

## Глава 7

# Физика зрения

## Танец броненосцев на фоне распухшей Луны

### 7.1 • ЛУННАЯ ИЛЛЮЗИЯ

Одна из самых поразительных иллюзий в природе — кажущееся увеличение Луны при ее приближении к горизонту (рис. 7.1). Из-за чего увеличивается Луна: из-за рефракции, то есть преломления световых лучей атмосферой, изменения расстояния до спутника Земли или вообще это чисто психологический эффект, то есть ошибка восприятия?

**ОТВЕТ •** Когда Луна опускается почти до горизонта, она кажется нам примерно на 50% больше, чем когда висит над головой, но это чистая иллюзия. На самом деле угловой размер Луны всегда равен примерно  $0,5^\circ$  независимо от того, высоко она находится над горизонтом или низко. Если бы рефракция света в атмосфере была достаточно большой, кажущийся вертикальный размер Луны уменьшился бы, а не увеличился. Расстояние между Землей и Луной в течение нескольких часов, пока Луна поднимается или опускается, тоже сильно не меняется.

Иллюзия, из-за которой Луна кажется нам больше, чем она есть на самом деле, возникает по нескольким причинам, действующим одновременно. Судя по всему, основная причина лунной иллюзии состоит в том, что вы сопоставляете низкую Луну с объектами ландшафта перед вами, и на фоне этих маленьких объектов Луна кажется больше. Вы можете легко избавиться от этой иллюзии: повернитесь на  $180^\circ$ , наклонитесь и посмотрите на Луну через просвет между ногами. Тогда вы увидите, что Луна приняла нормальные размеры. Вероятно, это происходит потому, что земная поверхность и предметы на ней, переместившиеся теперь в верхнюю часть вашего поля зрения, больше не используются вашим сознанием для масштабирования.



Рис. 7.1 / Задача 7.1

### 7.2 • ФОРМА НЕБА

Кажется ли вам, что небо имеет вид полусферы? Большинству людей небо по форме напоминает перевернутую суповую тарелку, и та его часть, которая находится над головой, кажется ближе тех, что лежат над горизонтом. Попробуйте провести следующие наблюдения. Когда на дневном небе появится месяц, мысленно проведите линию, делящую его пополам. Поскольку месяц виден только потому, что освещается солнечным светом, продолжение этой линии должно упираться прямо в солнце. Однако этого не происходит, поскольку ваше ощущение приплюснутости неба искажает линию, которую вы мысленно проводите по небу. Лучи прожектора прямые, но, когда вы смотрите на них сбоку, они кажутся изогнутыми из-за искаженного представления о форме неба. Почему небесный свод кажется нам приплюснутым?

**ОТВЕТ •** Мы воспринимаем форму неба в искаженном виде по многим причинам. Вот одна из них. Поскольку мы видим широкий открытый горизонт и между ним и нами много разных предметов, расстояние до неба над горизонтом нам кажется большим. А над нашей головой нет ничего, наши глаза находятся

в естественном, расслабленном состоянии, и нам кажется, что это расстояние меньше.

Иллюзия приплюснутости небесного свода может быть такой сильной, что лучи прожектора кажутся изогнутыми в соответствии с кривизной неба, а мысленно проведенная от луны линия не утыкается в солнце. И то и другое — оптические иллюзии.

### 7.3 • КАК «ОБЕЗГЛАВИТЬ» ЧЕЛОВЕКА С ПОМОЩЬЮ СЛЕПОГО ПЯТНА

В каждом глазу есть *слепое пятно*, в котором он ничего не видит. В нашем поле зрения оно занимает участок, смещенный на  $15^\circ$  от центра в сторону виска. Вы сами можете его обнаружить, водя перед собой вытянутой рукой с зажатым в ней маленьким предметом (скажем, ластиком на карандаше). Если вы будете смотреть вперед, не отводя взгляда, то, когда в поле зрения ластик пересечет слепое пятно, он «исчезнет».

Когда известному физиологу и психологу Карлу Лешли приходилось принимать у себя за обедом докучливого гостя, он развлекался тем, что наводил свое слепое пятно на лицо гостя, аккуратно «лишая» того головы. Существует старинная легенда (скорее всего, выдуманная) про английского короля Карла II Стюарта, тоже якобы любившего развлекаться, визуальное обезглавливая своих гостей. Ирония в том, что его собственный отец был обезглавлен по-настоящему, а не визуально.

Какие размеры имеет это пятно и почему оно слепое? Почему это слепое пятно мы обычно не замечаем?

**ОТВЕТ** • Сетчатка сплошь покрыта *фоторецепторами* — палочками и колбочками, кроме того участка, где нервные волокна выходят из сетчатки и направляются в мозг. Это пятно не содержит рецепторов и потому «слепое». Как правило, слепое пятно не ощущается по нескольким причинам. Обычно оба глаза открыты, так что, когда изображение объекта попадает в слепое пятно одного глаза, его видит другой глаз. Кроме того, вы концентрируетесь на объектах, находящихся в центральной части поля зрения, а эта область проецируется на центральную ямку на сетчатке (*фовеа*), дно которой выстлано колбочками максимально плотно, а не на слепое пятно. Некоторые детали изображения, попадающие на слепое пятно, восстанавливаются за счет постоянных самопроизвольных синхронных микродвижений глазных яблок (саккад), при которых глаз поворачивается примерно на градус. Наконец, мы

не всегда фиксируем глаз, и когда он сдвигается, изображение, сначала попавшее на слепое пятно, затем смещается на какое-то другое место сетчатки. Даже если бы все эти движения глаз отсутствовали, слепое пятно все равно было бы заполнено, поскольку мозг способен замещать недостающую часть изображения, «сшивая» картинку по обеим сторонам от слепого пятна.

### 7.4 • СЕРАЯ СЕТКА ПО УТРАМ, ЛЕТАЮЩИЕ ТОЧКИ ДНЕМ

Если вы утром откроете глаза в залитой солнцем комнате, ваше поле зрения будет покрыто серой сеткой. Эта сетка быстро исчезает, но ее можно искусственно воссоздать с помощью маленького фонарика или освещенного маленького отверстия — пинхола (не забывайте беречь глаза от яркого света). В темной комнате обведите фонариком по периметру поля зрения, и появятся фрагменты сетки. Что это за сетка и почему она так быстро тает?

Похожий эффект можно наблюдать в солнечный день. Когда я смотрю на голубое небо, в поле моего зрения проплывает множество пятнышек (которые мы обсудим в следующей задаче). Кроме того, перед глазами летают яркие точки с темными хвостами, и частота их появлений совпадает с частотой моего пульса. Они быстрее двигаются в систолической (при расширении сердца) и медленнее в диастолической (при сокращении сердца) фазе. Голубой свет их усиливает. Они видны везде за исключением линии зрения (эта линия упирается в центральную ямку на сетчатке). Что это за точки? Почему лучше всего они видны на голубом фоне? И почему их нет на линии, идущей из центральной ямки?

**ОТВЕТ** • Сетка образуется тенью, отбрасываемыми кровеносными сосудами на сетчатку, когда сосуды перекрывают свет и он не попадает на фоторецепторы, расположенные под ними на большей глубине внутри сетчатки. Точки — это белые кровяные тельца, движущиеся по кровеносным сосудам. Голубой цвет дает лучший контраст, поскольку красные клетки крови (эритроциты) поглощают свет на длине волны примерно 415 нм (голубой свет), а белые клетки крови его не поглощают. Поэтому движение белых кровяных телец на голубом фоне становится более заметным. Ни сетка, ни точки не появляются в области центральной ямки сетчатки, потому что там нет кровеносных сосудов.

Поскольку контраст любого изображения, появляющегося на сетчатке, в течение нескольких секунд

ослабевает, сетка быстро исчезает. При движении через поле зрения небольшого источника света тени, отбрасываемые кровеносными сосудами, постоянно смещаются, и сетка остается видимой.

Когда выяснилось происхождение сетки, образующейся на сетчатке при освещении поля зрения светом, выходящим из крошечного отверстия, ученые смогли объяснить и загадочные наблюдения Венеры, сделанные астрономом Персивалем Лоуэллом, который постоянно видел некие «каналы» на поверхности планеты. Более того, эти каналы всегда находились в одном и том же месте, из чего следовало, что Венера всегда повернута к Земле одной и той же стороной, что выглядело весьма странным. Так вот, «спицы», которые наблюдал Лоуэлл, были, по-видимому, тенью кровеносных сосудов на сетчатке глаза Лоуэлла. Он наблюдал Венеру через маленький окуляр, что было эквивалентно наблюдению через крошечное отверстие: Лоуэлл мог видеть Венеру, но на ее изображение накладывалась сетка на сетчатке его глаз.

## 7.5 • МУШКИ И ДРУГИЕ ПЯТНА В ГЛАЗУ

Когда я смотрю на безоблачное небо или какой-нибудь другой яркий ровный фон, в моем поле зрения появляется всякий мусор — маленькие пятнышки и летающие точки. Точки рассматривались в предыдущей задаче, а в этой мы рассмотрим маленькие плавающие пятнышки, каждое из которых образовано концентрическими кругами. Но иногда я вижу и большие вытянутые структуры, например, одна такая структура в моем правом глазу часто мешает мне читать этим глазом.

*Мушки*, как их называют, более заметны, если глаз освещается небольшим источником света. Например, я в качестве такого источника обычно использую крошечное отверстие, проделанное в непрозрачном картоне. Однако можно использовать любые маленькие источники света, например хорошо отражающую скрепку для бумаги. (Кстати, я всегда осторожен, поднося любые предметы близко к глазу.)

Когда я использую для наблюдений крошечное отверстие, то замечаю еще несколько любопытных особенностей: появляются яркие крапинки, в которых нет концентрических кругов, как в обычных мушках. Иногда я вижу темные крапинки и неподвижный узор из линий, разбегающихся от центра поля зрения. Сразу после того, как глаз моргнет, я вижу яркие пятна и узор из светлых и темных горизонтальных линий. Иногда я вижу еще и стационарные яркие пятна или

плавающие «обрывки» неправильной формы. Открывая глаза утром, я могу увидеть одно или несколько пятен, гораздо более темных или (что реже) более светлых, чем остальное поле зрения.

Откуда берутся все эти зрительные помехи?

**ОТВЕТ** • Появление мушек обычно связано с неоднородностью *стекловидного тела глаза* (прозрачного вещества, заполняющего почти весь объем глазного яблока). Вы не можете увидеть сами нарушения однородной структуры и даже их тень на сетчатке, но можете различить дифракционную картину, вызываемую ими на сетчатке. Дифракция — тип интерференции, которой световые волны подвергаются при прохождении через маленькое отверстие или при огибании маленького препятствия. Когда свет из отверстия падает на неоднородный участок стекловидного тела, он дифрагирует, в результате на сетчатке появляется интерференционная картина, которая состоит из концентрических полос в тех местах, где световые волны усиливают друг друга, и темных полос в тех местах, где они гасят друг друга.

Если участок другой плотности почти круглый, получаются интерференционные кольца с центральным пятном. Если же он удлиненный, он дает интерференционную картину в виде вытянутых фигур. Мушки, которые мы обычно видим, — это размытая дифракционная картина. Если смотреть через маленькое отверстие, интерференционная картина будет более четкой, и темные и светлые полосы станут различимыми. Мушки перемещаются через линию зрения потому, что стекловидное тело — не жесткая структура и неоднородности могут сдвигаться.

Некоторые мушки могут возникнуть из-за того, что кусочки стекловидного тела оторвались и плавают в жидкости напротив центральной ямки на сетчатке, в которую упирается линия зрения (*фовеа*). Они могут также появляться из-за микрокровоизлияний в жидкий слой, но тогда поле зрения должно слегка окраситься в красный цвет. Все видят мушки, и это не обязательно связано с медицинскими проблемами. С возрастом человек обычно видит больше мушек.

Яркие точки и узоры из светлых и темных полос, возникающие после того, как глаз моргнет, объясняются тем, что на роговице остается жидкая (слезная) пленка, а на неоднородностях этой пленки световые лучи могут слегка сфокусироваться, и на роговице появятся более яркие области. Линии, расходящиеся

от центра поля зрения, могут быть вызваны радиальной структурой хрусталика. Темные точки могут возникать из-за небольших непрозрачных включений в хрусталике. Происхождение темных и светлых пятен, которые люди порой видят, как только открывают глаза утром, неизвестно.

### 7.6 • ОРЕОЛЫ ВОКРУГ УЛИЧНЫХ ФОНАРЕЙ, ГОРЯЩИХ СВЕЧЕЙ И ЗВЕЗД

Если ночью смотреть прямо на источник яркого света, вокруг него можно увидеть кольца (гало). Если смотреть на него сквозь окно, на котором выступил конденсат, появится другая система колец. Диаметры первых пяти колец (если измерять в градусах дуги) в поле вашего зрения могут быть равны, например,  $2,5^\circ$ ,  $4,5^\circ$ ,  $5,5^\circ$ ,  $6,0^\circ$  и  $9,0^\circ$ . Кольца имеют больший размер в красном свете, чем в голубом. Так что если источник испускает белый свет, кольца могут быть окрашены в красный с наружной стороны и голубой с внутренней. Почему появляются кольца?

На некоторых картинах Винсента Ван Гога вокруг источников света изображены кольца: такие кольца вокруг солнца можно увидеть на картине «Красные виноградники в Арле», а вокруг звезд — на картине «Звездная ночь». Одна из причин, почему художник изобразил на картине кольца, — желание создать у зрителя впечатление светящихся объектов. Однако говорят, что художник действительно видел эти кольца, поскольку его зрение было нарушено приемом дигиталиса в небезопасных дозах.

Почему вокруг пламени свечи, если смотреть на него в темной комнате, виден светящийся ореол? Известно, что звезды мерцают из-за турбулентности атмосферы, но почему когда мы смотрим на них, то обычно видим, как от них по радиусам расходятся яркие лучи?

**ОТВЕТ** • Кольца вокруг источников яркого света, образующиеся при дифракции света на маленьких неоднородностях внутри глаза, называются *эптопическим гало*. Дифракция возникает, когда световые волны на пути к сетчатке обходят маленькое препятствие и складываются в картину, состоящую из ярких и темных концентрических колец вокруг яркого центрального пятна. Светлые области — там, где световые волны усиливают друг друга, а темные — там, где гасят друг друга. Центральное световое пятно неразлично, поскольку оно накладывается на гораздо более яркое

изображение самого источника света. Но первое светлое кольцо увидеть можно, его угловой размер зависит от структуры неоднородности, на которой свет дифрагировал, и от расстояния от этой неоднородности до сетчатки: чем меньше неоднородность и чем больше расстояние до сетчатки, тем больше радиус кольца.

Если видно несколько колец, значит, дифракция возникла на нескольких неоднородностях с разными размерами и разными расстояниями до сетчатки. Никто точно не знает, какая именно неоднородность привела к дифракции. Это могли быть клетки эпителия роговицы (их размеры лежат в диапазоне 10–40 микрон), клетки эндотелия роговицы, царапины на роговице или волокна хрусталика.

Дифракция света внутри глаза ответственна и за появление слабого светящегося ореола вокруг пламени свечи, и за яркие, расходящиеся от звезды или другого маленького, яркого, очень далекого объекта лучи. Эти дифракционные картины, возможно, появляются из-за нерегулярностей в швах, соединяющих волокна, на передней поверхности хрусталика.

### 7.7 • ФОСФЕНЫ — ПСИХОДЕЛИЧЕСКИЕ КАРТИНКИ

Иногда заключенных в темных камерах посещают яркие световые видения — красочные или испещренные цветными пятнами картины, называемые *фосфенами*. Водители-дальнобойщики тоже, случается, видят такие картины, если перед тем они долго смотрели на заснеженное полотно дороги. На самом деле, когда в поле зрения долго не попадают никакие объекты, всегда возникают фосфены.

Головные боли (мигрени) и некоторые галлюциногенные препараты также могут вызывать фосфены. Подобные картины могут возникать, если человек (точнее, его голова) ускоренно движется. Об этом рассказывают пилоты и космонавты. Фосфены можно при желании вызвать, слегка надавив на закрытое веко. (Не давите сильно, чтобы не повредить глаза, и никогда не надавливайте на веки, если носите контактные линзы!)

Фосфены могут появляться, когда человек смотрит на мигающий свет, например от стробоскопа на рок-концерте или в танцевальном клубе. Когда я смотрю на стробированный свет, мерцающий с частотой от 10 до 30 раз в секунду, перед глазами начинают мелькать живописно раскрашенные геометрические узоры. (Ради безопасности я закрываю глаза, когда смотрю на стробоскоп: свет такой яркий, что он проходит и через веки.) Иногда я вижу узор в виде шахматной



доски с квадратами, иногда — в виде шестиугольников или треугольников. При медленных миганиях фосфены имеют вид завитков. Они исчезают, если частота миганий увеличивается. Чтобы увидеть сложные геометрические картины, должны освещаться оба глаза. Если освещается только один глаз, возникают простые картины, составленные из линий и завитков.

Согласно некоторым литературным источникам, фосфены могут возникать, если через голову пропустить слабый электрический ток. Я никогда не пробовал проводить этот опасный эксперимент, и вы не должны этого делать. В XVIII веке фосфеновые вечеринки были в большой моде (однажды на такую вечеринку зашел даже Бенджамин Франклин). Люди становились в круг и брались за руки, после чего к крайним в цепочке прикладывалось высокое напряжение от электростатического генератора, который мог генерировать лишь весьма слабый ток. Каждый раз, когда цепь замыкалась и через них шел ток, они видели фосфены.

Еще более экстравагантными и весьма опасными были опыты психолога Йоханнеса Пуркинье, проведенные им над самим собой в 1819 году. Один электрод он прикладывал ко лбу, а другой вставлял в рот и периодически разрывал соединение, так что через его голову проходили импульсы тока, вызывавшие фосфеновые картины. (Никогда не повторяйте подобные эксперименты: при разрыве цепи даже низковольтного источника может генерироваться высокое напряжение, если нагрузка индуктивная; для этого эффекта в электротехнике есть даже специальное название — «экстратоки размыкания».)

Как образуются фосфены?

**ОТВЕТ** • Когда вы надавливаете на закрытое веко, стекловидное тело, заполняющее глазное яблоко, давит на сетчатку или нервные окончания, посылая в мозг сигналы, как при попадании в глаз света. Таким образом, человек может воспринимать свет, даже когда свет в его глаз не попадает.

Фосфены появляются и когда вы смотрите на мерцающий свет. Более сложные геометрические узоры возникают, когда свет падает на оба глаза. Значит, эти картины рождаются в результате обработки мозгом сигналов, полученных от обоих глаз. Геометрические узоры возникают из-за того, что нервные сигналы активируют в головном мозге участки, отвечающие за восприятие линий и форм. Цветные фосфены возникают, когда активируются участки мозга, отвечающие

за цвета. Таким образом, цвет воспринимается не только когда свет, идущий от цветных предметов, воздействует непосредственно на колбочки-фоторецепторы, расположенные на сетчатке. Не исключено, что прерывистый свет каким-то образом соответствует кодировке, отвечающей в головном мозге за цвета. Если это так, то прерывистый белый свет может возбудить цветные картины. Но все-таки вероятнее, что цветные фосфены появляются из-за взаимодействия нервных волокон в сетчатке и нервных волокон, идущих к мозгу.

Фосфены, возникающие при пропускании тока, могут быть следствием прямого воздействия на мозг. Некоторые незрячие люди могли бы обрести зрение, если в оправу очков вмонтировать миниатюрную видеокамеру, посылающую сигналы в микропроцессор, который обрабатывал бы изображение и посылал слабые сигналы прямо в мозг. Например, если бы камера обнаружила объект в левой половине поля зрения, мозг следовало бы простимулировать так, чтобы фосфен воспринимался в левой части поля зрения. Таким образом, окружающая действительность передавалась бы с помощью фосфенов, и незрячий человек смог бы в определенном смысле «прозреть».

Не исключено, что в наскальных рисунках времен палеолита, обнаруженных в пещерах и на стоянках доисторических людей, нашли свое отражение фосфены, рожденные под влиянием галлюциногенов. Они могли быть частью чьих-то видений (возможно, шамана, впавшего в транс) и воспринимались как проявление высших сил, которые, как полагали древние, правят миром.

## 7.8 • ЖУЖЖАНИЕ И СТРОБОСКОПИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Если пожужжать на определенной частоте, можно «остановить» вращение пропеллера самолета или лопастей вентилятора. Эта иллюзия вызвана стробоскопическим эффектом. Если жужжать на частоте чуть более низкой, чем частота вращающегося объекта, стробоскопическая картина будет медленно вращаться в том же направлении, а если на чуть более высокой — в противоположном направлении.

Если пожужжать, глядя в то же время на телевизионный экран с достаточно большого расстояния, можно получить тот же эффект остановки движения. Жужжание приводит к появлению линий на экране — стационарных при одной частоте жужжания и движущихся вверх или вниз при слегка измененных частотах. Этот эффект имеет место только при образовании

изображения из отдельных строк, как это делалось при использовании в телевизорах вакуумных кинескопов. С современным телевизором, имеющим плазменный или жидкокристаллический экран, это не получится — у них изображение формируется иначе.

Чтобы понять, как жужжание влияет на зрение, я сделал бумажный шаблон и поместил его на диск проигрывателя для виниловых пластинок. Шаблон состоял из чередующихся белых и черных секторов, расширяющихся от центра к периферии, угол каждого сектора составлял  $1^\circ$ . Я осветил шаблон солнечным светом (освещение люминесцентной лампой не годится — она светит мигающим светом), включил проигрыватель, и он стал вращаться, делая 33,3 оборота в минуту (частота вращения проигрывателя для виниловых пластинок). Поскольку я не мог все время жужжать на определенной фиксированной частоте, я прижал подбородок к маленькому динамику, который колебался с частотой 100 Гц (он питался от звукового генератора). И когда я включил звуковой генератор, вместо вращающегося на поворотном столике шаблона застыло размытое тусклое его изображение — эту иллюзию остановки движения вызвал стробоскопический эффект. Почему в этом и других примерах колебания (динамика, подключенного к звуковому генератору, или голоса при жужжании) «останавливают» вращение?

**ОТВЕТ •** Жужжание или дрожание головы, прижатой к работающему динамику, — все это вызывает периодические движения глаз в вертикальном направлении. Если эти колебания происходят на правильной частоте, изображение на сетчатке предмета, движущегося через поле зрения, остается в одном и том же положении в течение большей части колебательного цикла движения глаза.

Допустим, я смотрю на опускающуюся в поле моего зрения секцию шаблона, стоящего на поворотном столике. В это время мой глаз тоже опускается при колебаниях динамика, так что секция продолжает проецироваться на ту же самую часть сетчатки моего глаза и потому кажется неподвижной. Когда глаз начинает двигаться вверх, изображение секции сдвигается по сетчатке, но только на короткое время. Очень быстро исходное изображение черно-белого шаблона опять возвращается на прежнее место на сетчатке. Моя зрительная система усредняет яркость изображения за период колебаний. Участки сетчатки, на которых в течение большей части периода колебаний

проецируются освещенные участки шаблона, воспринимаются как яркие. Те места, на которых большую часть периода попадают изображения темных частей шаблона, воспринимаются (по контрасту с яркими) как темные. Таким образом, черно-белый шаблон кажется неподвижным.

Изображение на экране телевизора создается горизонтальной разверткой: электронный луч пробегает строку за строкой от верхнего края экрана к нижнему. Обычно затухание яркости каждой строки незаметно из-за большой скорости развертки и инерционности зрения. Когда я начинаю жужжать на соответствующей частоте, движения моего глаза за счет стробоскопического эффекта останавливают развертку. В течение всего периода колебаний на моей сетчатке отпечатывается темная горизонтальная линия — это образ линии на экране, когда старое изображение уже исчезло, а новое еще не появилось. Поэтому на экране я постоянно вижу темную линию.

## 7.9 • КАК УСЛЕДИТЬ ЗА ЛЕТАЩИМ БЕЙСБОЛЬНЫМ МЯЧОМ

Знаменитый Тед Вильямс, один из лучших бэттеров (отбивающих) в истории бейсбола, утверждал, что может разглядеть, как брошенный питчером мяч ударится о его биты. Другие бейсболисты утверждали, что видят швы на мяче и его вращение в тот момент, когда он летит на них. Правда ли, что игроки успевают разглядеть эти детали? Следит ли игрок взглядом за мячом, начиная с момента удара по нему питчером и до момента, когда он либо пролетит за пластину «дома», либо по нему ударят битой?

Обязательно ли у игрока должны быть два нормально видящих глаза, чтобы играть в бейсбол? Конечно бы, да. Как же тогда игроки, у которых работает только один глаз, могли определять траекторию мяча и расстояние до него? И как человек, у которого видит только один глаз, может чувствовать глубину поля зрения при вождении автомобиля или управлении самолетом? Например, для посадки самолета, безусловно, требуется объемное зрение, хотя знаменитый пилот Вилли Пост видел только одним глазом.

**ОТВЕТ •** Предположим, профессиональный бэттер, стоя у «дома», должен отбить мяч битой, держа ее в правой руке. Чтобы следить за летящим к «дому» мячом, он должен быстро поворачивать свою линию зрения в правую сторону от питчера. Большинство игроков

могут делать это до тех пор, пока мяч не окажется на расстоянии примерно 1,7 м от пластины «дома», после чего скорость требуемого поворота уже должна быть слишком большой для обычного игрока. Однако он все же сможет увидеть, как бита ударяет по мячу, если правильно рассчитает, где произойдет их встреча, и скачком переведет линию зрения в эту точку. Тед Вильямс, видимо, умел это делать.

Есть еще один фактор, помогающий проследить за полетом мяча. Очевидно, система зрения способна определять направление движения объекта, даже если не может определить его положение. Эта способность является важным фактором выживания: обычно можно определить, движется ли объект к вам, даже если нельзя сказать точно, где в каждый данный момент он находится. Движущийся предмет воспринимается и в том случае, если видит только один глаз. Люди, у которых функционирует единственный глаз, могут играть в спортивные игры и пилотировать самолеты, но, если видят оба глаза, мозг может сравнить относительные движения, воспринимаемые каждым глазом. Например, если правый глаз видит, что движущийся объект смещается влево, а левый — что вправо, это значит, что объект движется прямо на вас.

### 7.10 • ИМПРЕССИОНИЗМ

Для стиля импрессионизма в живописи характерна определенная техника: краска накладывается отдельными мазками так, что объекты и фон теряют четкость очертаний. Импрессионисты часто работали на пленэре. Основатель этого направления Клод Моне знаменит своими пейзажами и сценами под открытым небом. Со временем в его картинах начали преобладать теплые, красные и желтые, цвета, а холодные цвета противоположного края спектра постепенно исчезали. Хотя импрессионизм, безусловно, является ярким художественным течением, мог ли он возникнуть в силу каких-то физических или физиологических причин? Чем объясняется смена цветовой гаммы на картинах Моне?

**ОТВЕТ** • Многие представители этого направления имели дефекты зрения. Некоторые из них страдали близорукостью, то есть изображаемые объекты они видели расплывчатыми. Именно такими — размытыми и туманными — и предстают перед нами образы на полотнах импрессионистов. Известно, что по крайней мере один художник-импрессионист, работая, ставил холст на расстоянии вытянутой руки, чтобы он

тоже был не в фокусе. У других, например Моне, была катаракта (помутнение хрусталика), которая мешала видеть дальше нескольких метров. Вероятнее всего, это была ядерная катаракта, которая поглощает цвета, относящиеся к синему концу спектра, и пропускает желто-красный свет, что объясняет преобладание желто-красного цвета в его более поздних работах. После хирургической операции по удалению катаракты Моне, взглянув на свои прежние желто-красные картины, пришел в ужас и грозился уничтожить или переписать их.

### 7.11 • ПУАНТИЛИСТИЧЕСКИЙ СТИЛЬ В ЖИВОПИСИ

Пуантилистические картины, такие как полотно Жоржа Сёра «Воскресный день на острове Гранд-Жатт», написаны не обычными мазками, а маленькими разноцветными точками. Если вы подойдете к картине вплотную, то сможете разглядеть точки, но по мере того, как вы будете отходить от нее все дальше, точки постепенно сольются, и в какой-то момент их уже невозможно будет различить. Более того, цвет, который вы видите в любом месте картины, может измениться, когда вы отойдете от полотна. Что вызывает это изменение цвета?

**ОТВЕТ** • Когда свет проходит через круглый зрачок, он дифрагирует, то есть лучи отклоняются от прямолинейного направления, и образуется интерференционная картина. Если смотреть на точечный источник света, из-за дифракции на сетчатке образуется круглое изображение этого источника. Если вы рассматриваете два соседних источника света, каждый из них пытается сформировать собственное круглое изображение, но, если источники расположены слишком близко, изображения перекроются, и вы сможете увидеть только изображение слившихся источников. Таким образом, расстояние между источниками, при котором начинают перекрываться их изображения, — это ваш предел разрешения двух источников света как отдельных точек.

Две соседние цветные точки в пуантилистической картине служат двумя источниками света. Предположим, что это точки разного цвета. Если вы стоите прямо перед картиной, точки расположены достаточно далеко друг от друга, на сетчатке формируются отдельные их изображения, и вы видите истинные цвета точек. Когда вы отодвигаетесь от картины, изображения точек в какой-то момент начинают перекрываться, и вы уже не можете их различить. Цвет, который мозг

создает в сознании, является результатом *аддитивно-го* сложения цвета точек, когда складываются потоки излучения, идущие от отдельных точек. Предположим, что пурпурная (смесь синего с красным) точка расположена рядом с желтой точкой. Комбинация этих двух цветов (пурпурного и желтого) воспринимается как розовая. Таким образом, художник-пуантилист использует нашу зрительную систему для создания цветовой гаммы своей картины.

Традиционная картина маслом обычно более темная, чем та, что написана точками, потому что ее цвет зависит от смеси красок в масляном слое, причем каждая краска поглощает часть излучения (*субтрактивное* сложение цветов). Свет должен пройти сквозь этот слой, отразиться, а затем пройти через слой обратно, чтобы попасть в глаза. Когда в слой краски добавляется больше красителя, свет, выходящий из картины, становится менее ярким. Поскольку в пуантилистической картине цвета смешиваются в вашем мозге, а не на холсте, свет при отражении от такой картины меньше теряет в яркости.

Многие цветные поверхности (например мозаика, окрашенные ткани, цветная печать на бумаге и экраны цветных мониторов) — это массив разноцветных точек. В традиционной теории цвета все возможные цвета получаются смешением трех основных цветов (красного, синего и зеленого). Поэтому цветной монитор содержит точки этих трех цветов. Различные цвета получаются из этих трех цветов с помощью управления яркостью каждой точки.

### 7.12 • МУАРОВЫЕ УЗОРЫ

Когда сетка с мелкими ячейками накладывается на структуру с похожим периодическим рисунком, можно увидеть более крупный узор, называемый *муаровым узором*. Я наблюдаю муаровые узоры, когда кусок шелковой ткани накладывается на другой кусок шелка или когда один забор из штакетника стоит за параллельным ему забором из штакетника. Я вижу их и в узорах, образованных круглыми отверстиями. Когда один из таких узоров сдвинут вперед на несколько сантиметров относительно другого такого же узора, в этой системе возникает круговой муаровый узор. Откуда возникают муаровые узоры?

**ОТВЕТ** • Муаровые узоры возникают из-за периодичности наложенных друг на друга структур. Рассмотрим, например, два параллельных забора из штакетника,

стоящих на некотором расстоянии друг от друга. Свет падает на них сзади. В некоторых точках просветы между планками совпадут в вашем поле зрения, и вы будете видеть освещенные просветы. В других точках планки будут перекрывать свет, и вы будете видеть темные области. Там, где перекрытие будет неполным, просветы будут узкими. Система этих ярких и темных участков и есть муаровый узор, который мы видим на заборах — повторяющееся чередование светлых и темных полос по длине забора. Если один из заборов слегка сдвинуть, меньше чем на расстояние между двумя соседними планками, сдвиг муарового узора будет заметным, что усилит ощущение от фактического сдвига забора.

Лучшее объяснение того, почему муаровые узоры производят подобное впечатление, состоит в том, что наша зрительная система особенно чувствительна к пересечению линий и фиксирует взгляд на этих пересечениях. Из-за этой чувствительности становятся заметными даже малые смещения пространственно-периодических структур, образующих муаровые узоры.

Кроме того, широкие темные и светлые полосы муарового узора более заметны, нежели исходные периодические структуры, а перемещение этих муаровых полос оказывается значительно более быстрым, нежели движение исходных структур. Поднесите расческу к зеркалу и убедитесь в этом сами.

### 7.13 • ОП-АРТ

Когда вы рассматриваете картину, выполненную в технике *оп-арта* (сокращение, введенное в 1964 году для обозначения «оптического искусства», которое использует оптические иллюзии), статическое изображение линий или пятен создает иллюзию их движения, как будто части композиции качаются, крутятся или периодически вспыхивают и гаснут. Картины оп-арта могут также создать иллюзию перетекания краски от одного участка картины к другому. Как возникают эти иллюзии?

**ОТВЕТ** • Никто не может как следует объяснить причину этих иллюзий. Их до сих пор пытаются понять, каталогизировать и сравнить. Для художника — это доказательство того, что новые открытия могут породить новые формы искусства. Для физиолога — это возможность понять то, как работает зрительная система и мозг.

Зрительная система может сохранить образ увиденного в форме *остаточного изображения* (*послеобраза*). Глаз совершает небольшие прыжки, *саккады*,



при которых видимая картина слегка меняется. Когда вы смотрите на картину в технике оп-арта, на которой изображены геометрические объекты, остаточные изображения от последовательных саккад могут в сознании накладываться друг на друга. Но поскольку остаточные изображения слегка отличаются, начинает казаться, что они движутся. Иллюзия эта трудноуловимая, и вы можете не осознавать, что это иллюзия, вы просто чувствуете, что картины оп-арта отличаются от статических изображений геометрических фигур.

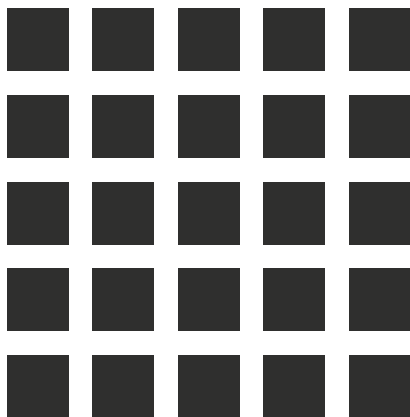


Рис. 7.2 / Задача 7.13. Решетка с появляющимися и исчезающими темными пятнами на пересечениях белых линий.

Некоторые геометрические узоры создают иллюзию присутствия светлых и темных пятен в местах, где этих пятен нет. Например, на решетке, изображенной на рис. 7.2, можно заметить появляющиеся и исчезающие темные пятна на пересечениях светлых линий. Это так называемые *индуцированные пятна*. Причина появления этих пятен не совсем понятна, но, возможно, она связана с тем, что фоторецепторы одной части глаза взаимодействуют с фоторецепторами соседней части глаза. Позже мы проиллюстрируем этот эффект на примере полос Маха. В некоторых цветовых узорах могут появиться индуцированные цветные полосы или пятна (*неоновый эффект*), указывая на то, что взаимодействие включает передачу сообщений о цвете от глаз к мозгу.

#### 7.14 • ЭФФЕКТ ГЛУБИНЫ НА КАРТИНАХ, НАПИСАННЫХ МАСЛОМ

Художники фламандской школы живописи XV века достигли исключительного мастерства в создании иллюзии глубины в масляной живописи с помощью *глазури* — нанесения на полотно тонких прозрачных слоев краски. Почему некоторые детали картин кажутся нам

ближе, чем другие, и почему краска кажется нанесенной не на поверхность картины, а внедренной во внутренние слои картины?

**ОТВЕТ** • Часть света, попадающего на такой фрагмент картины, отражается от внешней поверхности глазури, а остальная его часть проходит сквозь все слои краски (рис. 7.3). Красители, растворенные в глазури, рассеивают свет наружу и внутрь. Любой свет, прямой или рассеянный, который достигает задней поверхности, отражается от белого (непрозрачного) холста. Когда свет снова проходит через глазури в обратном направлении, он снова может рассеяться на красителях. Когда к вам приходит отраженный свет от картины, вы воспринимаете и ту его часть, которая отражается от внешней поверхности глазури, и часть, отраженную от красителя в глазури. Цветовые пятна кажутся лежащими за этой внешней поверхностью, особенно когда вы смотрите на картину обоими глазами, так что их конвергенция на цветном пятне позволяет увидеть пятно в глубине картины.

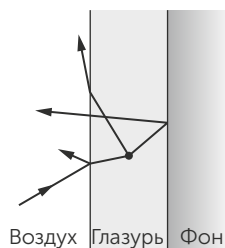


Рис. 7.3 / Задача 7.14. Картина маслом с глазурию. Свет рассеивается на передней и задней поверхностях, а также на красителе, входящем в состав глазури.

Художник может варьировать насыщенность цвета (или блеск), накладывая более одного слоя глазури с одинаковыми красителями. Каждый дополнительный слой делает цвет, создаваемый красителем, более насыщенным, потому что в этом слое возникает дополнительное рассеяние. Например, если краситель рассеивает свет с синей длиной волны больше, чем свет с другими длинами волн, то дополнительные слои, содержащие тот же краситель, усиливают синий цвет на картине.

Часто на полотно для защиты наносится слой лака. Этот слой не содержит красителей и не усиливает ощущение глубины изображения. Наоборот, частичное поглощение света в нем обычно ухудшает впечатление от картины, приглушая цвета и даже делая неразличимыми некоторые оттенки.

### 7.15 • ЧТЕНИЕ В ТЕМНОТЕ

Самое поразительное остаточное изображение (послеобраз), которое я видел, возникало после яркой вспышки в темной комнате. Я клал открытый журнал перед собой, а затем выключал свет. После того как мои глаза привыкали к темноте (около 10–15 минут), я устанавливал фотоаппарат со вспышкой рядом с головой и освещал пространство перед собой одиночной вспышкой. Вспышка была слишком яркой, чтобы я мог различить текст или рисунок в момент вспышки.

Если я не отводил взгляд в то время, пока слепящий свет гас, передо мной появлялось четкое изображение журнальной страницы, как будто она освещалась постоянным ярким светом. То, что я видел, — это, как говорят, *послеобраз-позитив*, поскольку светлые части журнальной страницы кажутся белыми, а темные — черными. Фотографии, рисунки и размер абзацев были легко различимы, я даже мог прочитать слова, хотя ничего из этого я не мог заметить во время вспышки. Примерно через 15 секунд послеобраз из позитивного превращался в *негативный*, в котором черное и белое менялись местами.

Если я включал вспышку дважды, я видел два наложенных послеобраза-позитива. Если я бросал монету во время вспышек, я видел два изображения монеты в разные моменты ее падения, как будто я рассматривал стробоскопическую фотографию. Иногда позитивный послеобраз может быть странным. Если я включал вспышку, когда моя рука находилась передо мной, а затем отводил руку за спину, я видел изображение моей руки в прежней позиции и при этом чувствовал ее присутствие за спиной. Если я включал вспышку, стоя и глядя в пол, а затем приседал на корточки, я видел далекое изображение пола, но по положению своего тела я знал, что пол должен быть ближе.

Однажды я увидел позитивный послеобраз на балетном спектакле. Во время перерыва я сидел с закрытыми глазами. Когда началось второе действие, я на мгновение открыл глаза и увидел поток яркого света. Как только я снова их закрыл, передо мной возникло изображение танцоров на сцене.

Я вижу похожие послеобразы, когда просыпаюсь в хорошо освещенной комнате. Когда я лежу с закрытыми глазами, я вижу только красный свет, пробивающийся сквозь мои веки. Я подношу руку к лицу, а затем на короткое время открываю глаза. Когда я их опять закрываю, я вижу послеобраз сначала в виде негатива, а затем — позитива. Если же я открою глаза

на несколько минут, чтобы они успели привыкнуть к свету в комнате, я уже не могу добиться этого эффекта.

Эти разные позитивные послеобразы появляются, если я не отвожу взгляд, но сразу же стираются, если я двигаю глазами относительно головы. Как образуются *послеобразы-позитивы* и как образуются *послеобразы-негативы*?

**ОТВЕТ** • Причина появления позитивного послеобраза не вполне понятна. Возможно, мозг просто не успевает за время вспышки (это около миллисекунды) обработать информацию. Но кратковременная мощная вспышка света инициирует все необходимые фотохимические процессы в фоторецепторах, а потом мозг «не спеша» обрабатывает все сигналы. Появление следующего за позитивным негативного послеобраза, вероятно, связано с усталостью зрительной системы. Сильнее устают те группы фоторецепторов, которые сильно возбуждались ярким освещением, и изображения в этих местах становятся более темными, чем в местах, которые слабо возбуждались.

### 7.16 • ЦВЕТНОЙ ПРИЗРАК СВЕТЯЩЕЙСЯ ТОЧКИ

Наблюдая за движением маленькой светящейся точки в темной комнате, можно увидеть остаточное изображение, сходное с позитивным послеобразом из предыдущей задачи. Выключите свет, откройте глаза и после того, как через несколько минут ваши глаза адаптируются к темноте, покрутите перед глазами точечный источник света. Вы увидите, что за ним с небольшой задержкой движется другая светящаяся точка-призрак, за которой тянется слабый светящийся след-хвост.

Если реальная светящаяся точка темно-красного цвета, «хвостатый» призрак не появляется. Если основная светящаяся точка желтая или желто-красная, призрак (и, возможно, его след) могут быть бледно-голубого цвета. Однако если ваши глаза полностью адаптировались к темноте (адаптация происходит за 10–15 минут), призрак и его след всегда бесцветные, серые. Почему появляется хвостатый призрак и чем объясняется его цвет? Почему за темно-красной светящейся точкой призрак не следует?

**ОТВЕТ** • Призрачный источник света и его хвост являются, скорее всего, послеобразами, создаваемыми палочками-фоторецепторами, когда они освещаются реальным перемещающимся источником света. Для того чтобы палочки, глазные нервы и мозг опять смогли

начать реагировать на свет, требуется некоторое не-большое время, поэтому в вашем сознании призрак появляется с задержкой. Если бы призрак возникал из-за инерционности зрения, этой задержки не было бы. Его хвост — это последовательность медленно затухающих послеобразов. Источник темно-красного света не создает послеобразов, поскольку чувствительность фоторецепторов в этой части спектра мала.

Почему призрак цветной, не совсем понятно, и этот вопрос редко обсуждается. Можно предположить, что это происходит из-за того, что сигнал от палочек взаимодействует с информацией о цвете, посылаемой колбочками, лежащими вдоль освещенного пути на сетчатке. Хотя считается, что палочки не могут посылать в мозг информацию о цвете, создается впечатление, что они способны блокировать информацию о цвете, идущую от колбочек. Когда желтый или желто-красный свет попадает на сетчатку, подавление информации о нем палочками приводит к тому, что он воспринимается как голубой — цвет, дополнительный по отношению к желтому. Подавление информации исчезает, когда глаз полностью настраивается на темноту. Тогда призрак кажется серым.

### 7.17 • ОТРАЖАЮЩИЕ ГЛАЗА

Узкий луч вашего фонарика пронизывает густую тьму. Внезапно в его луче возникает пара ярких огоньков, вы пугаетесь, но ваш страх исчезает, как только вы слышите ласковое мяуканье.

Почему глаза кошки кажутся светящимися, когда прямо на них направляется луч фонарика, но перестают светиться, едва она слегка отводит глаза? Почему на фотоснимках у человека иногда красные глаза?

У морского гребешка глаза состоят из хрусталика, толстой сетчатки и вогнутого зеркала, расположенного за сетчаткой. Его хрусталик — настолько слабо-выпуклая линза, что она лишь слегка преломляет световые лучи и, следовательно, не может сформировать изображение. Кроме того, в отличие от нашего глаза, хрусталик моллюска расположен вплотную к сетчатке, так что преломленным лучам негде пересечься и сформировать изображение. Как же изображение образуется в глазах гребешка? Зеркало — отличный отражатель, но как биологическая система может иметь отражающую поверхность, которая по качеству соперничает с современными металлическими зеркалами?

**ОТВЕТ** • За фоторецепторами в сетчатке кошачьего глаза находится слой, отражающий свет, который

потом идет обратно через рецепторы, так что у них появляется второй шанс этот свет поглотить. Эта удвоенная эффективность очень помогает выживать ночным бродягам. Когда вы посветите фонариком в глаза кошке, а кошка в этот момент посмотрит на вас, вы увидите часть света, отраженного от задней поверхности сетчатки ее глаз.

В глазу человека задняя поверхность сетчатки отражает не так хорошо, и когда в темноте ему в глаза светят фонариком, они не сильно светятся. Однако отраженный свет все же можно заметить на фотографиях, сделанных фотоаппаратом со вспышкой, если человек смотрит прямо в объектив.

Формирование изображения в глазу человека происходит в результате преломления световых лучей в роговице и хрусталике. А в глазах гребешков изображение образуется благодаря отражению света от вогнутого зеркала, расположенного за сетчаткой. Попадая в глаз гребешка, лучи света проходят через хрусталик и сетчатку, отражаются от вогнутого зеркала, фокусируются и формируют изображение внутри сетчатки глаза.

Это зеркало отличается от зеркала, висящего у вас в ванной. Оно образовано не единичным слоем отражающего вещества, а состоит из перемежающихся слоев цитоплазмы (с маленьким коэффициентом преломления) и кристалликов гуанина (с большим коэффициентом преломления). Толщина каждого слоя примерно равна четверти длины волны света. Из-за такой толщины каждого слоя и чередования коэффициентов преломления в слоях отраженные световые волны интерферируют, в результате изображение, образованное этой многослойной структурой, получается намного более ярким, чем при отражении от зеркала с однослойным покрытием. Однако это происходит только в узкой части спектра, а обычное зеркало отражает весь видимый спектр (инфракрасное излучение вдобавок).

### 7.18 • КАК ВИДЯТ ПОД ВОДОЙ ЛЮДИ, ПИНГВИНЫ И КРОКОДИЛЫ

Почему мы почти полностью теряем способность фокусировать свой взгляд под водой? Почему близорукие люди под водой видят лучше других? Почему, если человек наденет маску, у него восстанавливается способность фокусировать взгляд? Почему некоторые люди (например, мokeny, живущие в Мьянме и на западном побережье Таиланда) видят под водой прекрасно и без маски?

Пингвины живут на суше, но охотятся они под водой. Как они умудряются видеть и в воздухе, и под водой?

**ОТВЕТ** • На воздухе световые лучи в человеческом глазу фокусируются в основном за счет роговицы, а окончательная фокусировка происходит в глазном хрусталике, кривизной которого управляют мышцы. Когда вы погружаетесь под воду, фокусирующая способность роговицы теряется, поскольку оптические свойства материала глаза почти совпадают с оптическими свойствами воды, окружающей глаз. Поэтому, когда лучи проходят границу воды с глазом, они практически не преломляются. Преломление лучей в этом случае происходит лишь в хрусталике, но большинство из нас не может настолько сильно изменить кривизну хрусталика, чтобы он один сформировал четкое изображение на сетчатке. Однако мокены, которых называют морскими цыганами, натренировали свои глаза, чтобы видеть под водой. Они сужают зрачок, чтобы обрезать пучок лучей, попадающих в глаз, и как можно больше напрягают мышцы глаза, стараясь увеличить кривизну хрусталика. Оба эти действия позволяют получить достаточно четкое изображение на сетчатке. По мнению некоторых специалистов, любой человек может этому научиться.

У близоруких людей роговица и хрусталик слишком сильно преломляют световые лучи. В результате изображение формируется перед сетчаткой, и когда световые лучи от удаленного объекта добираются до сетчатки, они уже опять расходятся, и изображение становится размытым. Когда близорукий человек оказывается под водой, его роговица перестает преломлять свет и сфокусированное изображение приближается к сетчатке и, возможно, даже попадает на нее. Поэтому близорукий человек под водой может видеть лучше, чем человек с нормальным зрением.

Если дайвер наденет маску, перед глазами уже будет не вода, а воздух, поэтому преломление световых лучей на поверхности роговицы станет нормальным.

Роговица пингвина почти плоская. Поэтому, когда пингвин попадает из воздушной среды в водную, преломляющие свойства роговицы практически не изменяются. Зрение пингвина адаптировано к воде, поскольку там находится его пища: соответственно, его хрусталики имеют большую кривизну, благодаря чему световые лучи фокусируются на сетчатке. Находясь на суше, он может ослабить напряжение мышц, чтобы кривизна хрусталиков уменьшилась. Но они, вероятно, все еще слишком сильно преломляют лучи, и изображение на сетчатке остается размытым. Поэтому пингвин на суше, скорее всего, очень близорук. Однако он может уменьшить размытость изображения

на сетчатке, сузив зрачок, который превращается в маленькое отверстие. Маленькая апертура ограничивает расходимость лучей, идущих от освещенного объекта, и изображение объекта делается более четким.

Крокодилы хорошо видят на воздухе и плохо под водой. Как и люди, они не могут изменить кривизну хрусталика настолько, чтобы компенсировать уменьшение преломления роговицей. Но тем не менее крокодилы — искусные подводные охотники: кроме зрения, у них есть другие способы выслеживания добычи.

### 7.19 • ПОДВОДНОЕ ЗРЕНИЕ «ЧЕТЫРЕХГЛАЗЫХ» РЫБ

Странная рыба четырехглазка (*Anableps anableps*) плавает у самой поверхности воды, и ее глаза наполовину находятся под водой, а наполовину — над ней, так что она видит и под водой, и в воздухе. Как ее глаза могут фокусироваться одновременно и в воздушной, и в водной среде?

**ОТВЕТ** • Хрусталик этой рыбы имеет форму яйца, чтобы компенсировать маленький коэффициент преломления лучей, попадающих в глаз от подводных объектов. Свет, проходящий от надводных объектов, при попадании в глаз сильно преломляется роговицей, а потом еще немного преломляется выпуклой частью хрусталика, так что изображение надводных объектов оказывается в фокусе, когда оно попадает на нижнюю часть сетчатки глаза.

Свет, который приходит от подводных объектов, при попадании в глаз слабо преломляется на роговице, но очень большая кривизна этой части яйцевидного хрусталика приводит к тому, что лучи, идущие от подводных объектов, сильно преломляются и фокусируются на сетчатке в верхней части глаза. Фокусироваться им помогает и сравнительно большое расстояние между хрусталиком и верхней частью сетчатки.

### 7.20 • УЛЫБКА ЧЕШИРСКОГО КОТА

Установите зеркало так, чтобы одним глазом вы видели картину, которая у вас перед глазами, отраженной в зеркале, а другим глазом вы бы видели ее напрямую. Вы можете воспринять обе картины как единую, можете видеть либо одну, либо другую (то, что называется бинокулярным соперничеством) или большую часть времени видеть только какую-то одну из них. У некоторых людей получается такой эксперимент: если вы проведете рукой перед одним глазом (любым), перекрывая картину, и при этом не будете следить глазами



за рукой, вторая картина (не та, которую перекрывает рука) исчезнет полностью или частично, причем «стертая» часть второй картины относится к той области, которую перекрывала при своем движении рука. Если эта картина — лицо человека, вы можете таким образом стереть часть лица, например оставить только свободно парящий в пространстве рот. Это похоже на улыбку Чеширского Кота в книге Льюиса Кэрролла «Алиса в Стране чудес».

Почему возникает «стирание»?

**ОТВЕТ** • По-видимому, инстинкт выживания заставил организм выработать реакцию зрительной системы на каждое движение, которое замечает любой глаз, и сигнал об этом движении передается в мозг. Обычно движение фиксируется обоими глазами, и изображения в нормальном состоянии совмещаются. Но если с помощью зеркала один глаз видит сильно отличающуюся картину (ненормальное состояние), концентрация на картине, в которой происходит движение, мешает тому, чтобы вся вторая картина или ее часть достигли сознания. Если бы ваши глаза располагались по разные стороны головы (как у некоторых рыб) и поля зрения не перекрывались бы, эта иллюзия была бы более обычным делом.

### 7.21 • РИНО-ОПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Закройте левый глаз, смотрите правым глазом прямо перед собой, отведите вытянутую левую руку с поднятым вверх большим пальцем влево. Теперь ведите эту руку назад вправо до тех пор, пока палец не окажется в поле зрения, после чего скосите правый глаз в сторону этого пальца. Палец, скорее всего, исчезнет. Он виден, когда вы смотрите прямо перед собой, но не виден, когда пытаетесь посмотреть прямо на него. Почему палец «исчезает»?

**ОТВЕТ** • Чтобы увидеть какой-то объект, хоть какая-то часть света от этого объекта должна пройти через зрачок. Если вы будете смотреть прямо перед собой и, как это описывалось выше, повернете руку так, что палец покажется в поле зрения, свет от него на пути к открытому правому глазу частично попадет в зрачок. Но когда вы скосите глаз в направлении пальца, открытая часть глаза попадет в тень от носа и свет от пальца не сможет попасть в глазное отверстие, поскольку на его пути возникнет препятствие в виде носа. Этот эффект прозвали *рино-оптическим*, поскольку греческое слово

«рино» в переводе означает нос. Этот эффект не смогут наблюдать обладатели маленького носа.

Нос, лоб и щеки всегда заслоняют глазу часть вида. Однако мозг собирает всю доступную информацию вокруг линии вашего прямого взгляда и подавляет отсутствующие части общей картины, находящиеся вне прямой видимости.

### 7.22 • БЕГУЩИЕ ОБЛАКА И СИНИЕ ВРЕДНЮЧКИ

Торн Шипли из Медицинской школы Университета Майами описал новую оптическую иллюзию. Во время полета в самолете на большой высоте он заметил два слоя облаков. Один слой, казавшийся ему более удаленным, быстро двигался назад. Другой был как будто привязан к самолету и следовал точно за ним. Спустя некоторое время Шипли увидел далеко внизу океан, и сразу облачные слои поменялись местами и удаленный слой стал казаться ему неподвижным. Какое восприятие расстояния и движения относительно самолета было правильным?

В фильме «Желтая подводная лодка» (в основу которого положена одноименная песня группы «Битлз») персонаж фильма Синяя Вреднючка претерпевает значительные трансформации. Будучи далеко, она большая и свирепая, а по мере приближения — уменьшается и становится менее устрашающей. Что странного в этом преображении?

**ОТВЕТ** • Один слой облаков находился дальше и поэтому казался Шипли неподвижным, а тот, что был ближе, казался движущимся в его поле зрения из-за движения самолета относительно этого слоя. Поскольку сначала в поле зрения Шипли не было других подсказок относительно расстояния до облаков и характера их движения, неподвижность первого слоя была истолкована как свидетельство того, что он привязан к самолету и, следовательно, находится рядом. (Такое ощущение называется *визуальным захватом*, и его можно наблюдать из окна поезда, идущего мимо леса.) Другой слой казался совершенно независимым от самолета и поэтому удаленным. И только когда Шипли увидел поверхность океана, появилось достаточно указаний на реальные расстояния до облаков и их движение, и иллюзия исчезла. Аналогичный эффект может возникнуть, когда вы из окна поезда наблюдаете деревья на разных расстояниях.

Персонаж Синяя Вреднючка кажется странным, поскольку, когда она далеко, то в поле зрения она должна

иметь маленький угловой размер, а когда приближается — большой. Кроме того, по психологическим соображениям, более близкие объекты должны казаться более страшными, чем более далекие. А с нарисованной Синей Вреднучкой в фильме все происходит как раз наоборот.

### 7.23 • ЭФФЕКТ ПАЛФРИЧА

Установите маятник так, чтобы он качался поперек поля зрения, и закройте один глаз каким-нибудь темным фильтром (но не полностью непрозрачным, стекло от темных очков подойдет). Хотя маятник качается в вертикальной плоскости, вам покажется, что его конец движется по эллипсу. Кажущаяся глубина траектории движения еще возрастет, если в поле вашего зрения появится какой-либо подвешенный вертикально предмет (например, стержень или веревка) или если вы замените фильтр на более темный. Если фильтром закрыть левый глаз, кажется, что маятник вращается по часовой стрелке (при виде сверху), но направление вращения меняется, если фильтр переместить на правый глаз.

Если же вы подвешиваете два маятника рядом, их движение становится немного более запутанным. Кажется, что один из них вращается вокруг другого, так что веревки, на которых они висят, должны бы переплестись, но они, конечно, этого не делают.

Если вы закроете один глаз темным фильтром и поедете так в автомобиле, скорость, с которой окружающие предметы мелькают за окнами, будет казаться разной: объекты с одной стороны будут двигаться мимо вас слишком медленно, а с другой — слишком быстро. И расстояния до объектов окажутся измененными.

Почему с темным фильтром на одном глазу вы неправильно оцениваете реальную скорость и расстояние до объекта?

**ОТВЕТ •** Уменьшение светового потока в глазу, закрытом темным фильтром, замедляет прохождение сигнала, поступающего из глаза в мозг (эта задержка называется *визуальной латентностью*, или *торможением*). Таким образом, невооруженный глаз видит маятник в настоящем его положении, а глаз, прикрытый фильтром, видит маятник в его предыдущем положении. Ваш мозг объединяет два этих изображения, и вы видите маятник либо ближе, либо дальше, чем он есть на самом деле. Хотя в действительности конец маятника рисует прямую линию, ваш мозг делает это движение объемным, и вам кажется, что он очерчивает эллипс.

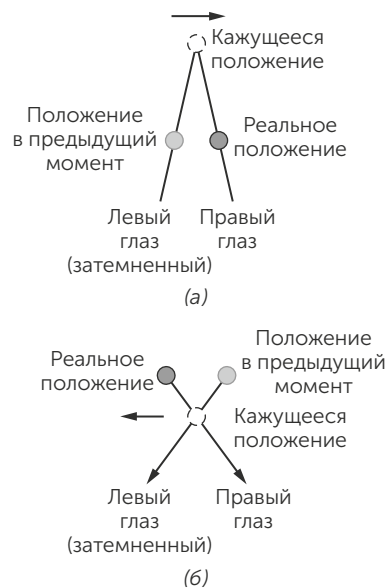


Рис. 7.4 / Задачи 7.23 и 7.30. Иллюзия Палфрича с маятником, качнувшимся вправо (а) и влево (б).

Например, представьте себе, что левый глаз прикрыт фильтром, а маятник движется вправо (рис. 7.4а). Тогда положение маятника, изображение которого получено с задержкой, будет лежать слева от реального положения маятника. А когда мозг совместит изображения от двух глаз, вам будет казаться, что маятник от вас дальше, чем на самом деле. Потом маятник движется влево, и положение маятника, полученное с задержкой, будет справа по отношению к реальному положению (рис. 7.4б). В этом случае будет казаться, что маятник ближе к вам, чем на самом деле.

Вид из движущейся машины тоже будет искаженным из-за визуальной латентности. Допустим, темный фильтр закрывает ваш левый глаз, а смотрите вы на объекты, расположенные по правому боку машины. Разница между истинным положением объекта, которое фиксирует правый глаз, и положением, которое он занимал чуть ранее (которое видит левый глаз), приводит к тому, что вам кажется, что объект дальше от машины, чем на самом деле. Поскольку время, за которое этот объект пронесется у вас перед глазами, не меняется, вы заключаете, что кажущиеся более удаленными объекты движутся быстрее. С другой стороны машины из-за визуальной латентности предметы кажутся расположенными ближе, чем на самом деле, и, соответственно, кажутся движущимися медленнее.

Джерри Лернер рассказал мне о новом варианте наблюдения иллюзии Палфрича. Замените маятник

предметом, вращающимся в горизонтальной плоскости. Прикройте глаз фильтром и настройте степень его пропускания и скорость вращения так, чтобы кажущееся вращение происходило в обратную сторону и с удвоенной скоростью по сравнению с истинным вращением. И увидите, что волшебным образом предмет то расширяется, то сжимается.

Имейте в виду, что задержка в получении визуального изображения, которая возникает, когда вы надеваете темные солнцезащитные очки (или опускаете щиток от ветра), может увеличить расстояние, требуемое для остановки машины. Допустим, солнечные очки достаточно темные, так что задержка визуального изображения составляет 0,1 секунды (самая плохая ситуация). При скорости примерно 90 км/ч задержка добавляет к расстоянию, требуемому для остановки, примерно 2,5 м.

## 7.24 • ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ ЗАЖИГАНИЕ УЛИЧНЫХ ФОНАРЕЙ

Когда в сумерках вдоль улицы включаются одновременно уличные фонари, может показаться, что те фонари, что стоят ближе, включаются раньше. Создается иллюзия того, что уличные фонари, установленные вдоль улицы, включаются поочередно, начиная от вас и дальше по цепочке. Кроме того, может показаться, что уличные фонари на перекрестках включаются немного раньше, чем фонари на широких улицах. Почему возникают такие иллюзии? Задержка не может объясняться тем, что току требуется некоторое время, чтобы добраться от одного уличного фонаря к другому, поскольку эта скорость слишком велика. Кроме того, вам кажется, что волна включения фонарей всегда начинается от вас, а в реальности так быть не может.

**ОТВЕТ •** На самом деле фонари включаются одновременно, а кажущееся их последовательное включение вызвано визуальной латентностью, описанной в предыдущей задаче. Ближайшие огни ярче, чем удаленные, поэтому зрительная система быстрее на них реагирует. Постепенно увеличивающаяся задержка в получении изображения от более удаленных фонарей в сумерках вызывает иллюзию поочередного их включения. Это объяснение может быть неполным. Время получения визуального сигнала может зависеть еще и от того, в какое место сетчатки попадает свет от уличных фонарей.

## 7.25 • ПОЛОСЫ МАХА

Предположим, объект освещается только одним ярким источником света (например, солнцем) и отбрасывает тень. Казалось бы, край тени должен быть размыт: темная область тени должна постепенно сменяться светлой. Однако во многих случаях я замечал две загадочные полосы, идущие параллельно краю. Темная полоса лежит внутри тени у ее границы, а яркая полоса лежит за пределами тени близко к ее границе (рис. 7.5). Если я сфотографирую тень и буду рассматривать ее край на фотографии, там я тоже увижу эти полосы. Их называют *полосами Маха* в честь Эрнеста Маха — австрийского физика и философа, первым исследовавшего это явление.

Полосы Маха почти всегда возникают вдоль краев тени, но обычно на них не обращают внимания. Однако художник-неоимпрессионист Поль Синьяк отчетливо изобразил эти полосы, окаймляющие тени, на своей картине «Завтрак», написанной в 1887 году. Вы можете наблюдать их на своей собственной тени в лучах солнца. Если тень близко, например на стене, она будет слишком резко очерченной, и полосы Маха не сформируются. Полосы более ярко выражены, когда ваша тень падает на тротуар, особенно если вы движетесь.

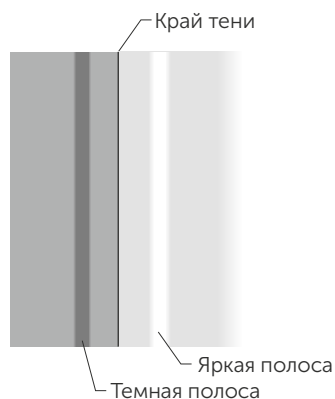
Откуда берутся полосы? Они вызываются оптическими эффектами, возникающими на краях предмета, отбрасывающего тень, или же создаются зрительной системой наблюдателя?

**ОТВЕТ •** Полосы Маха создаются зрительной системой, поэтому приборы для измерения интенсивности света их не выявляют. Причем визуальная система создает эти полосы как при рассмотрении реальной тени, так и ее фотографии. Никто в настоящее время не может дать полное объяснение, почему возникает этот эффект. Я тоже объясню это лишь частично.

Полосы обусловлены взаимодействием (так называемым *краевым контрастом*) между группами фоторецепторов в глазу, нервными волокнами, передающими сигналы от фоторецепторов в мозг, и отделами головного мозга. Группа рецепторов, которая активируется светом, уменьшает интенсивность сигналов, посылаемых в мозг соседними группами.

Рассмотрим группы фоторецепторов, расположенных близко к краю участка сетчатки, на который проецируется тень. Группы рецепторов, далекие от тени, сильно активированы, они подавляют друг друга и поэтому посылают сигнал умеренной интенсивности, который

ассоциируется сознанием с освещенной областью. Группы, находящиеся в тени, слабо активированы, поэтому слабо гасят друг друга и посылают в мозг слабый сигнал, который ассоциируется сознанием с темной областью.



**Рис. 7.5 / Задача 7.25.** Полосы Маха, расположенные вдоль края тени.

Интересующие нас полосы образуются промежуточными группами, которые расположены между двумя этими группами вдоль границы тени. Рассмотрим группу, у которой в качестве соседей с одной стороны находятся сильно освещенные, а с другой стороны — слабо освещенные рецепторы. Первый набор соседей блокирует нашу группу, но второй набор почти не делает этого. Поскольку рецепторы этой группы подвергаются умеренному блокированию, они посылают более сильный сигнал в мозг, чем рецепторы, удаленные от тени. Такие группы вблизи края тени образуют яркую полосу Маха.

Рассмотрим другую промежуточную группу, у которой с одной стороны соседями являются рецепторы, на которые проецируется тень, а с другой — слабо освещенные рецепторы на границе тени. Группа образует темную полосу Маха, потому что она больше подавляется (с одной стороны находятся освещенные, хотя и слабо, фоторецепторы).

Полосы Маха заметны, когда край тени (переходный участок между хорошо освещенными и плохо освещенными областями) занимает примерно  $0,2^\circ$  в вашем поле зрения. Они не появляются, если край тени более резкий.

### 7.26 • ПЕРЕВЕРНУТЫЙ МИР

Поскольку глаз работает как выпуклая линза, на сетчатке образуется действительное перевернутое изображение окружающей картины. (Например, земля оказывается вверху сетчатки, а небо внизу.) Почему же

мы воспринимаем мир в его нормальном виде? Если надеть специальные очки (в виде призм), которые переворачивают изображение, увидим ли мы мир перевернутым вверх тормашками?

**ОТВЕТ** • Когда мы смотрим вокруг, мозг правильно воспринимает перевернутое изображение мира исключительно исходя из опыта. Например, если мы поднимаем перед собой руку вверх, образ руки на сетчатке в действительности опускается вниз. Тем не менее мозг обрабатывает это изображение и интерпретирует его как движение руки вверх. Если с помощью специальных очков изображение будет перевернуто еще раз, мозгу потребуется несколько часов, а может быть и дней, чтобы интерпретация поменялась. До тех пор мир через очки будет выглядеть перевернутым, однако после адаптации мозг опять будет воспринимать мир в обычном виде. Если очки снять, мозгу опять понадобится время для адаптации, чтобы мир стал восприниматься в правильной ориентации. Такие эксперименты проделывались неоднократно, а также эксперименты, при которых менялось «левое» на «правое», — мозг через некоторое время приспособивался и к этому.

### 7.27 • ПЕРЕВЕРНУТЫЕ ТЕНИ И БУГОР НА РОВНОМ МЕСТЕ

Проделайте маленькое отверстие в непрозрачном листке бумаги, поместите его в нескольких сантиметрах перед одним глазом, закройте другой глаз, а затем аккуратно поднесите к лицу любой тонкий стержень (например, пустой стержень от шариковой ручки), держа его параллельно поверхности лица так, чтобы он оказался между отверстием и открытым глазом. Вы увидите в круге света, выходящего из отверстия, тень этого стержня, но — перевернутую. Почему кажется, что тень находится за листом бумаги?

Посмотрите одним глазом на далекий источник света через щель, образованную большим и указательным пальцами, причем пусть указательный палец будет чуть дальше от вас, чем большой палец. Кажется, что внутри щели на указательном пальце образуется бугорок. Чем уже щель, тем более выраженным становится бугорок, и в конце концов он заполнит всю щель.

Этот эффект наблюдал капитан Джеймс Кук в 1769 году во время прохождения Венеры через солнечный диск. Когда Венера стала пересекать Солнце, на которое смотрел Кук, он увидел черное пятно, а когда она приблизилась к краю солнечного диска, между



черным пятном и краем диска появилась черная перемычка, как будто на пятне вырос горбик.

**ОТВЕТ** • Глаз работает как выпуклая линза, создавая перевернутое изображение на сетчатке. Предположим, что конец стержня расположен напротив значка, а сам стержень направлен вниз. Изображение стержня оказывается перевернутым и расположенным в верхней половине сетчатки. Ваш многоопытный мозг переворачивает изображение так, что вы воспринимаете стержень в его правильной ориентации.

Но стержень отбрасывает тень на сетчатку, поскольку перекрывает часть света, проходящего через маленькое отверстие. Так как он располагается в нижней части поля зрения, тень расположится на нижней части сетчатки. Но поскольку мозг переворачивает все, что отпечатывается на сетчатке, вы увидите тень в верхней части поля зрения. Поэтому вы увидите стержень в правильной ориентации, а тень — перевернутой.

Когда вы уменьшаете ширину щели между большим и указательным пальцами, большой палец начинает загораживать свет, проходящий под указательным пальцем. Это уменьшение освещенности приводит к появлению темной области на сетчатке непосредственно рядом с изображением указательного пальца, и кажется, что она разрастается в щели так, как будто на пальце образовался бугорок. Чем уже щель, тем больше света блокируется и тем большим кажется бугорок.

## 7.28 • СТРАННОЕ ОТРАЖЕНИЕ В ЕЛОЧНОМ ШАРИКЕ

На стенках блестящего елочного шара можно увидеть отражение почти всей комнаты. Предположим, вы помещаете небольшой источник света (например, освещенное маленькое отверстие) перед шариком, а затем рассматриваете отражение в нем с расстояния около 10 см. Если в комнате горит общий свет, источник (освещенное отверстие) будет отображаться в виде яркой точки. Если свет в комнате выключить, в некоторых случаях отраженное изображение постепенно вытянется и превратится в линию. Если освещение в комнате включить опять, изображение быстро свернется в точку. Почему в темной комнате мы видим искаженное отражение?

**ОТВЕТ** • Лучи света от точечного источника света отражаются от сферической поверхности шарика во многих направлениях. Если наш глаз находится достаточно

близко, в него попадут многие из этих расходящихся лучей, и они сфокусируются на сетчатке. То, что вы видите, есть изображение источника, который, как нам кажется, лежит за ближайшей к глазу поверхностью шара, — это так называемое мнимое изображение. Когда комната хорошо освещена, глазной зрачок сужен, и в него входит лишь небольшой пучок отраженных лучей. Тогда изображение источника — это небольшая точка. Когда комната темная, зрачок расширяется, позволяя более широкому пучку отраженных лучей попасть в глаз, и мы видим более вытянутое изображение источника, которое может образоваться за счет астигматизма (дефекта зрения) или незначительного отклонения формы шара от идеальной сферы.

## 7.29 • ВРАЩЕНИЕ УЗОРОВ ИЗ СЛУЧАЙНО НАНЕСЕННЫХ ТОЧЕК

Набрызгайте чернила или краску на лист бумаги, а затем сделайте фотокопию этой картины на прозрачной пленке. Поместите пленку поверх оригинала, чтобы соответствующие точки совпали. Прижмите пальцем пленку в одной точке и поворачивайте ее вокруг этой точки. При больших поворотах точки остаются расположенными случайным образом, но для небольших поворотов многие точки кажутся расположенными на невидимых окружностях.

При увеличении угла поворота эти окружности, на которых лежат упорядоченные точки, смещаются внутрь, к пальцу, до тех пор, пока не исчезнут. Можно получить и другие узоры, если изгибать пленку или как-то иначе ее перемещать. Если на ксероксе сделать слегка уменьшенную фотокопию и положить ее поверх оригинала, появляются спирали и другие узоры. Почему мы видим упорядоченные структуры при различных совмещениях рисунков со случайно разбросанными точками, которые названы общим термином *узоры Гласса* в честь Леона Гласса из Университета Макгилла, открывшего их в 1969 году? Упорядоченность исчезает, если копия делается в виде негатива оригинала на сером растровом фоне. Означает ли этот результат, что ощущение вращения в узоре зависит от контраста между точками и фоном в каждом из узоров?

**ОТВЕТ** • Почему возникает ощущение вращения при наложении картинок со случайно разбросанными точками, не совсем понятно. Каким-то образом зрительная система сканирует всю картину и находит пары точек, которые ранее были совмещены. Если вы посмотрите

только на небольшой участок картины, корреляцию найти не удастся и вы не увидите никакого узора. Корреляция, которую зрительная система находит в полной картине, может быть связана с тем, что в зрительной системе имеются группы, специально предназначенные для обнаружения линий и контуров. Такие специализированные группы действительно обнаружены.

Предположим, что каждая из таких многочисленных групп возбуждается парой точек, которые ранее были совмещены. Затем мозг сравнивает эти группы, понимает, что в каждой из них имеется пара коррелированных точек, лежащих на невидимой окружности, и создает в сознании ощущение вращения. Когда копия отворачивается слишком далеко от оригинала, точки, которые были сначала совмещены, возбуждают разные группы, и у вас уже не может возникнуть ощущения вращения.

Для того чтобы увидеть узоры Гласса, нужно не только повернуть картинку друг относительно друга на небольшой угол. Мозг еще требует, чтобы точки имели один и тот же контраст по отношению к фону. Поэтому если одна из картинок является негативом другой и фон на этом негативе представляет собой серый растр, никакого узора мы не увидим, даже если повернем негатив на малый угол.

### 7.30 • СНЕЖНЫЕ УЗОРЫ НА ТЕЛЕВИЗИОННОМ ЭКРАНЕ

Настройте телевизор на канал, где нет сигнала, и экран заполнится случайным шумом, так называемым снегом. Если вы наложите на экран круг, будет казаться, что снежинки движутся по границам круга. Если вы наложите на экран шаблон, состоящий из радиальных линий, будет казаться, что снежинки перемещаются перпендикулярно линиям и образуют завитки. А шаблон, состоящий из концентрических окружностей, заставит снежинки двигаться по радиусам от центра наружу. Почему движение снежинок кажется таким?

Если вы посмотрите на экран, на котором движутся снежинки, и закроете один глаз темным фильтром (но не полностью непрозрачным, стекло от солнцезащитных очков подойдет), вам покажется, что снежинки разбиваются на две группы и занимают две плоскости: одну перед экраном, а другую за ним.

Снежинки на одной плоскости будут равномерно двигаться влево, а на другой тоже равномерно, но вправо. Почему возникает ощущение такого разделения, чем определяется направление движения снежинок и откуда появляется объемность картинки?

**ОТВЕТ** • Кажущееся направленное движение снежинок, вызванное наложением шаблона с рисунком на экран, безусловно, иллюзия, поскольку снежинки появляются и исчезают случайным образом. Однако зрительная система постоянно воспринимает последовательность точек на одном направлении как одну движущуюся в этом направлении снежинку. Никто точно не знает, почему возникает выделенное направление видимого глазом движения. Однако очевидно, что это выделенное направление движения снежинок задается ориентацией линий в наложенной на экран решетке или шаблоне.

Когда один глаз прикрыт темным (но не полностью непрозрачным) фильтром, визуальный сигнал от этого глаза поступает с задержкой. Таким образом, в то время как открытый глаз видит на экране точку в текущий момент, прикрытый глаз видит точку на экране в том месте, где она была раньше. Как и в иллюзии Палфрича (см. задачу 7.23), мозг пытается свести эти два изображения в единую точку, и поэтому нам кажется, что она находится либо перед экраном, либо за ним (см. рис. 7.4). Таким образом, иллюзия трехмерности картины возникает из-за задержки визуального сигнала от прикрытого глаза.

Предположим, что в следующий момент вы увидите еще одну пару точек, расположенных чуть правее первой пары. Снова мозг соединяет два изображения и воспринимает их как одну точку и может принять эту новую точку за смещенную вправо первую точку. Дальнейшее совмещение точек и их интерпретация приводит к иллюзии того, что точка перемещается вправо по экрану. Остальные точки кажутся перемещающимися влево.

Объяснение может быть и несколько иным. Возможно, мозг сначала обнаруживает видимое движение точек, а уже затем определяет, на какой глубине они находятся. Но конечный результат не изменится: мозг создает в сознании иллюзию движущихся в противоположных направлениях точек на плоскостях, расположенных на разной глубине.

### 7.31 • УЛЫБКА МОНЫ ЛИЗЫ

Одна из самых завораживающих улыбок в мире — улыбка Моны Лизы на портрете кисти Леонардо да Винчи. Что делает эту улыбку такой пленительной?

**ОТВЕТ** • У искусствоведов по этому поводу свое мнение, а в качестве физической модели можно предложить такое рассуждение. Картина, которую вы видите перед собой, кажется совершенно стабильной, но на самом деле она постоянно меняется из-за небольшого

случайного шума, то есть флуктуаций, возникающих как в уровне сигнала, так и в процессе передачи и обработки этого сигнала на всем пути от сетчатки до мозговых центров. При возбуждении фоторецепторы и нейроны могут спонтанно срабатывать или не срабатывать, поглощение света в фоторецепторах тоже флуктуирует, следовательно, линии и формы не совсем точно воспроизводятся в сознании, вызывая альтернативные восприятия. Из-за этих и других небольших изменений светового сигнала, воспринимаемого нашим сознанием, углы губ Моны Лизы чуть-чуть опускаются и поднимаются случайным образом, и кажется, что настроение Моны Лизы все время меняется. Вы не подозреваете об этих флуктуациях, но попадаете в плен этой загадочной улыбки.

### 7.32 • ПРИЗРАКИ ТЕЛЕВИЗИОННОГО ЭКРАНА, ПЛАВАЮЩИЕ В ВОЗДУХЕ

Когда в темной комнате вы смотрите телевизор с кинескопом (электронно-лучевой трубкой) и там нет другого источника света, быстро переведите взгляд сначала к точке, находящейся примерно на метр слева от экрана, а затем к точке, находящейся примерно на метр справа от него. Когда вы будете переводить взгляд вправо от экрана, вы увидите одно или несколько ярких подробных призрачных изображений текущего телевизионного кадра, висящих в воздухе, причем каждое такое изображение перекошено вправо.

Как образуются эти изображения? Куда они перекосятся, если вы переведете ваш взгляд в противоположном направлении? Почему, если вы отодвинетесь от экрана подальше, изображения сильнее перекосятся, а расстояние между ними увеличится? Появятся ли подобные призрачные изображения, если вы будете переводить взгляд в вертикальном направлении? Могут ли образоваться похожие изображения, если в этот момент на экране будут мелькать кадры кинофильма?

**ОТВЕТ •** Изображение на экране телевизора создается лучом, быстро бегущим по экрану в горизонтальном направлении строка за строкой сверху вниз. Предположим, что ваш взгляд перемещается вправо по экрану, в то время как луч создает верхнюю линию. Линия остается видимой в течение короткого времени из-за инерции зрения. Поскольку ваш взгляд сдвигается вправо, сохранившееся изображение верхней строки оказывается смещенным вправо, в то время как луч на экране уже пробегает вторую строку. Фактически,

когда луч на экране пробегает следующую строку, предыдущие строки все еще можно видеть, но смещенными вправо из-за перемещения вашего взгляда. Сдвиг будет наибольшим для верхней строки и наименьшим для нижней строки. В совокупности эти линии дадут перекошенное изображение того, что видно на экране.

Если вы будете быстро переводить взгляд от экрана вниз, вы увидите приплюснутое изображение экрана, а если вверх — вытянутое изображение. Поскольку кинофильм проецируется на экран в виде последовательности целых кадров, призрачных изображений не получится.

### 7.33 • ЧТЕНИЕ ЧЕРЕЗ МАЛЕНЬКИЕ ОТВЕРСТИЯ (ПИНХОЛЫ)

Если читать через маленькие отверстия, расположенные перед глазами, будут ли глаза меньше утомляться? Сейчас часто можно встретить рекламу очков для чтения, в которые вместо стекол вставлены пластинки со множеством маленьких отверстий. Производители обещают уменьшение напряжения мышц глаз, облегчение чтения и даже лечебный эффект. Впрочем, на некоторых сайтах пишут, что, наоборот, увеличивая напряжение мышц, такие очки тренируют глаза. И даже что они отсекают ультрафиолетовое облучение! Справедливы ли эти утверждения?

Живущие в пустыне гекконы не читают сквозь дырочки, но пользуются ими, чтобы не ослепнуть от яркого света. Ночью две мембраны над зрачком глаза открываются, образуя вертикальную щель, через которую ящерица видит. Днем же эти мембраны смыкаются, оставляя четыре небольших отверстия за счет выемок в краях мембран. Как геккон использует эти четыре отверстия, чтобы видеть добычу? Не лучше ли было бы ему иметь одно отверстие?

**ОТВЕТ •** Утверждение о том, что читать легче через отверстие, сомнительное. Аккомодация связана с конвергенцией глаз, то есть небольшими их поворотами, с тем чтобы линии зрения двух глаз пересеклись на объекте. Когда вы читаете эту страницу на расстоянии около 25 см, ваши глаза должны повернуться на определенный угол, чтобы в вашем сознании изображения от двух глаз могли восприниматься как единое целое. Конвергенция автоматически заставляет каждый глаз аккомодироваться, даже если они смотрят через маленькие отверстия, следовательно, отверстия не помогают глазным мышцам расслабляться.

Правда, при рассматривании объекта через маленькое отверстие уменьшается «кружок рассеивания», который из-за погрешностей оптической системы создает любой точечный источник, и резкость изображения может возрасти, правда, ценой уменьшения его яркости. Однако какой-либо лечебный эффект от таких очков достоверно не обнаружен и ультрафиолет они, конечно, не подавляют.

Несколько отверстий в закрытом глазу геккона уменьшают глубину фокуса. Затем геккон может отрегулировать глаз так, что четыре отверстия создают единое четкое изображение добычи, в то время как любой другой объект геккон видит в виде четырех перекрывающихся изображений. Внимание геккона приковывается к резкому изображению, а не к другим, размытым изображениям.

### 7.34 • ЦВЕТНОЙ ОРЕОЛ ВОКРУГ ПАЛЬЦА

В затемненной комнате встаньте напротив светлого окна, закройте один глаз, вытяните руку и поднимите один палец вертикально. Сфокусируйте открытый глаз на окне (или даже чем-то более удаленном), а не на пальце. Вы увидите, что края пальца слегка окрашены в разные цвета: красный с одной стороны, синий с другой. Что вызывает окрашивание?

**ОТВЕТ** • Сначала рассмотрим один луч белого света, проходящий рядом с пальцем слева от него. Говорят, что свет белый, потому что он состоит из примерно равного количества цветов видимого спектра, и в данном случае это действительно так. Как только свет попадает в глаз, а затем проходит через него, в конечном итоге на небольшой части сетчатки происходит разделение цветов: с одной стороны собирается свет с синей длиной волны, с другой стороны — с красной, а промежуточные цвета распределяются между красным и синим цветами (хроматическая аберрация). Как правило, вы не можете видеть эти цвета из-за перекрытия лучей с разными длинами волн на сетчатке. А вот когда вы помещаете палец напротив ярко освещенного окна, он отбрасывает темную тень на сетчатку, которая закрывает перекрытые лучи разных цветов рядом с тенью. Поэтому вдоль этой тени вы сможете увидеть цветной ореол. В зависимости от угла, при котором свет падает на глаз, красная окраска появляется либо на одной стороне тени, либо на другой, а синяя, соответственно, появляется на противоположной.

### 7.35 • НАБЛЮДЕНИЕ ЗВЕЗД ДНЕМ ЧЕРЕЗ ТРУБУ

Со времен Аристотеля, выдвинувшего эту идею, люди верили, что звезды можно увидеть днем, если смотреть на них через длинную трубу, например высокий дымоход. Труба закрывает большую часть светящегося неба, в отверстии трубы остается лишь небольшой его кусочек. Меньшая освещенность к тому же помогает наблюдателю частично адаптировать глаза к темноте. Достаточно ли этого, чтобы можно было рассмотреть звезду на этом кусочке неба?

**ОТВЕТ** • Через длинную трубу звезду нельзя увидеть, потому что окружающий звезду кусочек неба, видимый в отверстии трубы, остается таким же ярким, как если бы вы смотрели на него без трубы. Если смотреть через трубу, общая засветка глаза уменьшается, но это не меняет контраста между звездой и фоном: он остается нулевым. Труба может даже ухудшить видимость звезды. Действительно, чтобы быть заметным, светлое пятно, окруженное темным пространством, должно быть ярче определенного (порогового) значения. Пороговое значение уменьшается, если окружающее пространство становится светлее.

### 7.36 • КАК ЗВЕЗДОЧЕТЫ СМОТРЯТ НА ЗВЕЗДЫ

Почему больше шансов увидеть тусклую звезду рядом с яркой, если посмотреть на звезды краем глаза? Почему в полутьме вы лучше видите источник слабого света, если не смотрите на него прямо? Аристотель использовал этот прием и обнаружил, что кометы — это не планеты с большими периодами обращения, поскольку, если скосить глаза к одной стороне кометы, можно различить ее хвост.

**ОТВЕТ** • При низкой освещенности, например когда вы смотрите на звезду в темную ночь, колбочки фоторецепторов не активируются, и только палочки могут обнаружить свет. Если вы смотрите прямо на звезду, ее изображение проецируется на центральную ямку сетчатки, которая содержит только колбочки, и поэтому звезду вы увидеть не можете. Если вы отведете взгляд от звезды в сторону, изображение будет проецироваться на другие части сетчатки, где есть палочки. Тогда вы сможете звезду увидеть.

Боковое зрение эффективнее и в некоторых других ситуациях. Например, боковым зрением можно иногда заметить мерцание люминесцентных ламп, когда «общим» зрением оно не замечается.



### 7.37 • ЗЕМНЫЕ ОБЪЕКТЫ, РАЗЛИЧИМЫЕ С ОРБИТЫ

Каковы наименьшие размеры объектов на поверхности Земли, которые могут различить с околоземной орбиты космонавты, не прибегая к приборам? Могут ли они увидеть крупные города или большие конструкции, например пирамиды? Первые полеты к Марсу принесли некоторое разочарование, потому что на фотографиях не оказалось никаких признаков разумной жизни. Какие признаки разумной жизни были бы видны на подобных фотографиях Земли, если бы пространственное разрешение фотоаппаратов позволяло снимать структуры размером около километра?

**ОТВЕТ** • Космонавт, вращающийся по орбите вокруг Земли, не увидит почти никаких признаков разумной жизни на ее поверхности, если будет смотреть на нее невооруженным глазом и в дневное время. Предел разрешения человеческого глаза ограничивается дифракцией света при прохождении через зрачок, он составляет 1–2 угловых минуты, то есть 0,02–0,03°.

Если смотреть с орбиты (скажем, с высоты 800 км от поверхности), дифракция размывает детали почти всего, что создано руками человека, поскольку структуры шириной около километра находятся недалеко от порога разрешения. Однако, когда космонавт смотрит на Землю ночью, несомненные доказательства разумной жизни появляются в изобилии, поскольку с орбиты хорошо видны освещенные большие города.

### 7.38 • МЕДОНОСНЫЕ ПЧЕЛЫ, ПУСТЫННЫЕ МУРАВЬИ И ПОЛЯРИЗОВАННЫЙ СВЕТ

Луч света, пришедший к нам непосредственно от Солнца, не поляризован, потому что электрические поля отдельных квантов колеблются во всех возможных направлениях, перпендикулярных направлению луча. Однако если световой луч рассеивается на какой-либо молекуле воздуха, он окажется поляризованным, поскольку электрические поля колеблются вдоль одной оси, перпендикулярной лучу. Вы можете не заметить разницы, но некоторые животные, такие как медоносные пчелы и пустынные муравьи, ориентируются на местности, отслеживая распределение поляризованного света по небу. Например, когда пустынный муравей отправляется на поиски пищи, он отмечает углы между направлением своего тела и направлением поляризации солнечного света. Затем, когда он хочет вернуться к себе в муравейник, он вычисляет

направление на дом, сопоставляя информацию обо всех углах. Вычислительные способности у него выдающиеся, поскольку иногда его траектория настолько замысловатая, что ему приходится запоминать несколько сот углов.

Как эти насекомые определяют направление поляризации света?

**ОТВЕТ** • Медоносная пчела и пустынный муравей имеют сложные глаза, состоящие из тысячи или более светочувствительных рецепторов, называемых *омматидиями*. В каждом рецепторе свет проходит через переднюю линзу, затем через конус, состоящий из прозрачного кристаллического материала, и наконец поступает в удлинённую структуру, называемую *рабдомом* (*зрительной палочкой*). Эта структура состоит из девяти секций, расположенных вокруг центральной оси, направленной по ее длине. Секции соединяются за счет перекрытия областей, в которых находится светочувствительный пигмент (родопсин). Омматидий работает следующим образом: он посылает свет вдоль центральной линии так, чтобы пигмент мог поглотить его и послать сигнал в мозг насекомого.

Одна из секций омматидия может определить поляризацию света. В некоторых омматидиях эта секция закручивается по часовой стрелке вокруг центральной оси, а в других — против часовой стрелки. Насекомое обнаруживает ориентацию и степень поляризации света, используя три сигнала. Два из них исходят из чувствительных к поляризации секций, по одному от двух направлений поворота. Третий сигнал поступает от ультрафиолетовых детекторов в омматидиях, которые определяют яркость ультрафиолетового излучения. На основе этих трех сигналов от группы омматидиев насекомое может отслеживать поляризацию неба.

До сих пор непонятно, как мозг насекомого использует эту информацию. Однако мы знаем, что пчелы обмениваются информацией между собой, исполняя особый *танец* — выписывая в воздухе петли, в которых зашифрована информация.

Способность определять поляризацию света может использоваться и для других целей, помимо навигации. Например, некоторые водяные жуки обнаруживают водоемы по поляризации света, отражающегося от воды, который сильно поляризован в горизонтальной плоскости. Люди надевают специальные поляризационные солнцезащитные очки, поглощающие горизонтально поляризованный свет, чтобы убрать блики

отраженного от воды света. Автомобилисту может мешать горизонтально поляризованный свет, отраженный от асфальта; эту помеху тоже легко устранить с помощью поляризационных очков. Иногда мухи ошибочно принимают поляризованный свет, отраженный от асфальта, за признак воды, начинают роиться на асфальте и откладывать там яйца, которые, естественно, быстро гибнут.

### 7.39 • ЩЕТКА ГАЙДИНГЕРА

Большинство людей способны определить поляризацию света на глаз. Посмотрите через поляризационный фильтр на яркий фон и сделайте так, чтобы в поле зрения не было никаких посторонних предметов (используйте одно стекло из поляризационных солнцезащитных очков). В течение нескольких секунд на линии зрения вы увидите на синем фоне маленькую, едва заметную желтую фигуру в форме песочных часов (рис. 7.6). Эта фигура называется щеткой Гайдингера в честь Вильгельма Карла фон Гайдингера, который открыл ее в 1844 году.

Чтобы щетка Гайдингера стала для вас заметнее, поверните фильтр вокруг линии видимости так, чтобы изменилось направление поляризации света, падающего в ваш глаз. Фигурка песочных часов тоже повернется (короткая ось желтой фигуры останется параллельной вектору поляризации света). Эта фигура увеличится, если в подсветке синий цвет будет преобладать над другими цветами. Голубое небо для этой цели вполне подойдет.

Не все могут увидеть щетку Гайдингера, и способность ее увидеть, похоже, падает с возрастом. Когда я был моложе, я мог увидеть фигуру и без фильтра, глядя на поляризованный свет, идущий от неба. Что именно в глазу отвечает за появление этой фигуры и за чувствительность глаза к поляризации света?

**ОТВЕТ** • Традиционно считается, что ответственна за то, что мы видим щетку Гайдингера, *macula lutea*, или *желтое пятно*. Это область, в центре которой находится фовеа, центральная ямка. Раньше полагали, что чувствительность к направлению поляризации света обусловлена расположением молекул пигмента, придающих этому участку желтый цвет. Эти молекулы поглощают синий свет определенной поляризации. Считалось, что они ориентированы вдоль радиальных линий, исходящих из общего центра. Более поздняя модель предполагает, что сами молекулы не должны

быть ориентированными. Вместо этого они, возможно, собираются в группы, ориентация которых друг относительно друга обеспечивает избирательное поглощение синего света с поляризацией в определенном направлении.

Чтобы понять, как работает любая из этих моделей, я предположу, что пигменты, покрывающие желтое пятно, расположены вдоль двух пересекающихся линий, одной горизонтальной и другой вертикальной. Если вертикально поляризованный синий свет попадает в глаз, пигменты, лежащие вдоль вертикальной линии, пропускают свет к лежащим под ними колбочкам, а пигменты, лежащие вдоль горизонтальной линии, поглощают свет, не позволяя ему достичь расположенных под ними колбочек. Если, наоборот, горизонтально поляризованный свет попадает в глаз, тогда пигменты на горизонтальной линии пропускают свет, а на вертикальной линии — нет.



Рис. 7.6 / Задача 7.39. Щетка Гайдингера, видимая в поляризованном свете.

Предположим, что вертикально поляризованный свет попадает в глаз и что этот свет почти белый, но в его составе больше синего цвета, чем других цветов. Тогда колбочки, расположенные под вертикальной линией, возбуждаются, и вы видите синюю вертикальную линию. А вот пигменты, расположенные вдоль горизонтальной линии, поглощают синий цвет, и колбочки за этой линией пропускают только попадающий в глаз свет оставшихся цветов. Белый или почти белый свет, из которого вычтен синий цвет, воспринимается как желтый. Таким образом, вы видите горизонтальную линию желтого цвета, которая и является фигурой песочных часов. Вертикальная линия синего цвета воспринимается в виде синих областей по сторонам песочных часов.

Если бы это объяснение было полным, вы не увидели бы синие области, если бы рассматривали фигуру на фоне неба или какого-либо другого протяженного источника преимущественно голубого света, потому

что синий ореол нельзя было бы отличить от фона. Чтобы завершить объяснение, мы, по-видимому, должны предположить, что мозг добавляет *дополнительный* синий цвет в этот ореол. Предположительно, эта *субъективная окраска* ореола спровоцирована желтой окраской соседних с ним частей песочных часов.

#### 7.40 • ЦВЕТА ТЕНЕЙ

В 1810 году Иоганн Вольфганг фон Гёте, немецкий мыслитель, великий писатель и один из первых исследователей цветного зрения, описал следующий эксперимент: «В сумерках поставим короткую горящую свечу на лист белой бумаги. Перед ней и угасающим дневным светилom поставим вертикально карандаш, так чтобы отбрасываемая им тень в свете свечи освещалась, но не исчезала в слабом дневном свете. И тогда мы увидим, что эта тень чудесного голубого цвета».

Вы можете проделать похожий эксперимент. В темной комнате осветите экран лучами двух прожекторов. На пути одного луча поместите цветной фильтр, например кусок красного целлофана. Поставьте руку перед ним так, чтобы она отбрасывала небольшую тень на экран. За пределами тени экран розовый, потому что на него падает красный свет от первого прожектора и белый свет от второго прожектора. Внутри тени экран должен быть белым, потому что красный свет от первого прожектора заблокирован вашей рукой и экран освещен только вторым прожектором. Однако внутри тени экран сине-зеленый. Почему тень окрашивается?

**ОТВЕТ** • Я объясню эксперимент с прожекторами, а эксперимент великого Гёте попробуйте объяснить сами. Изображения экрана и тень вашей руки возбуждают три типа колбочек-фоторецепторов на сетчатке. Изображение розового экрана сильно возбуждает красные колбочки и гораздо меньше — зеленые и синие колбочки.

Изображение тени должно быть белым, поскольку область тени освещена только вторым прожектором без фильтра, поэтому это изображение должно возбуждать все виды колбочек. Однако красные колбочки, возбужденные розовым экраном, гасят (ингибируют) сигнал от красных колбочек, находящихся внутри изображения тени. Этот притушенный сигнал интерпретируется зрительной системой как сигнал сине-зеленого цвета, дополнительного к красному цвету. Как происходит гашение и почему воспринимается дополнительный цвет — пока нерешенные головоломки.

#### 7.41 • БЕЗОПАСНОСТЬ СОЛНЦЕЗАЩИТНЫХ ОЧКОВ

Солнцезащитные очки уменьшают интенсивность видимого и ультрафиолетового света, проникающего в глаз, поглощая часть света. Но, с другой стороны, при затемнении расширяется зрачок. Возможно ли, что из-за расширения увеличивается количество ультрафиолетового света, попадающего в глаз, и поэтому солнцезащитные очки не следует носить?

Почему коренные жители Канады и Аляски закрывают глаза кусками кости или дерева с узкими прорезями для глаз? Почему атлеты (особенно американские футболисты) наносят на скулы черную краску, если игра происходит при ярком солнечном свете?

**ОТВЕТ** • Современные солнцезащитные очки уменьшают общий поток ультрафиолетового света, проникающего в глаз, несмотря на расширение зрачка. Однако ранее выпускались солнцезащитные очки, не обладавшие этим свойством (пластмассовые и не содержащие красителей, поглощающих ультрафиолет). Поэтому в пособиях по альпинизму имелось предупреждение об опасности применения пластмассовых солнцезащитных очков.

Коренные жители Канады и Аляски стремились уменьшить отражения от ярко освещенных снежных и ледяных поверхностей, среди которых им приходилось жить. Прорези, через которые они смотрели, значительно уменьшали не только видимый свет и ультрафиолет, попадающий в глаза, но и инфракрасное излучение, вызывающее в глазах дискомфорт.

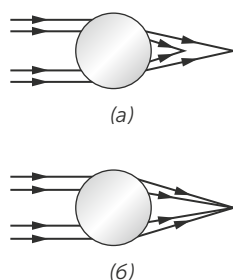
Черная краска на скулах американских футболистов уменьшает отражение света от щек в глаза, мешающее игроку видеть. Это отражение от щек особенно неприятно, если по щекам течет пот, а матч проводится либо днем под высоким солнцем, либо при ярком свете прожекторов в ночное время.

#### 7.42 • ХРУСТАЛИКИ РЫБ

Наша способность видеть связана с тем, что глаз изгибает (преломляет) световые лучи так, что они образуют четкое изображение на сетчатке. Около двух третей этого преломления происходит на изогнутой поверхности роговицы, остальное — при прохождении лучей через хрусталик, который расположен на некотором расстоянии позади роговицы. Рыба отличается тем, что ее глаз находится в воде, а вода имеет примерно те же оптические свойства, что и глаз, свет в роговице

уже не преломляется и световые лучи могут преломляться только в хрусталике. Более того, поскольку хрусталик рыбы должен сильно изгибать лучи, чтобы они сфокусировались сразу за ним, он должен быть почти сферическим. Однако сферическая линза страдает от *сферических aberrаций*, поскольку лучи, проходящие близко к ее краям, входят под таким большим углом к поверхности линзы, что преломляются сильно, а лучи, распространяющиеся вдоль центральной оси линзы, входят под меньшими углами и, следовательно, изгибаются намного меньше. В результате лучи фокусируются в широком пятне позади линзы и, таким образом, не создают четкого изображения (рис. 7.7а). Фактически сферический хрусталик рыбы должен был бы сделать рыбу почти слепой. Как же тогда рыбам удается видеть?

**ОТВЕТ** • Степень преломления лучей при вхождении их в хрусталик и на выходе из него зависит от разницы в показателях преломления материалов. Если луч попадает из водно-белковой среды, заполняющей глазное яблоко, в хрусталик с большим показателем преломления, лучи сильно изогнутся. Если у хрусталика меньший показатель преломления, лучи изогнутся меньше. Хрусталик в рыбьем глазу имеет не постоянный показатель преломления: он больше вдоль центральной оси и меньше ближе к краям. В результате лучи, идущие вдоль центральной оси, и лучи, падающие ближе к периферии, создают изображение в одной относительно небольшой области за хрусталиком (рис. 7.7б).



**Рис. 7.7 / Задача 7.42.** Фокусировка световых лучей сферической линзой с постоянным показателем преломления (а) и градиентным показателем преломления (б).

Таким образом, рыба получает возможность видеть. Изменение показателя преломления, или *градиент показателя преломления*, возникает благодаря изменению свойств водно-белковой среды в глазу. Вы можете обнаружить эти меняющиеся свойства среды,

рассмотрев глаз сырой или приготовленной рыбы: его текстура тверже вблизи центральной оси.

Хрусталик человека тоже имеет градиентный показатель преломления (его значения варьируют от больших до меньших в направлении от центра к периферии). Однако, поскольку мы живем в воздушной среде, а не в водной, человеческий глаз исправляет сферическую aberrацию главным образом на поверхности роговицы: поверхность роговицы не сферическая, а имеет специальную форму, чтобы компенсировать сферическую aberrацию.

Мечехвост *Limulus* также использует градиентный показатель преломления, но совершенно иначе. Его сложный глаз состоит из множества прозрачных фасеток, каждая из которых имеет гладкую плоскую поверхность. Свет проходит через фасетку, достигая зрительной системы в конце канала. Отсутствие кривизны должно было бы помешать формированию изображения, но, тем не менее, в каждой фасетке оно формируется. Вдоль центральной линии канала (идущего спереди назад) показатель преломления выше, чем по направлению к боковым стенкам канала. Таким образом, лучи света, проходящие вблизи центра фасетки, изгибаются больше, чем лучи, проходящие вблизи стенок. Разное искривление лучей заставляет их пересекаться друг с другом, образуя изображение после прохождения канала.

### 7.43 • ОЩУЩЕНИЕ ОБЪЕМА НА КРАСНО-СИНИХ ПЛАКАТАХ

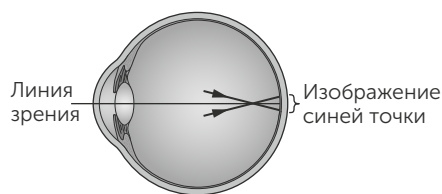
При ярком освещении кажется, что красные участки красно-синего плаката расположены перед соседними синими участками. А при более тусклом свете, наоборот, синие участки кажутся ближе, чем красные. Почему возникает ощущение глубины и почему в тусклом свете близкие и далекие поверхности меняются местами?

**ОТВЕТ** • Сначала разберемся, как мы видим три объекта, расположенные перед нами на разных расстояниях. Если мы сфокусируемся на среднем объекте, в каждом глазу возникает четкое изображение на пересечении его линии зрения и сетчатки. Более далекий объект образует размытое изображение на сетчатке, расположенное чуть ближе к носу по сравнению с резким изображением среднего объекта. А более близкий объект образует размытое изображение на сетчатке, чуть смещенное к виску по сравнению с резким изображением среднего объекта. Мозг сравнивает положения этих



изображений и приписывает правильные расстояния от глаза до соответствующих реальных объектов.

Подобное сравнение происходит и когда мы смотрим на красно-синие плакаты, что и объясняет ощущение глубины. Допустим, вы смотрите на две соседние точки при ярком освещении: одну красную, а другую синюю. Световые лучи от этих точек попадают в глаз, преломляются в нем и формируют изображение на сетчатке. Однако лучи с синей длиной волны преломляются сильнее, чем с красной, так что обе точки не могут оказаться одновременно в фокусе. Допустим, вы смотрите прямо перед собой и фокусируете глаза на красной точке, при этом в каждом глазу изображение красной точки формируется на пересечении линии зрения и сетчатки. А синяя точка образует на сетчатке размытое изображение большего радиуса (рис. 7.8).



**Рис. 7.8 / Задача 7.43.** Если красная точка образует на сетчатке глаза четкое изображение, изображение синей точки будет находиться перед сетчаткой.

Глубина, которая приписывается этим двум изображениям, зависит от того, в каком месте сетчатки относительно линии зрения они формируются. Обычно линия зрения не проходит через центр зрачка. При ярком освещении она смещается от центра зрачка к носу. При такой геометрии центр размытого изображения синей точки слегка смещается от линии зрения к носу. Из опыта восприятия объемных картин мозг определяет, что это изображение создается объектом (синей точкой), более удаленным, чем тот, который образует резкое изображение на линии зрения (красная точка). Таким образом, вы воспринимаете синюю точку как более удаленную, чем красная.

В тусклом свете зрачок расширяется, и линия зрения сдвигается от центра зрачка к виску. Это сдвигает размытое изображение синей точки по сетчатке до тех пор, пока его центр не окажется сдвинутым к виску относительно линии зрения. Мозг это новое положение изображения синей точки интерпретирует так, как будто реальная синяя точка теперь находится ближе, чем красная.

Объемность можно увидеть и на картах, раскрашенных красным и синим цветом, если карты рассматривать с помощью большой выпуклой линзы, например под сильной лупой. Здесь разделение цветов происходит потому, что синий свет преломляется больше, чем красный (хроматические аберрации).

#### 7.44 • СИНИЕ ДУГИ ПУРКИНЬЕ

Оказавшись однажды ночью на улице, физиолог Йоханнес Пуркинье, живший в XIX веке, заметил, что над небольшим светящимся угольком в его поле зрения возникали две синие дуги. Хотя они быстро исчезали, он мог воссоздать их, быстро перемещая уголек.

Чтобы увидеть нечто похожее, выполните следующие действия: выключите свет в комнате примерно на две минуты. Закройте один глаз и включите небольшой красный фонарь. Лучше всего подойдет узкий красный фонарь прямоугольной формы, который в вашем поле зрения занимает не более  $0,25^\circ$ . Открытым глазом в течение секунды вы будете видеть слабую синюю дугу или луч. Форма дуги зависит от того, в каком месте вашего поля зрения находится источник красного света. Чтобы увидеть дугу еще раз, включите свет в комнате примерно на две минуты, а затем повторите все действия сначала.

Сразу после полного отключения стимулирующего освещения также можно увидеть тусклые дуги. Но в любом случае, когда глаз полностью адаптируется к темноте, дуги будут серыми (бесцветными).

Почему появляется дуга или луч и почему форма синей области зависит от положения источника стимулирующего освещения? Как небольшой источник стимулирующего освещения может создать изображение дуги, которая проходит через довольно широкую область поля зрения? Почему дуги синие, когда глаз частично адаптирован к свету, но серые, когда он полностью приспособился к темноте?

**ОТВЕТ** • Везде, где изображение красных объектов попадает на сетчатку, свет активирует колбочки, ответственные за обнаружение красного света. Нервные пути, ведущие от этих колбочек, лежат рядом с путями, связанными с палочками, расположенными в другом месте сетчатки. По-видимому, возбуждение путей от колбочек стимулирует пути, ведущие к мозгу от палочек, и мозг вводит в заблуждение, думая, что палочки тоже освещены. Поскольку эти палочки

располагаются на сетчатке по дуге, мозг воспринимает их возбуждение как светящуюся дугу.

Мы видим дуги синего цвета, если часть колбочек все еще посылает в мозг сигналы желтого цвета, оставшиеся от предыдущего воздействия, когда свет в комнате не был выключен. Восприятие синего цвета развивается следующим образом: красный свет попадает на колбочки на сетчатке и активирует их. Нервные пути от этих колбочек активируют нервные пути, связанные с палочками в дуге, которую вы видите. Эти активированные пути от палочек подавляют желтый сигнал от колбочек, расположенных вдоль этой дуги.

Желтый и синий — это пара так называемых *оппозитных цветов*, потому что, когда передача желтого подавляется, мозг воспринимает синий цвет. Таким образом, когда нервные пути палочек подавляют передачу желтого цвета от колбочек, расположенных вдоль дуги, мозг воспринимает дуги как синие. Позже, когда эти колбочки становятся неактивными (глаза адаптируются к темноте), палочкам уже нечего подавлять, и дуга воспринимается как серая.

#### 7.45 • ПЯТНО МАКСВЕЛЛА

Посмотрите через желтый фильтр на белый лист бумаги. Затем быстро замените этот фильтр на синий. Вы сразу увидите пятно Максвелла — маленькое темное или желтое пятно, лежащее на линии зрения. Вы сможете увидеть это пятно, используя и другие пары цветных фильтров, но обязательно второй фильтр из этой пары должен пропускать больше синего света, чем первый. Почему возникает пятно Максвелла?

**ОТВЕТ** • Возможное объяснение происхождения пятна Максвелла заключается в том, что фоторецепторы-палочки влияют на информацию о цвете, отправляемую в мозг фоторецепторами-колбочками. Когда вы первый раз смотрите на белую бумагу через желтый фильтр, желтый свет, входящий в глаз, активирует колбочки и всю остальную зрительную систему, которая отвечает за восприятие желтого света.

Сразу после того как вы заменяете желтый фильтр на синий, эти колбочки все еще остаются активными. И уже когда синий свет попадет в глаза, другие колбочки начинают посылать сигналы о синем цвете в мозг. Но и палочки также реагируют на синий свет, причем больше, чем на желтый. Хотя они не могут отправить в мозг сигналы о цвете (они посылают только сигналы о яркости), их активация может подавлять желтый

сигнал от колбочек, которые все еще активированы предыдущей засветкой желтым светом.

Желтый и синий называются *оппозитными цветами*, потому что, когда передача желтого подавлена, мозг воспринимает синий цвет. Таким образом, когда палочки препятствуют передаче сигнала о желтом цвете из колбочек, мозг «видит» синий цвет. Так как он еще получает сигнал о синем цвете и от других колбочек, которые активируются синим светом, теперь глазу синий свет кажется ярче, чем он есть на самом деле.

Поскольку в центральной глазной ямке (участке сетчатки, в который упирается линия зрения) нет палочек, добавочный синий цвет ею не воспринимается. По контрасту с остальной сетчаткой центральная ямка воспринимается желтой из-за того, что желтый — оппозитный цвет к синему. Эта кажущаяся окраска и есть пятно Максвелла.

#### 7.46 • ВИЗУАЛЬНЫЕ ОЩУЩЕНИЯ ОТ ИЗЛУЧЕНИЯ

Находясь в космосе, космонавты сообщали о том, что, когда глаза адаптировались к темноте, они видели вспышки света в виде точек, звезд или двойных звезд, а иногда вспышки заполняли большую часть поля зрения. Эти картины порождались космическими лучами, проходящими через глаза космонавтов. Космические лучи — это частицы, в основном протоны, образующиеся в космическом пространстве и обычно летящие с огромными скоростями.

Подобные картины наблюдались и в исследовательских лабораториях, когда быстрые частицы направлялись в глаз испытуемого. Как образуются эти вспышки? Сталкиваются ли эти частицы непосредственно с фоторецепторами сетчатки, заставляя их передавать сигналы в мозг, или они создают свет внутри глаза, который затем улавливается фоторецепторами? Могут ли подобные вспышки увидеть альпинисты в высоких горах или пассажиры самолетов?

**ОТВЕТ** • Вспышки, наблюдаемые космонавтами, могут быть вызваны светом, испускаемым при пролете чрезвычайно быстрых частиц через стекловидное тело (прозрачная среда, заполняющая глазное яблоко) и сетчатку. Скорости частиц превышают скорость распространения света в глазу (она меньше скорости распространения света в вакууме в  $n$  раз, где  $n$  — показатель преломления), в результате в стекловидном теле может возникнуть так называемое *черенковское излучение*, которое и регистрируется фоторецепторами

на сетчатке. В 1958 году Павел Черенков, Игорь Тамм и Илья Франк были удостоены Нобелевской премии по физике с формулировкой: «За открытие и истолкование эффекта Черенкова».

Такие вспышки света наблюдались в экспериментах, когда высокоскоростные *мюоны* (частицы, похожие на электроны, но в 207 раз более тяжелые) направлялись в глаз испытуемого. Кроме того, частицы, даже медленные, могут создавать вспышки, если они сталкиваются непосредственно с фоторецепторами на сетчатке. Но никто не рассказывал о том, что видел вспышки света во время полетов в самолете, даже на полярных маршрутах на большой высоте, где из-за большой широты облучение выше.

#### 7.47 • КРАСНЫЙ СВЕТ НА ПАНЕЛЯХ УПРАВЛЕНИЯ

Почему ночью панель управления на капитанском мостике корабля обычно подсвечивается темно-красным светом, то есть светом с длиной волны на красном краю видимого спектра?

**ОТВЕТ** • Несмотря на то что фоторецепторы-колбочки плохо функционируют в условиях слабой освещенности, фоторецепторы-палочки такой свет уловить могут. Однако, чтобы видеть при очень слабом свете, нужно дать возможность палочкам адаптироваться к темноте, то есть выключить свет не меньше чем на 10 минут, и тогда они станут максимально чувствительными к источникам слабого света. Поскольку палочки не активируются светом на красном краю видимого спектра, ночью панели управления обычно подсвечиваются именно красным светом. Когда капитан смотрит на панель управления, колбочки могут активироваться, а палочки нет. Таким образом, палочки готовы к тому, чтобы капитан в любой момент в темноте мог разглядеть опасность.

#### 7.48 • РЕНТГЕНОВСКОЕ ЗРЕНИЕ СУПЕРМЕНА

Герой комиксов Супермен с помощью испускаемых из глаз рентгеновских лучей может видеть то, что происходит за сплошной стеной. Здесь мы не будем обсуждать, могут ли глаза испускать рентгеновские лучи, а сосредоточимся на более легком вопросе: можно ли обнаружить что-то или кого-то, находящегося за стеной, с помощью рентгеновских лучей?

**ОТВЕТ** • Чтобы Супермен смог уловить лучи, идущие обратно к нему, скажем, от преступника, находящегося по ту сторону стены, преступнику нужно отражать

лучи. Но это означает, что стена тоже будет отражать лучи. Вы можете сказать, что любой материал может частично пропускать, а частично отражать лучи. Тогда часть лучей пройдет через стену, часть прошедших лучей отразится от преступника, и после того как немногие сохранившиеся лучи пройдут обратно через стену, они наконец достигнут Супермена. Беда в том, что оставшихся лучей будет так мало, что они будут маскироваться множеством лучей, отраженных стеной и всеми объектами, окружающими преступника со всех сторон. Даже если Супермен сможет каким-то чудом мысленно обработать все лучи и на фоне всех шумов выделить изображение преступника, все еще останется существенная проблема: как глаза Супермена смогут поглотить лучи, если их так легко отразить и пропустить? Наконец, рентгеновское излучение вообще не отражается от материалов, разве что при почти скользком падении... Я, конечно, понимаю, что комиксы лучше читать, а не анализировать.

#### 7.49 • ИЛЛЮЗИЯ ФЕЙЕРВЕРКОВ

Если в безветренную темную ночь выстрелить петардой строго вверх, горящие обломки при взрыве должны разлететься равномерно по всем направлениям в горизонтальной плоскости. Почему тогда кажется, что все обломки летят к вам?

**ОТВЕТ** • Детали этой иллюзии пока не объяснены. Однако можно предположить, что жизненный опыт создает предпосылки для нее: когда вы смотрите практически на любой трехмерный объект, вы всегда можете разглядеть детали на ближайшей его стороне, но редко — на дальней стороне. Таким образом, в темную ночь множество разлетающихся горящих обломков без каких-либо подсказок о расстоянии до них, например в виде фона из облаков, будет восприниматься как детали ближайшей стороны расширяющегося невидимого объекта.

#### 7.50 • ВЗГЛЯД НА ПОТОЛОК

Лягте на спину в центре комнаты, в которой есть дверной проем, а на потолке висит светильник. Если посмотреть на потолок в сторону ног, потолочный светильник и дверной проем выглядят нормально. Но если вы закинете голову назад и посмотрите на потолок в противоположном направлении, у вас возникнет странное ощущение, что вы смотрите на потолок сверху вниз, как будто можете пройти по нему. Кажется,

что потолочный светильник растет снизу вверх, а дверной проем как будто образует препятствие, через которое вам придется перешагнуть. Что порождает эту иллюзию? Увидите ли вы то же самое, если посмотрите на потолок, стоя на голове?

**ОТВЕТ** • В опубликованных исследованиях этой иллюзии говорится, что когда вы лежите на спине, для вас верх и низ меняются местами, потому что у вас уже нет обычных подсказок относительно направления вверх и вниз со стороны силы тяжести. Обычно все,

что вы видите в нижней половине вашего поля зрения, находится внизу, а все, что в верхней половине поля зрения, —верху. Если вы, лежа на спине, мысленно поменяете верх с низом, потолок, который находится со стороны ваших ног, будет в нижней половине вашего поля зрения, но будет восприниматься как «верх», а другая сторона потолка, находясь в верхней половине вашего поля зрения, будет восприниматься как «низ». Если вы встанете на голову, иллюзия не возникнет, вероятно, потому, что у вас в этом случае будут сильные подсказки со стороны силы тяжести о том, где верх, а где низ.

