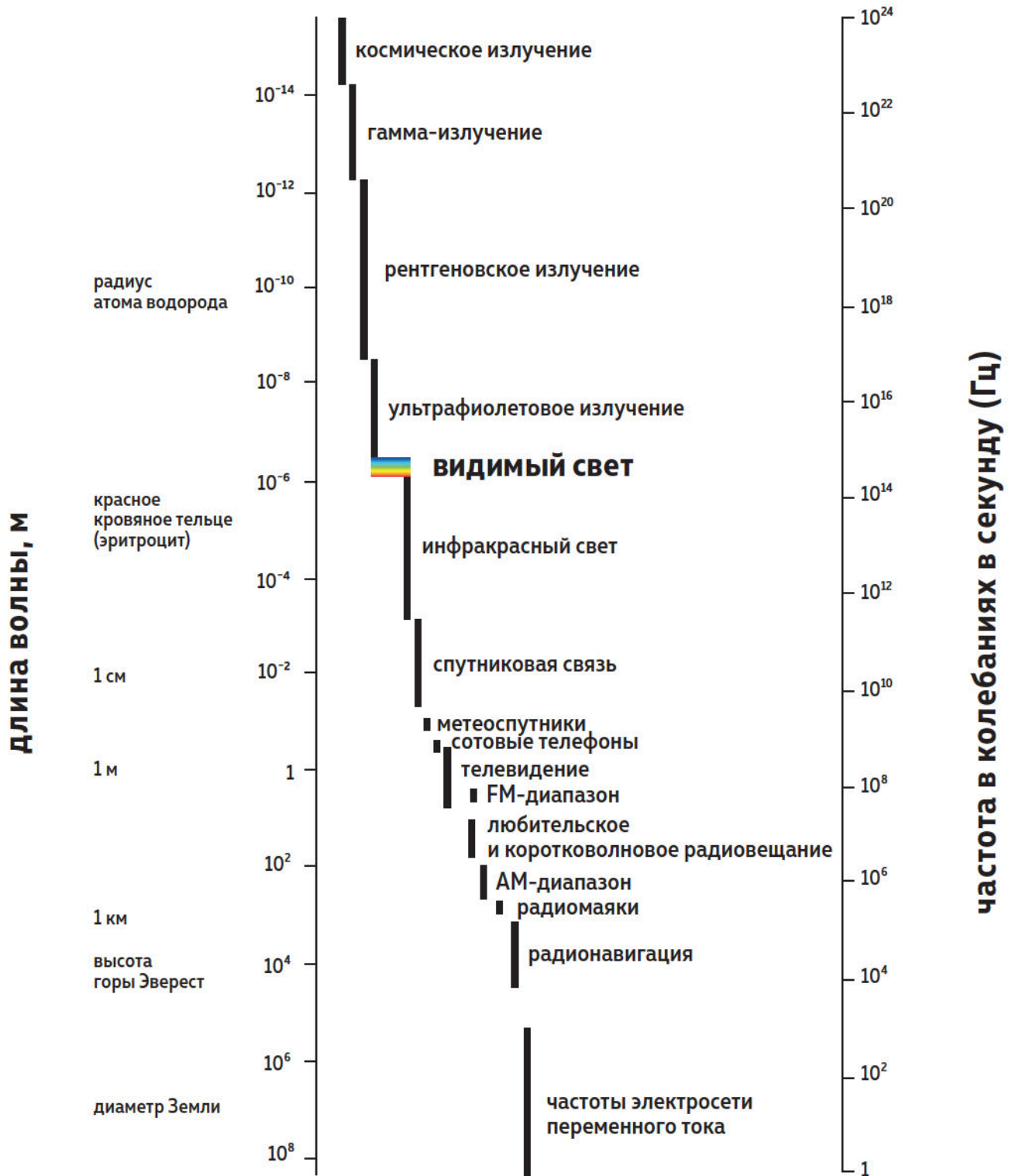
На соседней странице: электромагнитный спектр образуют любые возмущения электромагнитного поля, которые распространяются в пространстве со скоростью света. На графике по оси слева отложены длины волн, а справа — частоты электромагнитного спектра. Для каждой части спектра указаны соответствующие классы энергии, а для сравнения по длине приведены некоторые известные объекты (слева). Видимый свет занимает узкий диапазон электромагнитного спектра

Возможно, вы удивлены и даже опечалены тем, что книга об искусстве начинается с главы по физике. Эта книга посвящена зрению — процессу восприятия и интерпретации отраженного от объектов света — и тому, что искусство позволяет узнать о нем. Чтобы сделать написанное мной более полезным и интересным, мы освежим ваши знания о природе света, о том, почему цветные предметы цветные и как, генерируя свет разными способами, получить самые разные сочетания длин волн. Как сказал английский физик XIX века Томас Юнг в «Курсе лекций по естественной философии и механическому искусству» (A Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts): «Природа света мало что значит для насущных жизненных вопросов и для практики искусства, но она чрезвычайно интересна во многих других отношениях».

Греки еще в V веке до н.э. предположили, что между глазом и видимыми предметами должна быть какая-то связь. Однако характер этой связи (которую, как мы теперь знаем, составляет свет), как и самые основные факты о зрении, оставался неизвестным людям еще тысячи лет. Одни учения гласили, что глаз испускает некое излучение или огонь, а тот, достигнув видимого объекта, ощупывает его. Другие склонялись к обратному — что видимые объекты испускают вещество, которое попадает в глаз. Третий же лагерь предполагал, что имеют место оба вида излучения, а зрение получается, когда они сталкиваются. В IV веке до н.э. Аристотель опроверг идею о зрительном огне, идущем из глаза, с помощью следующего вопроса: если зрение возникает благодаря свету, который глаз испускает подобно лампе, то почему мы не видим в темноте?

Арабский физик Ибн аль-Хайсам около 1000 года н.э. заключил из экспериментальных наблюдений, что свет действительно попадает в глаз. Первое наблюдение состояло в том, что «глядя на очень яркий свет, глаз чувствует боль и может быть поврежден», второе — что, посмотрев на яркий свет, глаз затем видит след изображения. Тем не менее через 500 лет, во времена Леонардо да Винчи, представление о лучах, которые исходят из глаза и ощупывают видимые объекты, все еще было достаточно распространено, чтобы Леонардо пришлось возразить: «Не может быть, чтобы глаз испускал из себя самую зрительную силу в виде зрительных лучей, потому что после того, как откроется глаз, откуда такие лучи должны выйти, этой зрительной силе потребовалось бы время, чтобы достичь объекта. Тогда лучи и за месяц не смогли бы забраться на высоту, где находится солнце, если бы глаз захотел увидеть его». Если вам удастся отвлечься от современных представлений о природе света и ненадолго поставить себя на место средневекового человека, вам будет

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ СПЕКТР



На соседней странице: Солнце и флуоресцентные лампы в спектре видимого света дают разное количество энергии при разной длине волны. Солнце — широкополосный источник света (солнечный свет состоит из широкого диапазона длин волн), а флуоресцентный свет — это узкие пики, соответствующие пикам излучения возбужденных электронов различных молекул в стеклянной трубке. Такой разный по волновому составу свет обоих типов нам кажется белым, потому что в человеческом глазу всего несколько видов светопоглощающих пигментов — это информационное «бутылочное горлышко»

действительно трудно соотнести отчетливо трехмерный мир, который вы видите, с мыслью, что для этого вам даны всего только два плоских изображения на сетчатке. Может показаться проще представить себе, что человек все-таки каким-то образом ощупывает мир некоей силой, которая исходит из глаз.

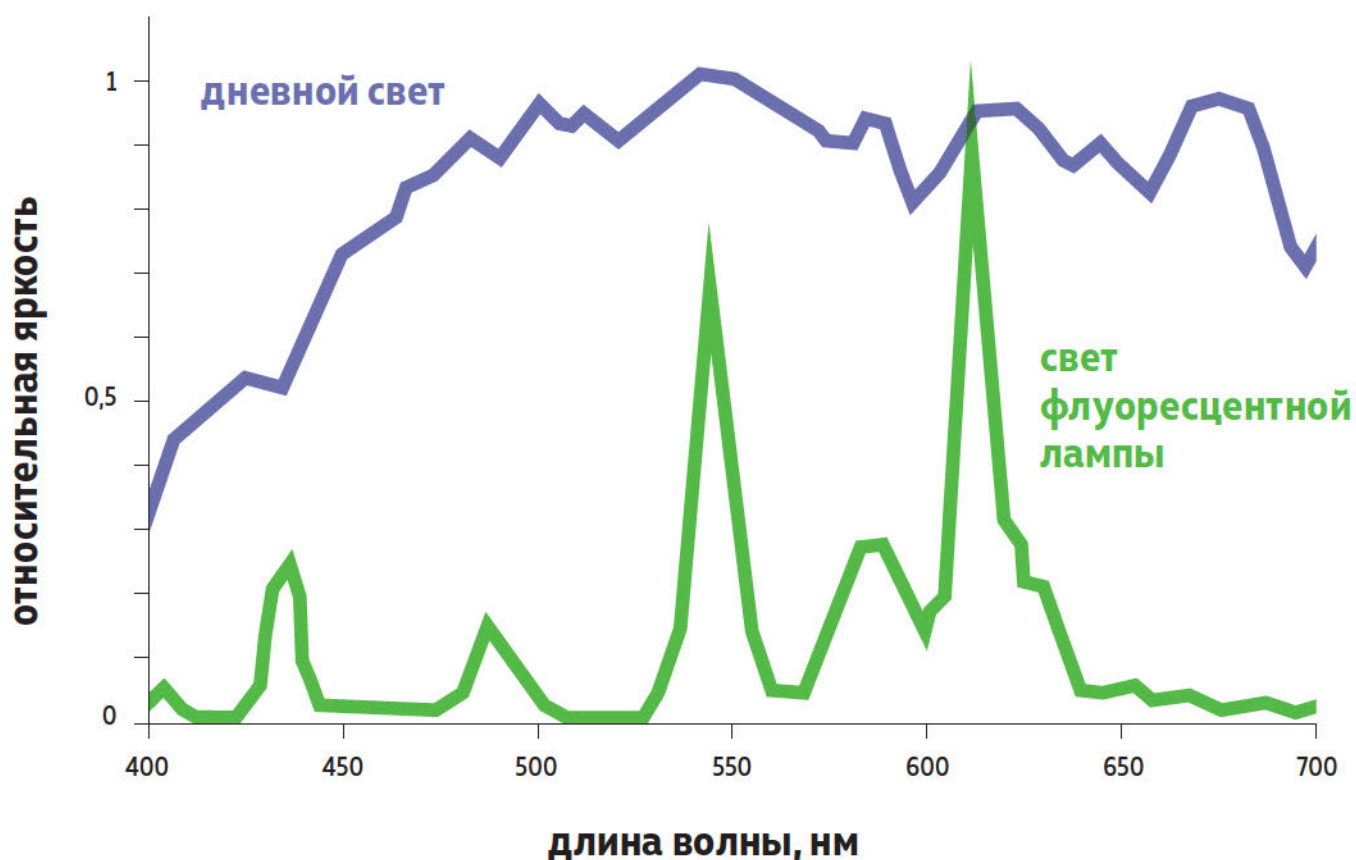
В 1604 году Иоганн Кеплер впервые высказал современную идею о том, что свет испускают такие источники, как Солнце, а затем он отражается от предметов и попадает в глаз. Кеплер думал, что, сам по себе бесцветный, свет «разбивается» и оказывается окрашен, когда соприкасается с предметом определенного цвета. Однако современник Кеплера Галилей по-прежнему чувствовал, что на самом деле природу света все еще никто не понимает. «Я всегда думал, что не могу постичь, что такое свет, — говорил он. — Я бы даже охотно согласился провести остаток дней в тюрьме на хлебе и воде, если бы знал наверняка, что сумею достичь понимания, от которого я, по-видимому, так безнадежно далек».

Огромный скачок в понимании природы света произошел в 1672 году благодаря работе Исаака Ньютона. Ньютон затемнил комнату ставнями, в которых проделал небольшую щель. Он пропустил солнечный луч, проходивший в эту щель, через треугольное стеклышко и увидел, что такая призма делит свет на лучи разных цветов и, как выразился ученый, «разной преломляемости» (то есть призма в разной степени отклоняла их от первоначального пути). Ньютон обнаружил, что цвет — это неизменное качество светового луча; в дальнейшем его невозможно разложить на другие цвета. Он также понял, что лучи окрашенного света можно соединять, чтобы получать свет других цветов, а иногда белый свет.

Во времена Ньютона шли горячие споры о природе света, в особенности о том, из чего он состоит — из частиц или волн. Некоторые результаты работы Ньютона, например то, что призмы отклоняют свет разных цветов на разные углы, подразумевали волновые свойства, но считалось, что тот факт, что свет не может огибать препятствия подобно звуковым и водяным волнам, говорит о его корпускулярной природе. Ньютон благоразумно приводил данные в пользу обеих гипотез и старался не выносить окончательных суждений. Однако в своей замечательной работе «Оптика», опубликованной в 1704 году, он косвенно высказался в защиту корпускулярной теории света, предположив, что свет разных цветов имеет разную массу. У самого Ньютона были сомнения относительно этого заключения, но авторитет ученого был таков, что корпускулярная теория господствовала еще сотню лет.

В конце концов волновая теория победила, отчасти благодаря тому, что были переосмыслены эксперименты Ньютона. В 1802 году Томас Юнг аккуратно отметил, что Ньютон, хотя в конце концов и предпочел корпускулярную теорию, признавал, что свет должен обладать некоторыми свойствами «волнообразных колебаний» или каким-то образом вызывать «колебания» в «эфирной среде», через которую проходит. Расширив наблюдения за яркими цветами на тонких пленках воды или масла, которые первым провел Роберт Гук (изобретатель сложного микроскопа), Ньютон заметил, что эти цвета систематически меняются в зависимости от толщины пленки. Юнг утверждал, что это — проявление волновой природы света. В 1802 году предположить, что Ньютон, чье имя на тот момент воспринималось как синоним корпускулярной теории, мог ошибаться, было почти кощунством. Несмотря на то что Юнг постоянно превозносил Ньютона в своем трактате, волновая теория сначала была очень непопулярной. Британский государственный деятель Генри

## ДЛИНЫ ВОЛН ДНЕВНОГО И ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО СВЕТА



Брум резко охарактеризовал идеи ученого: «Трудно иметь дело с автором, чей ум заполнен субстанцией столь непостоянной, подверженной колебаниям... Мы не принимаем... слабые работы этого автора, где мы тщетно искали признаки образования, пронизательности или остроты ума, которые могли бы восполнить очевидно недостающую ему способность к основательному размышлению». Но в конце концов аргументы Юнга восторжествовали. К середине XIX века и другие ученые получили новые доказательства того, что свет — это волна.

В 1905 году Альберт Эйнштейн отметил, что волновая теория света может быть неполной и что у света все же есть некоторые характеристики частиц. Он предположил, что существуют неделимые единицы (или кванты) световой энергии, которые мы теперь называем фотонами, и что эти частицы энергии перемещаются по волновым законам. Квантовая механика математически объясняет, как у электромагнитного излучения могут быть свойства волн и частиц одновременно. К счастью, для описания явлений, которые мы будем обсуждать в книге, эта наука нам не понадобится.

Самый главный вопрос о свете — из чего он состоит? — решился лишь в XIX веке, когда великий физик-теоретик Джеймс Клерк Максвелл наконец понял, что это лишь часть огромного сплошного спектра электромагнитного излучения. Все электромагнитное излучение, включая свет, движется в вакууме с одной и той же характерной скоростью — 300 000 километров в секунду.

Видимый свет качественно ничем не отличается от остальной части спектра. У него много общих характеристик с рентгеновским излучением и излучением УКВ-диапазона. Для человека свет — это что-то особенное только потому, что у нас в глазу есть рецепторы, выборочно реагирующие на волны энергии именно в узком диапазоне от 370 до 730 нм (от 0,00000037 до 0,00000073 м).

Электромагнитное излучение, в том числе свет, испускается, когда движутся заряженные частицы, например электроны. Иногда длина излучаемых волн покрывает широкий диапазон, а иногда соответствует очень точному значению. Электромагнитное излучение можно, например, получить нагревом. Чем горячее становится объект, тем короче волны, которые он испускает. От металла при нагреве где-то до 540 °С исходят все более короткие волны, а затем он начинает испускать видимый свет. Возможно, вы замечали, что, если лампу со светорегулятором приглушить, она светит красноватым светом (с большей длиной волны), а если сделать поярче, более синим (с короткой длиной волны). К тому же вы могли заметить, что на компьютерном мониторе точку белого можно выставить, указав определенную температуру.

Атомы также могут испускать излучение, когда отдельные электроны переходят с одного энергетического уровня на другой. Так бывает, когда свободные электроны, например в токе, сталкиваются с электронами, которые уже находятся в веществе, например в неоне или парах ртути. Возвращаясь в состояние покоя, электрон испускает фотон с определенной длиной волны.

Эти два способа получить электромагнитное излучение — накаливание и люминесценция — дают разные виды света. При накаливании светится нагретое вещество: такой свет дают солнце, огонь и вольфрамовые лампы (обычные лампочки). Флуоресцентные лампы, светлячки, телевизоры, компьютерные экраны и лазеры излучают люминесцентный свет, который получается при целенаправленном возбуждении и эмиссии электронов — эта реакция протекает при более низких температурах. Поскольку накаливание происходит в результате нагрева, а это неизбежный процесс, свет получается неселективный, то есть содержит волны разных длин. У люминесценции более точные характеристики. Обычно при возврате в невозбужденное состояние электрон испускает фотон с определенной характерной длиной волны, и свет, как правило, получается одного цвета. Разные вещества в процессе возбуждения и эмиссии испускают свет с разной характерной длиной волны. Таким образом, свет вольфрамовой лампочки — широкополосный, а спектр света от люминесцентного светильника содержит несколько узких пиков.

Белый свет одинаково хорошо получается и в результате накаливания, и от люминесцентного источника. При накаливании потоки света с разной длиной волны смешиваются, как и узкие эмиссионные пики флуоресцентного света, и свет в любом случае кажется белым.

## ЦВЕТ

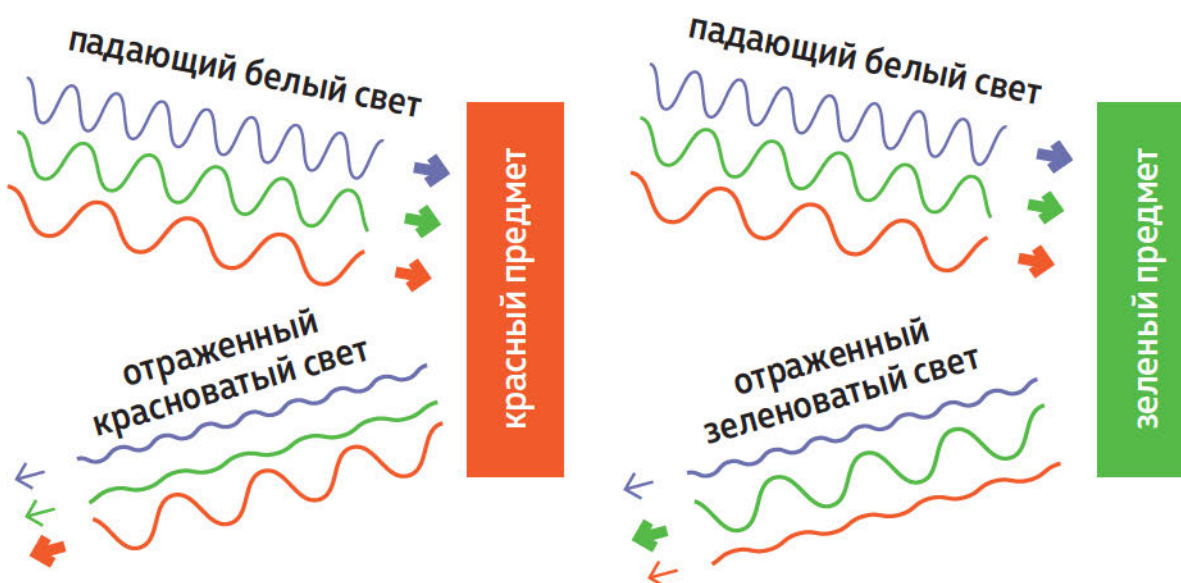
В диапазоне видимого света человек воспринимает волны разной длины как разные цвета. Большинству оттенков соответствует определенная длина волны, например как у красного света лазерной указки или желтого натриевой лампы, но чаще всего мы видим цвета, которые образует некоторый диапазон длин волн.

Эта широкополосность (широкий диапазон длин волн) связана с тем, что мы видим в основном отраженный свет. Когда свет падает на предмет, тот поглощает волны определенной длины. Та часть света, которую он не поглощает, отражается. Характеристики отраженного света возникают за счет дополняющих их характеристик поглощенного света. Чтобы предмет выглядел цветным, он должен выборочно поглощать часть видимого спектра и отражать остальное.

То, что мы видим предметы цветными из-за света, который они отражают, обнаружил Исаак Ньютон. Он разделил свет на разные цвета с помощью призмы, а затем отделил от полученного спектра небольшую часть — один цвет, — поместив на пути лучей черную дощечку с небольшим отверстием. Отверстие пропускало лишь часть спектра с узким диапазоном длин волн, то есть свет одного цвета. Ньютон обнаружил, что, вопреки его ожиданиям, после этого перекрасить луч в другой цвет было невозможно. Направляя выделенные части спектра на разные предметы, он увидел, что красное отражало красный свет, зеленое — зеленый и т.д. Вполне понятны современному читателю слова Ньютона из его первого доклада об этом фундаментальном открытии, представленного Королевскому обществу в 1672 году. Мне они очень нравятся: ясно представляю себе, как ученый пробует все, что приходит в голову, чтобы превратить один цвет в другой, думая, что это возможно. Вот отрывок из отчета: «Цвета — это не *изменения в свете*, которые можно получить с помощью преломления или отражения от природных тел (как принято считать), а *первоначальные, неотъемлемые свойства*, что отличают разные лучи друг от друга. Одни лучи склонны демонстрировать один лишь красный цвет и никакой другой; другие — один лишь желтый, третьи — один лишь зеленый и т.д. Вид цвета и степень преломляемости, свойственные определенному роду лучей, невозможно изменить ни преломлением, ни отражением

Часть света, который падает на предмет, поглощается. То, что не поглощено, отражается от поверхности предмета, и этот свет мы видим. Предмет *слева* на рисунке поглощает свет с более короткой длиной волны (синий и зеленый) лучше, чем с более длинной (красный), и поэтому выглядит красным. Предмет *справа*, который выглядит зеленым, поглощает красный и синий лучше, чем зеленый

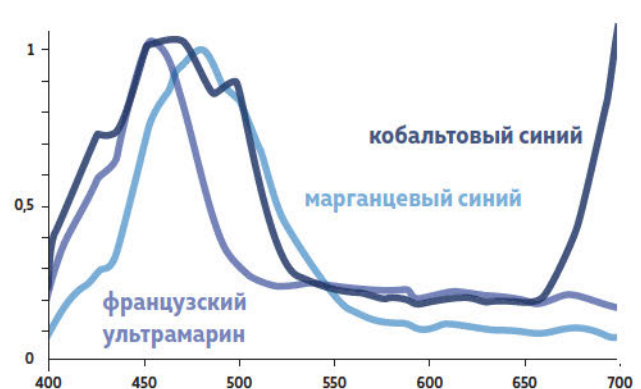
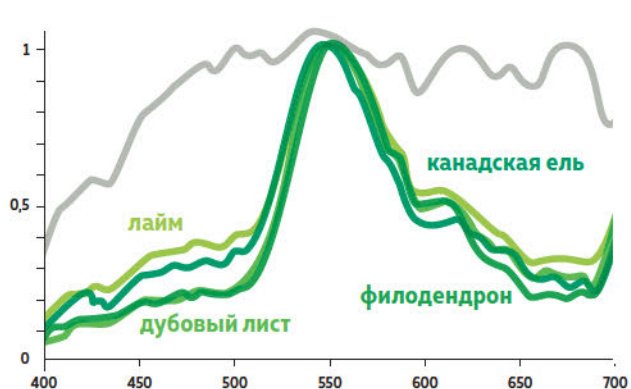
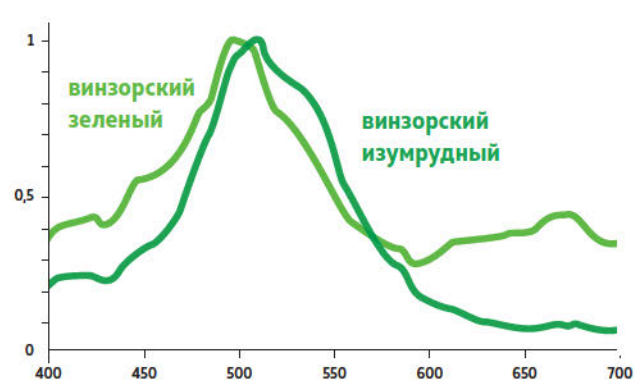
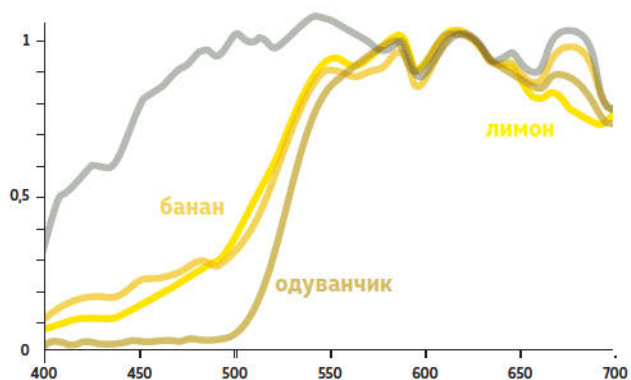
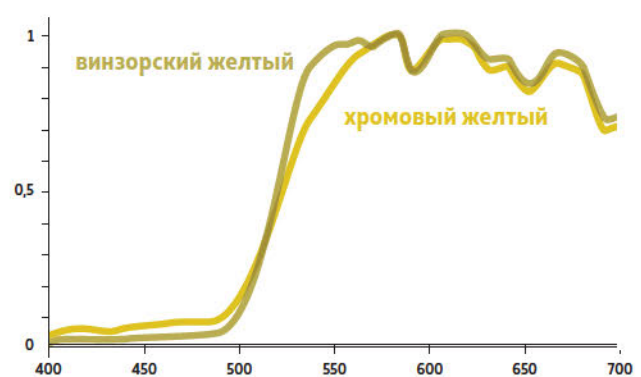
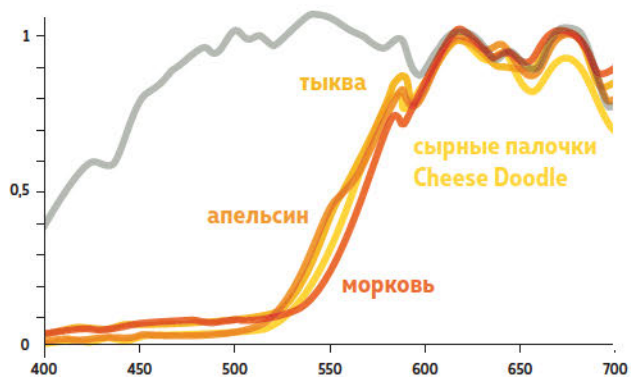
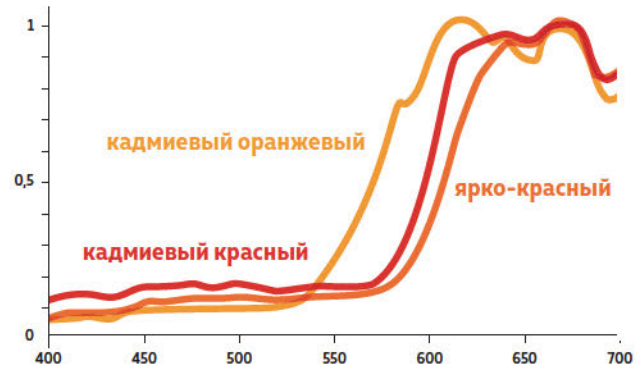
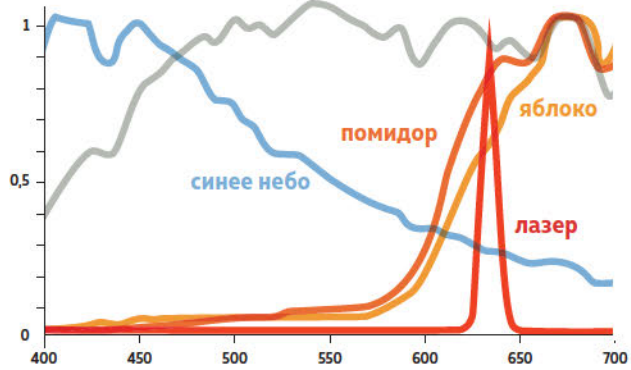
## МЫ ВИДИМ ПРЕДМЕТЫ ЦВЕТНЫМИ, ЕСЛИ ОНИ ОТРАЖАЮТ ВОЛНЫ ОДНИХ ДЛИН ЛУЧШЕ, ЧЕМ ДРУГИХ





## ДЛИНЫ ВОЛН СВЕТА, ОТРАЖЕННОГО ОТ НЕКОТОРЫХ ОБЫЧНЫХ ПРЕДМЕТОВ И НЕКОТОРЫХ МАСЛЯНЫХ КРАСОК

относительное количество отраженного света каждой длины волны



длина волны, нм

от природных тел, ни каким-либо еще способом из тех, что мне удалось испробовать. Лучи определенного вида, отделенные от лучей других видов, впоследствии упорно сохраняли свой цвет, невзирая на все мои усилия в попытках изменить его».

Если измерить длину световых волн, то окажется, что свет с длиной волны 640 нм выглядит красным, а с длиной волны 540 нм — зеленым; разница между ними — всего лишь 100 нм (0,00001 см). Предметы в окружающем мире, несомненно, способны выборочно поглощать свет с определенной длиной волны, ведь многие из них выглядят цветными. Обычно это происходит из-за разницы в химическом составе или физическом строении, то есть разные молекулы поглощают и отражают свет с разной длиной волны из-за разницы в молекулярной структуре или в энергетических характеристиках своих электронов.

Отраженный свет обычно покрывает большую часть спектра, потому что большинство химических веществ поглощает довольно широкий диапазон длин волн. Но краски Day-Glo поглощают энергию коротковолнового диапазона видимого света, а затем их электроны снова испускают свет в узком диапазоне более длинных волн. Так что в свете, который излучает оранжевая краска Day-Glo, на самом деле больше волн с длиной 590 нм, чем в источнике света (и больше, чем в свете, отраженном от белой поверхности рядом с краской),

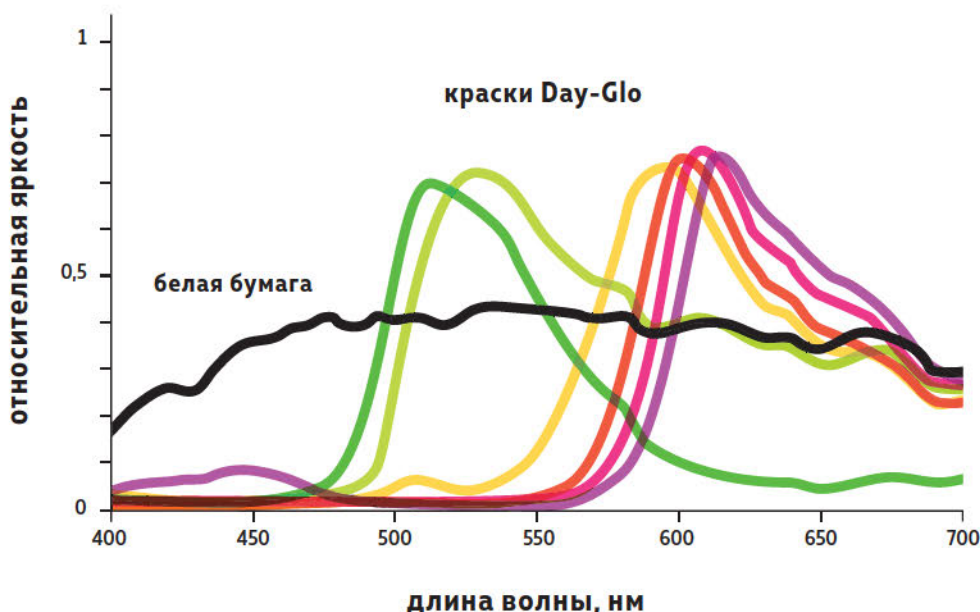
Ниже: люминесцентные краски Day-Glo поглощают свет с короткой длиной волны, а затем их электроны излучают эту энергию в виде света с более длинными волнами. Здесь приведены примеры спектров Day-Glo в сравнении со светом, отраженным от белой бумаги рядом с краской (черная линия). Каждая краска Day-Glo в определенном диапазоне отражает больше света, чем белая бумага, и все они отражают сравнительно меньше света в области коротких волн, где забирают световую энергию, чтобы преобразовать ее в энергию характерного диапазона более длинных волн. Здесь показаны следующие краски Day-Glo (пики расположены слева направо): зеленая Signal Green, зеленая Saturn Green, желтая Arc Yellow, оранжевая Blaze Orange, красная Rocket Red и красная Neon Red

На соседней странице: на графиках показано относительное количество света с каждой длиной волны, отраженного от ряда обычных цветных предметов (левый столбец) и от нескольких масляных красок, которые я купила в магазине товаров для художников (правый столбец). Здесь можно увидеть, какие длины отраженных волн характерны для разных цветов. Эти спектры получены при освещении предметов и образцов краски дневным светом, где, как выяснил Ньютон, широким спектром представлены все длины волн видимого света. Я использовала масляные краски фирмы Winsor & Newton: кадмиевый красный, ярко-красный, кадмиевый оранжевый, хромовый желтый, винзорский желтый, винзорский зеленый, винзорский изумрудный, марганцевый синий, кобальтовый синий и французский ультрамарин.

И масляные краски, и обычные предметы отражают свет всего видимого спектра, но волны одной длины они отражают лучше, чем волны других длин. А вот лазерная указка испускает свет в узком диапазоне длинных волн — он выглядит ярко-красным.

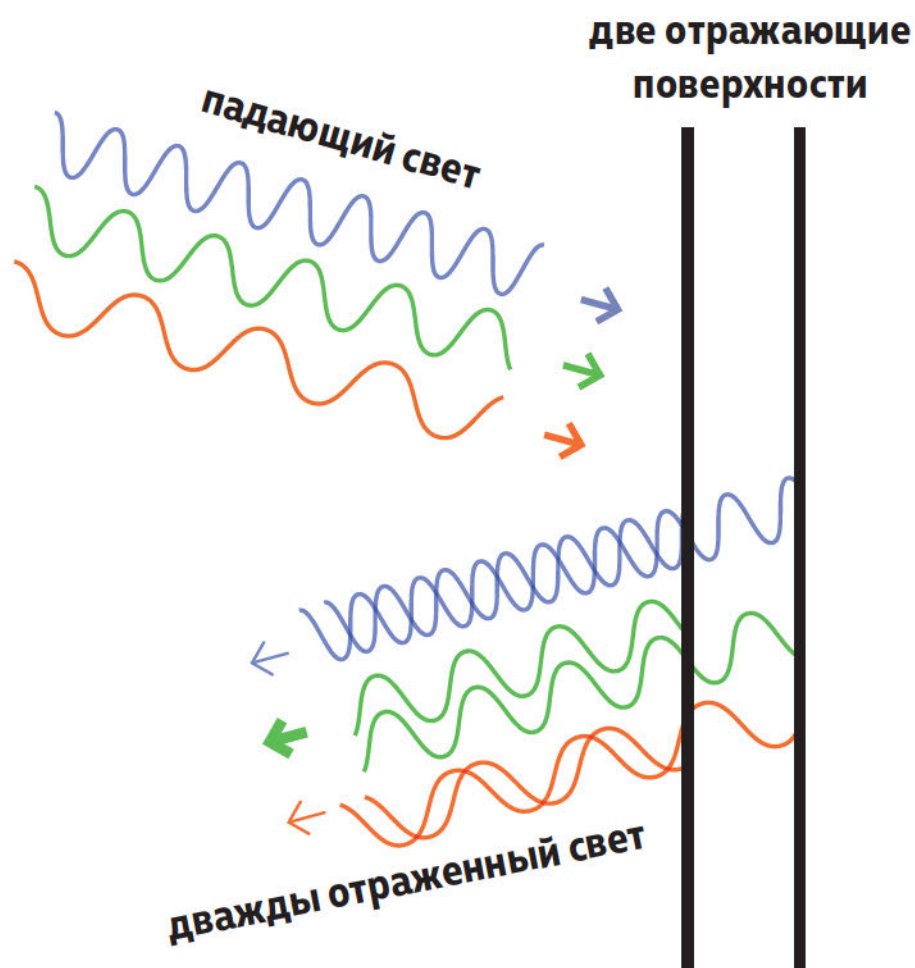
На графики предметов слева я наложила серую линию света, отраженного от белой бумаги при таком же дневном освещении, чтобы показать, что предметы отражают практически весь падающий свет в одной области видимого спектра и поглощают свет в другой

## СПЕКТРЫ НЕКОТОРЫХ КРАСОК DAY-GLO



Масляное пятно кажется разноцветным из-за явления, которое называется «интерференция». Если волны света, падающего на верхний и нижний слои вещества и отраженного от них, совпадают по фазе (то есть совпадают пики и спады волн), они усиливают друг друга; если же они находятся в противофазе (пики света одного отражения совпадают с минимумами другого), они гасят друг друга. Так что если толщина масляной пленки, например, равна 540 нм (длина волны зеленого света) или целому кратному 540 нм, то два отражения зеленого цвета совпадут по фазе, как показано на графике, и сложатся, а два отражения с другой длиной волны не совпадут и будут подавлять друг друга, и в результате пятно будет зеленоватым

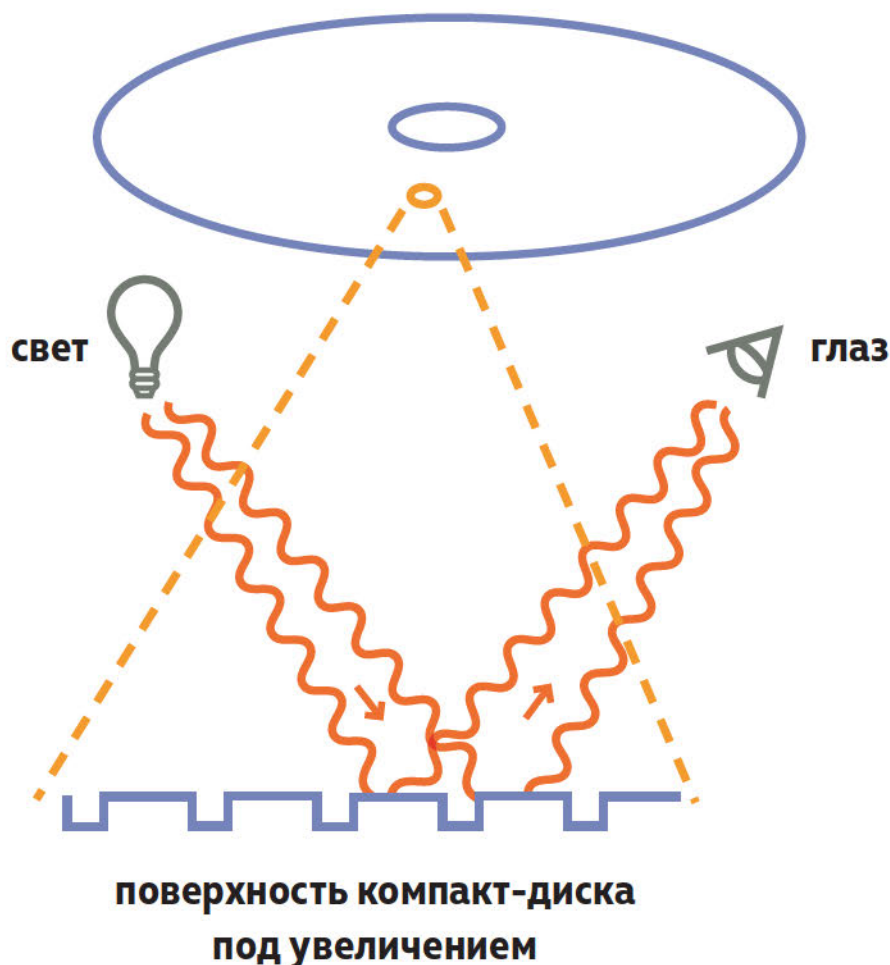
## ПОЧЕМУ МЫ ВИДИМ ЦВЕТА В МАСЛЯНОЙ ЛУЖЕ



потому что краска Day-Glo преобразует свет с другой длиной волны в оранжевый и снова испускает его. Из-за этого необычного свойства такие краски были очень популярны в оформлении интерьеров во времена моего студенчества в 1960-е; теперь их в основном можно увидеть на предупреждающих знаках.

Иногда цвет возникает только за счет физического строения предмета, в результате явлений, которые называются «интерференция» и «дифракция». Цвета, которые мы видим на крыльях бабочек и жуков, на жемчужинах, опалах, перьях пересмешников и павлинов, мыльных пузырях и масляных пятнах, — это примеры интерференции или дифракции цвета. Интерференция происходит, когда белый свет отражается от двух параллельных поверхностей, находящихся очень близко друг от друга, как нижняя и верхняя границы масляной пленки на воде. Мы видим цвета, если расстояние между этими двумя поверхностями попадает в диапазон длин волн видимого света. Белый свет, падающий на масляную пленку, частично отражается от верхней поверхности, а свет, который от нее не отражается, частично отражается от нижней. Поскольку свет — это волна, он может взаимодействовать сам с собой: волны

## ПОЧЕМУ МЫ ВИДИМ ЦВЕТА НА ПОВЕРХНОСТИ КОМПАКТ-ДИСКА



Дифракция цветов возникает, когда свет отражается от поверхности с бороздками, расстояние между которыми соразмерно длине световых волн, так что волны одной длины отражаются в фазе друг с другом, а других — не в фазе. На рисунке показано, как в противофазе отражается свет с определенной длиной волны, так что под этим углом вы увидите свет с длинами волн, комплементарными к данной. Под другими углами не в фазе окажутся другие цвета

складываются, если их пики совпадают, и гасят друг друга, если пики одного отражения совпадают с минимумами другого. Возможно, вы замечали, что в масляной луже можно увидеть циклические переходы цвета от красного к зеленому, затем к синему и т.д. Это происходит потому, что в центре пленка толще, а по краям тоньше, так что толщина в центре соответствует длине волны красного света, а более тонкие края соответствуют более коротким длинам волн и выглядят зелеными или синими. Там, где толщина пятна меньше половины длины волны видимого света, оно будет казаться черным, потому что все волны будут отражаться не в фазе и гасить друг друга<sup>1</sup>. Иногда можно увидеть концентрические цветные кольца, потому что слои жидкости, у которых толщина кратна длинам световых волн, вызывают аналогичный эффект.

<sup>1</sup> Автор упрощает объяснение для облегчения понимания данного феномена. Кроме двух крайних случаев, отсутствия отражения (полная деструктивная интерференция, разница в половину длины волны) и полного отражения (полностью конструктивная интерференция, разница равна длине волны), будут и все промежуточные случаи с разным количеством отраженного от поверхности света. Необходимо также отметить, что важна не только толщина пленки и длина волны света, но и коэффициент преломления пленки, так как на фазу будут влиять все перечисленные параметры.



Некоторые цвета на крыльях бабочек, в устричных раковинах, опалах и на панцире жуков получаются благодаря интерференции между светом, который отражается от верхней и от нижней поверхностей тонкого слоя прочной прозрачной пленки биологического происхождения. Другие цвета на крыльях бабочек и птиц получаются за счет дифракции. Дифракция возникает, когда свет отражается от поверхности с очень тонкими бороздками, расположенными на равных расстояниях, соизмеримых с длиной световых волн, так что опять же, волны одной длины отражаются в фазе, а другой — не в фазе. Цвета, возникающие в результате дифракции, легко увидеть, если посмотреть на заднюю поверхность практически любого обычного компакт-диска. Поскольку оптические бороздки компакт-диска расположены регулярно, они дают разные цвета, когда смотришь под разным углом. Если подставить диск под источник света, можно получить очень симпатичный спектр.

Цвета, полученные как интерференцией, так и дифракцией, меняются в зависимости от угла зрения, что придает им интересную динамичность. Это происходит, потому что расстояние, которое свет проходит между бороздками диска или в толще масляной пленки, меняется в зависимости от угла, под которым он падает на поверхность.

В следующих главах мы перейдем к вопросу о том, из-за каких свойств человеческой зрительной системы свет с такими разными длинами волн (как дневной и флуоресцентный) выглядит одинаково. Мы узнаем, каким образом глаз компенсирует огромную разницу в волновом составе света от разных источников, чтобы мы видели цвета предметов как постоянные. К взаимодействию отраженных цветов мы снова вернемся, когда будем говорить о неимпрессионизме. Краски отражают, а не испускают свет, и это ограничивает доступный художникам диапазон светлоты, или валёра, поэтому им приходится прибегать к различным хитростям, чтобы расширить в нашем восприятии диапазон светлоты на картине. Мы поговорим о том, какие свойства зрительной системы позволяют это сделать и какие приемы художники разработали, чтобы справиться с этим ограничением.

На соседней странице: я сфотографировала эту масляную лужу по дороге на работу. Иногда в таких лужах можно увидеть интерференцию цвета, потому что толщина масляной пленки находится в диапазоне длин волн видимого света. В середине пленка толстая, к краям она становится тоньше. При толщине пленки от 370 до 730 нм (или кратной 370–730 нм) и в зависимости от этой величины свет одних цветов отражается от ее верхней и нижней поверхностей в фазе, а свет других — нет