

Оглавление

От автора	10	1.31	Осадные орудия	32	1.65	Игрушка-пружинка слинки	54	
Предисловие	12	1.32	Люди — пушечные ядра	32	1.66	Наклонная башня	54	
Глава 1		1.33	Броски мяча в баскетбольную корзину	33	1.67	Падающая пизанская башня	56	
Механика твердых тел		1.34	Короткая история. Рекордные штрафные броски	34	1.68	Эффект домино	56	
<i>Между каплями дождя</i>	13	1.35	Зависание в баскетболе и балете	34	1.69	Падающие трубы, карандаши и деревья	57	
1.1	Бежать или идти под дождем?	13	1.36	Секреты игры в гольф	35	1.70	Почему ломаются заточенные карандашные грифели	58
1.2	Колонны автомобилей и транспортный коллапс	13	1.37	Короткая история. «Занавес смерти» при падении метеорита	35	1.71	Обрушение моста	59
1.3	«Волны трафика» на автостраде	14	1.38	Прыжки в длину и высоту	36	1.72	Крушение поезда	60
1.4	Минимальная дистанция между машинами при буксировке	15	1.39	Мексиканские прыгающие бобы	38	1.73	Удары в боулинге	60
1.5	Проезд на желтый свет	15	1.40	Кувырки жуков-щелкунов и атаки раков-богомолов	38	1.74	Удары в американском и других бильярдах	61
1.6	Закручивание автомобиля при экстренном торможении	15	1.41	Короткая история. Рекордный вес взят	39	1.75	Мини-гольф	62
1.7	Скользить или не скользить	16	1.42	Соударения в цепочке шаров и игрушка «мятник Ньютона»	39	1.76	Фокусы с мячиком-попрыгунчиком	63
1.8	Торможение юзом	17	1.43	Падение нескольких мячей	41	1.77	Короткая история. Спорный мяч	64
1.9	Короткая история. Рекордные тормозные пути	18	1.44	Короткая история. Разорительный фокус	42	1.78	Теннис	64
1.10	Почему дятлам и толсторогим баранам не грозит сотрясение мозга	19	1.45	Карате	42	1.79	Велосипеды и мотоциклы	65
1.11	Короткая история. Рекордные ускорения	19	1.46	Бокс	43	1.80	Длинные прыжки на мотоцикле	66
1.12	Лобовые столкновения автомобилей	20	1.47	Падение галерей	44	1.81	Скейтборды	66
1.13	Короткая история. Представление с участием локомотивов	20	1.48	Обрушение башен-близнецов	44	1.82	Метание подков	67
1.14	Удар сзади и травма шейных позвонков	20	1.49	Падения с высоты со счастливым концом	45	1.83	Кручение хула-хупа и лассо	68
1.15	Повороты на гоночном автомобиле	21	1.50	Спасительный прыжок с парашютом	45	1.84	Игрушка йо-йо	68
1.16	Дорожки для спринта	21	1.51	Падение кошек с высоты	46	1.85	Раскручивание йо-йо	69
1.17	Иллюзия задирания носа самолета при взлете	21	1.52	Прыжки с тарзанкой и «банджи-джампинг»	46	1.86	На автомобиле со сверхзвуковой скоростью	70
1.18	Короткая история. Рейс 143 «Эйр Канада»	22	1.53	Постараться выжить в падающем лифте	47	1.87	Короткая история. Взрыв на центрифуге	71
1.19	Страх и ужас в парке аттракционов	23	1.54	Короткая история. Как бомбардировщик протаранил Эмпайр-стейт-билдинг	47	1.88	Как выбраться из перевернутого каяка	71
1.20	Короткая история. Цирковые трюки «чертова петля»	24	1.55	Падения в борьбе, приземление при парашютировании	48	1.89	Кёрлинг	71
1.21	Как поймать высокий мяч в бейсболе?	25	1.56	Ложе факира	48	1.90	Канатоходцы	72
1.22	Короткая история. Мячи, сброшенные с высоты	26	1.57	Висячие ложки	49	1.91	Как удержаться на спине быка	72
1.23	Удары в бейсболе	27	1.58	Следы от камней	49	1.92	Проблемы с туалетной бумагой	73
1.24	Разрешенные передачи в регби	28	1.59	Узлы	49	1.93	Скачущие камни и бомбы	73
1.25	Жонглирование	29	1.60	Лазанье по скалам	50	1.94	Вращение на льду	74
1.26	Прыжки с шестом	29	1.61	Как бегают по скалам снежные бараны	52	1.95	Вращение книги	75
1.27	Атлатль и жабий язык	29	1.62	Перемещение истуканов по острову Пасхи	52	1.96	Падающая кошка, кувырки космонавтов и акробатические прыжки в воду с вышки	75
1.28	Праща	30	1.63	Древние сооружения Стоунхенджа	52	1.97	Четверное сальто	77
1.29	Томагавки	31	1.64	Как поднимали каменные блоки при строительстве египетских пирамид	53	1.98	Падающий бутерброд	77
1.30	Болас	31				1.99	Балет	78
						1.100	Повороты на лыжах	78
						1.101	Как проползти по скользкому льду	80
						1.102	Короткая история. Последовательность вращений имеет значение	80
						1.103	Волчки тоже бывают разные	80
						1.104	Короткая история. Непослушный чемодан	82
						1.105	Китайский волчок	82

- 1.106 Вращение яйца 82
- 1.107 Диаболо 82
- 1.108 Кельтские камни, или «кельты» 83
- 1.109 Крутящиеся монетки и бутылки 84
- 1.110 Дзюдо, айкидо и олимпийская борьба 84
- 1.111 Вращение пули и длинные пасы в американском футболе 85
- 1.112 Раскачивание детских качелей 86
- 1.113 Гигантское кадило 86
- 1.114 Маятник в колодце 87
- 1.115 Перевернутый маятник и одноколесный велосипед 87
- 1.116 Ношение тяжестей на голове 88
- 1.117 Ношение тяжестей на гибких шестах 88
- 1.118 Связанные маятники 89
- 1.119 Пружинный маятник 90
- 1.120 Молчаливый колокол 91
- 1.121 Эффект спагетти 91
- 1.122 Паук и муха 92
- 1.123 Колебания пешеходного моста и пола танцзала 93
- 1.124 Балансирующие конструкции и камни 93
- 1.125 Как затонула ядерная подводная лодка «Курск» 94
- 1.126 Как песчаный скорпион обнаруживает жертву 95
- 1.127 Снежные волны 96
- 1.128 Волна на футбольном стадионе 96
- 1.129 Бронезилет 96
- 1.130 Парадокс лучника 97
- 1.131 Колеблющиеся растения 97
- 1.132 Колебания высоких зданий 97
- 1.133 Прыжки в воду с пружинящего трамплина 98
- 1.134 Метание блесны 98
- 1.135 Битва за Фолклендские острова и Большая Берта 99
- 1.136 Джек и бобовый стебель, дотянувшийся до космоса 100
- 1.137 Весенняя лихорадка и яйца, стоящие вертикально 100
- 1.138 Лунное безумие 101
- 1.139 Притягивающий холм 101
- 1.140 Падение через центр Земли 102
- 1.141 Растяжение пластиковых пакетов 103
- 1.142 Мостовая гигантов и колонны из крахмала 103
- 1.143 Ломающиеся ногти 104
- 1.144 Смятая в шарик бумага 104
- 1.145 Примеры расширения при взрыве 104
- 1.146 Почему висящая на стене картина перекашивается? 105
- 1.147 Фокус с двумя пружинами 105
- 1.148 Устойчивость банки с лимонадом 105
- 1.149 Маятник Уилберфорса 106
- 1.150 Подготовка к гонкам драг-рейсинг 106
- 1.151 Повернуть или остановиться 106
- 1.152 Проскочить мимо автобуса 107
- 1.153 Давление в липкой ленте 107
- 1.154 Бобслейная трасса с поворотами 108
- 1.155 Кольцо на колеблющемся стержне 108
- 1.156 Дом Маленького принца 108
- 1.157 На парашюте с тыквой 109
- 1.158 Как вытащить бьющуюся рыбу 109
- 1.159 Вращающееся кольцо 109
- 1.160 Пропеллер на палочке с вырезами 110
- 1.161 Толкание ядра и бросание молота 110
- 1.162 Прыжки при спуске с горы на лыжах 111
- 1.163 Как вытащить скатерть из-под тарелок 111
- 1.164 **Короткая история.** Перетаскивание вагонов зубами 111
- 1.165 Подпрыгивающий стул 111
- 1.166 Как поднять человека при помощи пальцев 111
- 1.167 Ракеты и санки 112
- 1.168 **Короткая история.** С Земли на Венеру 113
- 1.169 Выбор молотка 113
- 1.170 Клапан скороварки 113
- 1.171 Скольжение линейки по пальцам 113
- 1.172 **Короткая история.** Неудавшийся рекорд по перетягиванию каната 114
- 1.173 Стрельба вдоль склона 114
- 1.174 Как трогаться с места на скользкой дороге 114
- 1.175 Балансировка колес 114
- 1.176 Игра «Попади в бутылочку» 115
- 1.177 Разобьется или не разобьется бокал? 115
- 1.178 Почему сломается сверло? 116
- 1.179 Качающиеся часы 116
- 1.180 **Короткая история.** Мост «Золотые Ворота»: испытание на прочность 116
- 1.181 Рыскание железнодорожных вагонов 116
- 1.182 Колебания антенны автомобиля 117
- 1.183 Корабли и успокоительные цистерны 117
- 1.184 Неровности на дорогах 118
- 1.185 Почему нам видна только одна сторона Луны? 118
- 1.186 Искусственные спутники 118
- 1.187 Как сопротивление воздуха ускоряет спутник 118
- 1.188 Полет к Луне «по восьмерке» 119
- 1.189 Кто сильнее притягивает Луну — Земля или Солнце? 119
- 1.190 Гравитационная праща 119
- 1.191 Составление топографической карты Индии 119
- 1.192 Бритъе двойным лезвием 119
- 1.193 Размыв берегов рек 120

Глава 2

Механика жидкостей и газов

Гонки по потолку, плавание в сиропе 121

- 2.1 Гоночный автомобиль на потолке 121
- 2.2 Сила тяги 122
- 2.3 Аэродинамика несущихся мимо поездов 122
- 2.4 Обрушение старого моста через Такома-Нэрроуз 123
- 2.5 Аэродинамика строений 123
- 2.6 Воздушные змеи 124
- 2.7 Прыжки на лыжах с трамплина 125
- 2.8 Скорость горнолыжника 125
- 2.9 Бумеранги 126
- 2.10 Бросаем карты 126
- 2.11 Вращающиеся семена 127
- 2.12 Летящие змеи 127
- 2.13 Аэродинамическое сопротивление при полете теннисных мячей 128
- 2.14 Футбольный мяч, огибающий стенку 128
- 2.15 Аэродинамика мячика для игры в гольф 129
- 2.16 Аэродинамика бейсбола 130
- 2.17 Аэродинамика крикета 130
- 2.18 Стая птиц, летящая клином 131
- 2.19 С какой скоростью можно плавать в сиропе? 131
- 2.20 Конденсационные следы 132
- 2.21 Почему втягивается занавес душевой кабинки 132
- 2.22 Луговые собачки и гигантские муравейники 133
- 2.23 Вихри в ванной 133
- 2.24 Вихри в чашечке кофе 134
- 2.25 Скопление чайнок в чае, кружение оливки в мартини 135
- 2.26 Извилистые (меандрические) реки 135
- 2.27 Птица, вертящаяся в воде 136
- 2.28 Вода, поднимающаяся по вращающемуся яйцу 136
- 2.29 Вода, образующая круг в раковине 136
- 2.30 Уровень воды в канале 137
- 2.31 Солитоны 137
- 2.32 Приливные волны 138
- 2.33 Приливы и отливы 138
- 2.34 Приливы в заливе Фанди 139
- 2.35 Мертвая вода 139

- 2.36 Торнадо 140
- 2.37 **Короткая история.** Как выглядит торнадо изнутри 141
- 2.38 Водяные смерчи и облачные рукава 141
- 2.39 Пыльные вихри, вихри в тумане, туманные вихри 141
- 2.40 Круговые вихри 142
- 2.41 Сифоны и туалеты 143
- 2.42 Бегающие по воде шлемоносные василиски 144
- 2.43 Свинцовый брусок, плавающий в лодке 144
- 2.44 Плавающие бруски и открытые контейнеры 145
- 2.45 Дыра в дамбе и корабль в сухом плавуем доке 145
- 2.46 Обмороки летчиков при перегрузках 146
- 2.47 Кровообращение змей, жирафов и высоких динозавров 146
- 2.48 Плавали ли зауроподы? 147
- 2.49 Гастролиты у динозавров и крокодилов 147
- 2.50 Эффект Коанда 147
- 2.51 Эффект чайника 148
- 2.52 Всплытие после глубоководного погружения 149
- 2.53 Как люди и слоны плавают под водой 149
- 2.54 Глубоководное погружение и как спастись из подводной лодки 150
- 2.55 Трагедия на озере Ниос 151
- 2.56 **Короткая история.** Прыжок через дом и планирование в шезлонге 151
- 2.57 Течение стекла в окне средневекового собора 152
- 2.58 Странные вязкие жидкости 153
- 2.59 Суп, вращающийся в обратную сторону 154
- 2.60 Скачущая струйка жидкости 154
- 2.61 Жидкость, взбирающаяся по стержню 154
- 2.62 Бухта жидкого каната 155
- 2.63 Волны на воде 155
- 2.64 Гигантские одиночные волны и волны-убийцы 155
- 2.65 Волны, разворачивающиеся к берегу 156
- 2.66 Волны, прошедшие через сужение 156
- 2.67 Сейши и разлитая вода 157
- 2.68 Кильватерный след от уток и авианосцев 158
- 2.69 Серфинг 159
- 2.70 Движение морских свинок и дельфинов 159
- 2.71 Краевые волны 160
- 2.72 Плажевые фестоны 161
- 2.73 Масло и волны 161
- 2.74 Парящие капли 161
- 2.75 Разбрызгивающиеся капли 162
- 2.76 Пузырьки в газированной воде, пиве и шампанском 164
- 2.77 Мыльные пузыри и пивная пена 165
- 2.78 Лопающиеся пузырьки 167
- 2.79 Киты и сети из пузырей 167
- 2.80 Водомерки 167
- 2.81 Бусинки на прутике и на нити из слюны 168
- 2.82 Сбор дождевой воды ящерицами в пустыне 169
- 2.83 Как кормятся кулики 169
- 2.84 Капли и жидкие пленки на твердой поверхности 170
- 2.85 Притягивающиеся кукурузные хлопья 171
- 2.86 Замки из песка 171
- 2.87 Внешний вид плохого кофе 172
- 2.88 «Слезы» вина и другие игры жидких поверхностей 172
- 2.89 Узор на ликере «Тиа Мария» 173
- 2.90 Узоры на кофе и других жидкостях 173
- 2.91 Узоры на пятнах от кофе и кофейной гуще 175
- 2.92 Фигуры дыхания 175
- 2.93 Эффект лотоса 176
- 2.94 Тля и жидкий мрамор 177
- 2.95 Кисти, мокрые волосы и печенье к чаю 177
- 2.96 Картошка фри 177
- 2.97 Как утки выходят из воды сухими или почему «как с гуся вода» 178
- 2.98 Половинка картофелины, птичий помет и автомобиль 178
- 2.99 Катапульта для грибных спор 179
- 2.100 Волны на льющейся струйке воды 179
- 2.101 Водяные колокола, пленки и цепочки 180
- 2.102 По мокрому пляжу и зыбучему песку 180
- 2.103 Разрушение зданий и шоссе 181
- 2.104 **Короткая история.** Зыбучее зерно 182
- 2.105 Людской поток, и как избежать паники 182
- 2.106 Кучка песка и самоорганизующийся поток 183
- 2.107 Течение в песочных часах и элеваторах 184
- 2.108 Эффект бразильского ореха и колебания порошка 185
- 2.109 Лавинный шар 186
- 2.110 Песчаная рябь и движение 186
- 2.111 Песчаные дюны 187
- 2.112 Ярданги и выветривание песка 188
- 2.113 Снегозащитные сооружения и золотые отложения 189
- 2.114 Снежные лавины 189
- 2.115 Оползни длинного выхода 190
- 2.116 Камнепады 190
- 2.117 Развевающиеся флаги и ленты 191
- 2.118 Развевающиеся фонтаны и грохочущие водопады 191
- 2.119 Пульсирующие фонтаны 192
- 2.120 Разливаем жидкости: перевернутый стакан и ярд для эля 192
- 2.121 Капля за каплей 193
- 2.122 Шоу мыльных пузырей 194
- 2.123 Траектории пузырей 194
- 2.124 Антипузырьки 195
- 2.125 Рис на палочке 195
- 2.126 Метание диска 196
- 2.127 Метание копья 196
- 2.128 Две сближающиеся лодки 197
- 2.129 Аэродинамика кабелей и проводов 197
- 2.130 Скимборд — доска для катания на мелкой воде 197
- 2.131 Подъемная сила при повороте за угол 198
- 2.132 Отражение волн песчаными отмелями 198
- 2.133 Дождь и волны 199
- 2.134 Соляной маятник 199
- 2.135 Солевые пальцы и солевой фонтан 200
- 2.136 Как жидкость поднимается по стволам деревьев 201
- 2.137 Ветровые полосы на воде 201
- 2.138 Улицы облаков и полосы лесных пожаров 201
- 2.139 Упаковка M&M's 202
- 2.140 Груда яблок 202
- 2.141 Узоры из порошка 202
- 2.142 Гидравлический осциллятор 203
- 2.143 Масляные капли,двигающиеся в глицерине 203
- 2.144 Шар в струе воздуха 204
- 2.145 Корабль Флеттнера 204
- 2.146 Гибралтарский пролив, Мессинский пролив и Сицилийский пролив 204
- 2.147 Разбрызгивание гранул 205
- 2.148 Небольшая морщинка на текущей воде 205
- 2.149 Извивающиеся тонкие струйки 205
- 2.150 Сбритые волоски и лодка на камфаре 206
- 2.151 Масляные пятна на дорогах 207
- 2.152 Капли воды и узоры на глицерине 207
- 2.153 Лучики оливкового масла на покрытой тальком воде 207
- 2.154 Осциллятор из куриного жира 208

Глава 3

Акустика

Шорохи и звуки в ночной тишине 209

- 3.1 Завывание ветра 209
- 3.2 Гудение телефонных проводов и шелест сосновых иголок 209
- 3.3 Свист и свистки 210
- 3.4 Речь и пение 211
- 3.5 Как гелий меняет голос 212
- 3.6 Горловое пение 212
- 3.7 Храп 213
- 3.8 Мурлыканье и рычание 213
- 3.9 **Короткая история.** Рев динозавра-паразавролофа 214
- 3.10 Рычащий тигр, трубящий слон 214
- 3.11 Кваканье лягушки-быка 214
- 3.12 Сверчки и лангусты 215
- 3.13 Как лягушка исполняет мелодию на дереве, а сверчок — в норке 215
- 3.14 Атаки австралийских цикад 215
- 3.15 Голоса пингвинов 216
- 3.16 Щелчки китов 216
- 3.17 Отраженный тон 216
- 3.18 Звуки, распространяющиеся на большие расстояния 217
- 3.19 Акустическая тень 218
- 3.20 Прослушивание советских подлодок 219
- 3.21 Мегафон и сирена 219
- 3.22 Где можно услышать шепот 220
- 3.23 Эффект Доплера 220
- 3.24 Как насекомоядные летучие мыши находят насекомых 221
- 3.25 Как растительноядные летучие мыши находят цветок 222
- 3.26 Распространение звука под водой 223
- 3.27 Эффект дружеской вечеринки 223
- 3.28 Звук из ушей 224
- 3.29 Почему мы слышим музыку, которой нет 224
- 3.30 Как не оглохнуть, слушая громкую музыку 225
- 3.31 Усиление звука с помощью шума 226
- 3.32 Стетоскопы и звуки дыхания 226
- 3.33 Натяжение гитарных струн и растяжение резиновой ленты 226
- 3.34 Игра на скрипке 227
- 3.35 Мерцающее звучание скрипки 228
- 3.36 Морские раковины 228
- 3.37 Диджериду 229
- 3.38 Тряска и гудение силосной башни 229
- 3.39 Поющие гофрированные трубки 230
- 3.40 Музыкальная чашка 230
- 3.41 Резонанс в бутылке 231
- 3.42 Скрип и визг 232
- 3.43 Поющие винные бокалы 232
- 3.44 Можно ли голосом разбить винный бокал 233
- 3.45 Журчание ручейков и шелест дождя 233
- 3.46 Резонанс в вертикальном сосуде 233
- 3.47 Урчание водопроводных труб 234
- 3.48 Хруст в суставах 234
- 3.49 Тоны Короткова 234
- 3.50 Атака раков-убийц 235
- 3.51 Шум закипающей воды 235
- 3.52 Звуки при пережевывании пищи 236
- 3.53 Снэп, Крэкл и Поп 236
- 3.54 Грохот, издаваемый самолетами и пулями 237
- 3.55 Громкие хлопки в железнодорожных тоннелях 238
- 3.56 Гром 238
- 3.57 Бронтиды — таинственные громopodobные звуки 239
- 3.58 Камнепад и лесоповал 240
- 3.59 Щелканье кнута и удар мокрым полотенцем 240
- 3.60 Кашель и чихание 241
- 3.61 Акустика комнат и концертных залов 241
- 3.62 Галереи шепотов в различных сооружениях 242
- 3.63 Галерея шепотов в соборе Святого Павла 242
- 3.64 Эхо от стен, углов и лесов 243
- 3.65 «Музыкальное» эхо при отражении от заборов и лестниц 244
- 3.66 **Короткая история.** Звуковые эффекты в древних сооружениях 244
- 3.67 Пение в душе 245
- 3.68 Шумный сосед 245
- 3.69 Поющие и скрипящие пески 245
- 3.70 Потрескивающий лед и шипящие айсберги 246
- 3.71 Прохождение звука через снег 246
- 3.72 Звук шагов по снегу 246
- 3.73 «Можно ли услышать форму барабана?» 247
- 3.74 Инфразвук 247
- 3.75 Шелест на пшеничных полях 248
- 3.76 Щелчки натягиваемой ткани 248
- 3.77 Пение водоотводных труб 248
- 3.78 Свисты игрушки-пружинки-слинки 249
- 3.79 Ружейные выстрелы в районах вечной мерзлоты 249
- 3.80 Шум полярного сияния и сгорающих метеоритов 250
- 3.81 Австралийская гуделка 250

Глава 4

Термодинамика

Ночью охота идет за теплым 251

- 4.1 Мертвые гремучие змеи 251
- 4.2 Жуки, сигнализирующие о пожаре 251
- 4.3 Пчелы, убивающие шершней 251
- 4.4 Скучивание животных 252
- 4.5 Выход в космос без скафандра 252
- 4.6 Капли на горячей сковородке, пальцы в расплавленном свинце 252
- 4.7 **Короткая история.** Ужасный глоток 254
- 4.8 Хождение по раскаленным углям 254
- 4.9 **Короткая история.** Рассказы об огнехождении 255
- 4.10 Замерзшая и переохлажденная вода 256
- 4.11 Как правильно есть морской лед 256
- 4.12 Скорость остывания горячей и теплой воды 257
- 4.13 Небо, замораживающее воду 258
- 4.14 Как спасти заготовленные на зиму овощи с помощью бочки с водой 258
- 4.15 Чтобы фруктовый сад не вымерз, его нужно полить 258
- 4.16 Что будет, если в сильный мороз плеснуть вверх горячей водой? 259
- 4.17 Сосульки 259
- 4.18 Ледяной затор на крыше 260
- 4.19 Иней и наледь на проводах 260
- 4.20 Ледяные шипы и другие образования из льда 261
- 4.21 Мутные кубики льда 262
- 4.22 Фигуры внутри тающего льда 262
- 4.23 Замерзание прудов и озер 263
- 4.24 Как замерзают газированные напитки 263
- 4.25 Лопачущиеся трубы 264
- 4.26 Что будет, если дотронуться или лизнуть холодную трубу? 265
- 4.27 Ухабы зимой и пинго в зонах вечной мерзлоты 265
- 4.28 Мерзлотные полигоны в Арктике 266
- 4.29 Камни, растущие в саду, и узоры на земле 266
- 4.30 Борозды от валунов 267
- 4.31 **Короткая история.** Бомба из дохлой кошки и исчезновение путем замораживания 267
- 4.32 Форма снежинок 268
- 4.33 Катание на лыжах 268
- 4.34 Катание на коньках и игра в снежки 269

- 4.35 Прогулки по льду 269
- 4.36 Иглу 269
- 4.37 Снежные рулоны 270
- 4.38 Снежные лавины 270
- 4.39 Узоры из тающего снега 271
- 4.40 Зачем посыпать солью лед на тротуаре? 271
- 4.41 Домашнее мороженое 271
- 4.42 Пьем горячий кофе, едим горячую пиццу 272
- 4.43 Кипятим воду 273
- 4.44 Как варить яйцо 273
- 4.45 Как готовить в печке или на открытом огне 274
- 4.46 Как готовить на костре 275
- 4.47 Как приготовить пиццу 275
- 4.48 Почему в микроволновке можно разогреть обед? 276
- 4.49 Как жарить кукурузные зерна 277
- 4.50 Как готовить яичницу-болтунью 278
- 4.51 Гейзеры и кофейный перколятор 278
- 4.52 Игрушка «паровая лодочка» 279
- 4.53 Тепловые эффекты и длина 280
- 4.54 Разрушение железнодорожной цистерны 280
- 4.55 Как на веревке сохнет белье 281
- 4.56 Теплое пальто 281
- 4.57 Теплые растения 282
- 4.58 Шерсть белого медведя 282
- 4.59 Черная одежда и черные овцы в пустыне 282
- 4.60 Скорость остывания чашки кофе 283
- 4.61 Холодная вода в пористом глиняном кувшине 283
- 4.62 Пьющая птичка 284
- 4.63 Короткая история. Большие пьющие птицы 285
- 4.64 Тепловая трубка и картофельные колючки 285
- 4.65 Запотевшие зеркала 286
- 4.66 Запотевание стекол очков 286
- 4.67 Как можно запастись водой в пустыне 287
- 4.68 Трещины на грязи 288
- 4.69 Вздувшиеся упаковки в самолете 289
- 4.70 Выдуваем пузыри и надуваем воздушные шары 289
- 4.71 Как печь пироги в горах 290
- 4.72 Шампанское в тоннеле 290
- 4.73 Короткая история. Язык в бутылке 291
- 4.74 Гроза зимой 291
- 4.75 Дым из трубы 292
- 4.76 Дымовые сигналы и грибовидное облако 293
- 4.77 Огонь в камине 294
- 4.78 Пламя свечи 295
- 4.79 Как потушить пожар, заливая его водой 296
- 4.80 Как потушить растительное масло 296
- 4.81 Травяные и лесные пожары 297
- 4.82 Огненный смерч 297
- 4.83 Поддержание нужной температуры в муравейниках и зданиях 298
- 4.84 Почему нагреваются оранжереи и закрытые машины 298
- 4.85 Острова тепла 299
- 4.86 Термодинамика аптечной резинки 299
- 4.87 Фён и шинук 299
- 4.88 Испытание кипящей водой 300
- 4.89 Энергия в теплой комнате 300
- 4.90 Ориентация ледника 300
- 4.91 Игрушечный радиометр 301
- 4.92 Колодцы с водой и буря 301
- 4.93 «Столбы» из насекомых и рачков 301
- Глава 5**
Электричество и магнетизм
Сверкнула молния — жди грома! 303
- 5.1 Молния 303
- 5.2 Молнии, люди, коровы и овцы 304
- 5.3 Молния, автомобили и самолеты 306
- 5.4 Молния, деревья, башни и земля 306
- 5.5 Четочная и шаровая молния 307
- 5.6 Спрайты 307
- 5.7 Молниеотводы 308
- 5.8 Свитера, детские пластиковые горки и операционные 309
- 5.9 Автомобили, бензонасосы и остановки в пути 310
- 5.10 Короткая история. Искрометная жевательная резинка 311
- 5.11 Чем опасен распыленный в воздухе порошок 311
- 5.12 Чем опасны аэрозольные баллончики 312
- 5.13 Чем опасны брызги воды 312
- 5.14 Свечение лыж 313
- 5.15 Катастрофа дирижабля «Гинденбург» 313
- 5.16 Воспламеняющаяся медицинская каталка 314
- 5.17 Свечение при оттаивании скотча 314
- 5.18 Петрушка, шалфей, розмарин и тимьян 315
- 5.19 Свечение винтергринового масла в темноте 316
- 5.20 Огни землетрясений 317
- 5.21 Огни святого Эльма и свечение в Андах 317
- 5.22 Высоковольтные линии передачи 317
- 5.23 Ток или напряжение: что опаснее для людей? 319
- 5.24 Короткая история. Несчастный случай 320
- 5.25 Использование тока в хирургии 320
- 5.26 Пожары и взрывы при хирургических операциях 320
- 5.27 Лимонная батарея и покалывание в зубе 321
- 5.28 Электрические скаты и угри 322
- 5.29 Как предметы заряжаются во время пыльной, снежной или песчаной бури? 323
- 5.30 Вулканические молнии 323
- 5.31 Заражение бактериями при хирургической операции 324
- 5.32 Пчелы и опыление 325
- 5.33 Короткая история. Огненные муравьи и электрическое оборудование 325
- 5.34 Пластиковая пищевая пленка 326
- 5.35 Муха на потолке, геккон на стене 326
- 5.36 Торт с меренгами (безе) 327
- 5.37 Соус беарнез 327
- 5.38 Магнетит 328
- 5.39 Магнитное поле Земли и археология 328
- 5.40 МРТ 329
- 5.41 Короткая история. Поиск пули в теле президента Гарфилда с помощью магнита 330
- 5.42 Магниты, татуировки и ювелирные украшения для тела 331
- 5.43 Сухие завтраки и коровьи магниты 331
- 5.44 Электрические гитары 331
- 5.45 Усилители электрогитары 332
- 5.46 Северное сияние (аврора) 333
- 5.47 Перебои с электричеством и вспышки на Солнце 333
- 5.48 Левитирующие лягушки 334
- 5.49 Шипение магнита 335
- 5.50 Токи, проходящие через вас на железнодорожной станции 335
- Глава 6**
Оптика
Все кругом, как радуга, цветное 337
- 6.1 Радуги 337
- 6.2 Странные радуги 339
- 6.3 Искусственные радуги 339
- 6.4 Почему днем небо светлое 340
- 6.5 Разноцветное небо 341
- 6.6 Голубые горы, белые горы, красные облака 342
- 6.7 Предупреждение морякам 342

- 6.8 Закаты и вулканы 342
- 6.9 Кольцо Бишопа 343
- 6.10 Контрастная облачная дуга 343
- 6.11 Цвет неба во время солнечного затмения 343
- 6.12 Небо позеленело — прячься в погреб 344
- 6.13 Почему на закате небо над головой синее 344
- 6.14 Темное пятно в розовом обрамлении, возникающее на закате 345
- 6.15 Яркие и темные лучи на небе 345
- 6.16 Голубая дымка, красная дымка, коричневый туман 346
- 6.17 Огни далекого города 346
- 6.18 Как далеко линия горизонта 346
- 6.19 Цвет неба при сплошной облачности 347
- 6.20 Карты в небе 347
- 6.21 Пошел снег — и посветлело 347
- 6.22 Где кончается луч прожектора 347
- 6.23 **Короткая история.** Ньюгрейндж: луч света в день зимнего солнцестояния 348
- 6.24 Зеленое свечение 348
- 6.25 Изменение формы солнца на закате 349
- 6.26 Красная луна при лунном затмении 349
- 6.27 Коронная вспышка 350
- 6.28 Оазисный мираж 350
- 6.29 Мираж в стене 351
- 6.30 Живущие в воде чудовища, водяные и громадные миражи 351
- 6.31 Призрак в цветах 353
- 6.32 Дрожание и мерцание звезд 353
- 6.33 Теневые полосы 354
- 6.34 22-градусное гало и солнечные собаки 355
- 6.35 Множество гало, дуг и пятен на небе 355
- 6.36 Тень горы 356
- 6.37 Исчезающие тени облаков 357
- 6.38 Цвет океана 357
- 6.39 Блестящие отражения солнца и луны 358
- 6.40 Кольца света 358
- 6.41 Тени и цвета на воде 358
- 6.42 Цвет тени 359
- 6.43 Почему мы видим темную часть Луны 360
- 6.44 Венец и оппозиционный эффект 360
- 6.45 Колосющаяся нива 362
- 6.46 Глория 362
- 6.47 Корона 363
- 6.48 Корона на замерзшем стекле 363
- 6.49 Радужные облака 363
- 6.50 Синяя луна 363
- 6.51 Желтые противотуманные фары 364
- 6.52 Почему мокрое темнее сухого 364
- 6.53 Цвет снега и льда 364
- 6.54 Фирновое зеркало и искрящийся снег 365
- 6.55 Белая мгла и снежная слепота 365
- 6.56 Желтые лыжные очки 366
- 6.57 Когда лед становится темным 366
- 6.58 Яркие облака и темные тучи 366
- 6.59 Серебряные облака 367
- 6.60 Отражение в зеркале 367
- 6.61 Отражение в воде и зеркало на сцене 368
- 6.62 Призрак Пеппера и голова без тела 368
- 6.63 Наклонные окна в пунктах управления полетом 369
- 6.64 Отражения в двух и трех зеркалах 369
- 6.65 Калейдоскопы 370
- 6.66 Зеркальные лабиринты 371
- 6.67 Сайд-шоу «Стрельба по мишени из лазера» 372
- 6.68 Темные треугольники между елочными шарами 373
- 6.69 Как блестящее становится черным, а белое — чернее черного 374
- 6.70 Светоотражатели 374
- 6.71 **Короткая история.** Как в темноте приземлиться в тылу врага 375
- 6.72 Одностороннее зеркало 375
- 6.73 Зеркало заднего вида 375
- 6.74 Зеркало бокового обзора 376
- 6.75 Бар в «Фоли-Бержер» 376
- 6.76 Картины эпохи Возрождения и оптические проекторы 377
- 6.77 Анаморфоз в искусстве 377
- 6.78 Где под уличными фонарями светлее 377
- 6.79 Многократные отражения от окон с двойными стеклами 378
- 6.80 Самый мощный прожектор в мире 378
- 6.81 Луч смерти Архимеда 379
- 6.82 **Короткая история.** Испепеляющие страсти 379
- 6.83 Призрачные огни на кладбище 380
- 6.84 Какой видит рыбу рыбак 380
- 6.85 Каким видит рыба рыбака 380
- 6.86 Как прочесть письмо в запечатанном конверте 381
- 6.87 **Короткая история.** Глотание шпаги и эзофагоскопия 382
- 6.88 Оптика дверцы душевой кабинки 383
- 6.89 Магия преломления 383
- 6.90 Человек-невидимка и прозрачные животные 384
- 6.91 Рефракция, изгибающая дорогу 385
- 6.92 Надо ли поливать растения на жарком солнце? 386
- 6.93 Можно ли зажечь костер с помощью льда? 386
- 6.94 Бриллианты 386
- 6.95 Опалы 387
- 6.96 Александритовый эффект 387
- 6.97 Звездчатый сапфир 387
- 6.98 Свет, прошедший через бокал с вином, окно и каплю воды 388
- 6.99 Тени с яркими границами и полосами 389
- 6.100 Яркие и темные полосы на крыле 390
- 6.101 **Короткая история.** Ударные волны от автомобиля Thrust SSC 391
- 6.102 Камеры пинхол и пинспек 391
- 6.103 Изображения солнца под деревом 392
- 6.104 Свет, падающий через оконную сетку; линии между пальцами 392
- 6.105 Яркие царапины и разноцветная паутина 393
- 6.106 Яркие полосы на ветровом стекле 394
- 6.107 Отражения от грампластинки 395
- 6.108 Разные цвета на предметах с мелким рельефом 396
- 6.109 Против подделок: оптико-переменные элементы 396
- 6.110 Цветные кольца на запотевшем или пыльном зеркале 397
- 6.111 Цвет молока в воде 398
- 6.112 Цвет дыма от костра 398
- 6.113 Эффект анисового ликера 398
- 6.114 Цвет масляных пятен, мыльной пленки и металлической кастрюли 399
- 6.115 Структурная окраска насекомых, рыб, птиц и обезьян 400
- 6.116 Жемчуг 402
- 6.117 Бугорки на глазах насекомых и самолеты-невидимки 402
- 6.118 Переливчатые растения 403
- 6.119 Против фальшивомонетчиков — цветопеременная краска 403
- 6.120 Насыщенный цвет лепестков 404
- 6.121 Сияние желтых листьев осины 404
- 6.122 Цвет глаз 405
- 6.123 Посинеть от холода 405
- 6.124 Узоры из пятнышек 405
- 6.125 Цвета при свете люминесцентной лампы 406
- 6.126 Поляризационные солнцезащитные очки 407
- 6.127 Поляризация света неба 408
- 6.128 Как муравей находит дорогу домой 409

6.129 Цветные пятна и поляризация 410
6.130 Бесцветные пена и мелкий порошок 411
6.131 Блестящий черный бархат, блестящие покрытия 411
6.132 Цвет зеленого стекла и зеленый бархат 412
6.133 Прекрасная персиковая кожа и кажущаяся мягкость 412
6.134 Вечеринки с «Твинки» и вазелином 413
6.135 Цвет мяса 413
6.136 Недолитое пиво 414
6.137 «Белее белого» 414
6.138 Исчезающая монета 414
6.139 Солнцезащитные очки и смог 415
6.140 Яркость океана 415
6.141 Синяя лента на морском горизонте 415
6.142 Ночная тьма опускается стремительно 416
6.143 Цветной конденсационный след самолета 416
6.144 Перламутровые облака 416
6.145 Сумеречный фиолетовый свет 416
6.146 Рябь на небе 417
6.147 Линия на фоне дождя вдалеке 417
6.148 Ясная ночь 417
6.149 Зодиакальный свет, противосияние и другие ночные огни 418
6.150 Отражения на линии морского горизонта 418
6.151 Как использовать сплошной металлический шар для фокусировки света 418
6.152 Крутой поворот в кривом зеркале 419
6.153 Цвет дыма сигареты 419
6.154 Что бы мы увидели в ультрафиолетовом свете 420
6.155 Дифракция на буквах 420
6.156 Игра с отражением 420

Глава 7

Физика зрения
Танец броненосцев на фоне распухшей Луны 421
7.1 Лунная иллюзия 421
7.2 Форма неба 421
7.3 Как «обезглавить» человека с помощью слепого пятна 422
7.4 Серая сетка по утрам, летающие точки днем 422
7.5 Мушки и другие пятна в глазу 423
7.6 Ореолы вокруг уличных фонарей, горящих свечей и звезд 424
7.7 Фосфены — психоделические картинки 424
7.8 Жужжание и стробоскопический эффект 425
7.9 Как уследить за летящим бейсбольным мячом 426
7.10 Импрессионизм 427
7.11 Пуантилистический стиль в живописи 427
7.12 Муаровые узоры 428
7.13 Оп-арт 428
7.14 Эффект глубины на картинах, написанных маслом 429
7.15 Чтение в темноте 430
7.16 Цветной призрак светящейся точки 430
7.17 Отражающие глаза 431
7.18 Как видят под водой люди, пингвины и крокодилы 431
7.19 Подводное зрение «четыреглазых» рыб 432
7.20 Улыбка Чеширского кота 432
7.21 Рино-оптический эффект 433
7.22 Бегущие облака и синие вредючки 433
7.23 Эффект Палфрича 434
7.24 Последовательное зажигание уличных фонарей 435
7.25 Полосы Маха 435

7.26 Перевернутый мир 436
7.27 Перевернутые тени и бугор на ровном месте 436
7.28 Странное отражение в елочном шарике 437
7.29 Вращение узоров из случайно нанесенных точек 437
7.30 Снежные узоры на телевизионном экране 438
7.31 Улыбка Моны Лизы 438
7.32 Призраки телевизионного экрана, плавающие в воздухе 439
7.33 Чтение через маленькие отверстия (пинхолы) 439
7.34 Цветной ореол вокруг пальца 440
7.35 Наблюдение звезд днем через трубу 440
7.36 Как звездочеты смотрят на звезды 440
7.37 Земные объекты, различимые с орбиты 441
7.38 Медоносные пчелы, пустынные муравьи и поляризованный свет 441
7.39 Щетка Гайдингера 442
7.40 Цвета теней 443
7.41 Безопасность солнцезащитных очков 443
7.42 Хрусталики рыб 443
7.43 Ощущение объема на красно-синих плакатах 444
7.44 Синие дуги Пуркинье 445
7.45 Пятно Максвелла 446
7.46 Визуальные ощущения от излучения 446
7.47 Красный свет на панелях управления 447
7.48 Рентгеновское зрение Супермена 447
7.49 Иллюзия фейерверков 447
7.50 Взгляд на потолок 447

Алфавитный указатель 449

От автора

*Эта книга посвящается моей жене **Мэри Голрик**, которая была рядом все 13 лет, что я готовил колонку «Ученый-любитель» для журнала *Scientific American*, все 16 лет, когда я писал «Фундаментальные основы физики», и все 200 лет (по моим ощущениям), которые я потратил на это издание «Нового физического фейерверка». Без ее поддержки, любви и терпения я бы просто сидел и смотрел в стену.*

История «Физического фейерверка» началась одним мрачным вечером в 1968 году, когда я был помощником преподавателя в Мэрилендском университете. В тот день я поспорил со своей студенткой — Шэрон. Она провалила тест и возмутилась: «Какое отношение это все имеет к моей жизни?!»

Я тут же ответил: «Шэрон, это физика! Она имеет прямое отношение к жизни!»

Она внимательно посмотрела на меня и сказала: «Приведите пример».

Я думал и думал, но в голову так ничего и не пришло. Я шесть лет посвятил физике, но не смог придумать один-единственный пример.

Вечером я понял, что проблема во мне: когда мы говорили про физику, мы имели в виду то, что люди делали в здании физического факультета, а не нашу обычную жизнь. Поэтому я решил собрать несколько примеров из реального мира и назвал эту коллекцию «Физическим фейерверком». Понемногу к ней добавлялись новые задачи.

Вскоре «Физическим фейерверком» заинтересовались другие люди: сначала студенты, потом и преподаватели. Эта коллекция попала в одну из научных публикаций Мэрилендского университета, а затем издательство John Wiley & Sons предложило мне контракт на книгу.

Книга была напечатана в 1975 году, когда я уже был профессором физики в Государственном университете Кливленда. С тех пор ее перевели на 11 языков. Перед вами второе издание книги, полностью переработанное.

Когда я начинал собирать материал для «Физического фейерверка», я просматривал пару десятков научных журналов, страница за страницей, в поисках

интересных статей. Мне казалось, что я старатель в бесплодных горах: крупинцы золота встречались редко, извлечь их было сложно.

Теперь мир поменялся. Каждый год публикуют сотни научных работ подходящей тематики. Можно сказать, что я нашел свою золотую жилу. Я сам просматриваю около 400 журналов и проверяю с помощью поисковика еще несколько сотен. Мои пальцы летают над клавиатурой. Мне бы хотелось, чтобы Шэрон увидела те любопытные вещи, которые я отыскал. Эта книга позволит вам заглянуть мне через плечо и убедиться: физика имеет «прямое отношение к нашей жизни».

САЙТ «НОВОГО ФИЗИЧЕСКОГО ФЕЙЕРВЕРКА»

У этой книги есть свой сайт, на котором вы найдете:

- библиографическую справку — цитаты из 10 000 научных работ по инженерному делу, математике, медицине и юриспруденции;
- дополнительные задачи;
- исправления, уточнения и комментарии к книге;
- расширенный алфавитный указатель.

www.flyingcircusofphysics.com

БЛАГОДАРНОСТИ

Мне надо поблагодарить очень многих людей, которые поддерживали меня, когда я думал, что все пропало. Или которые терпели меня, когда я работал как одержимый.

Спасибо Джирлу и Марте Уокер (мои родители, которые в моей юности провели немало бессонных ночей, беспокоясь, что меня ждет — оглушительный

успех или тюремная камера), Бобу Филипсу (учитель математики и физики в старшей школе, который открыл для меня новый мир), Филу ДиЛавору (благодаря ему я начал преподавать), Джо Рэддишу (он настоял, чтобы Мэрилендский университет опубликовал мои записки), Филу Моррисону (он убедил меня взяться за книгу и написал на нее отличную рецензию в журнал *Scientific American* — так началось мое 13-летнее сотрудничество с ними), Дэннису Флэнагану (редактор журнала *Scientific American*, который стал моим наставником на эти 13 лет), Дональду Дэнеку (сотрудник издательства John Wiley & Sons, предложивший мне контракт на «Физический фейерверк»), Карлу Касперу и Бернарду Хэммермешу (они были хорошего мнения о книге и предложили мне должность ассистента профессора в Государственном университете Кливленда), Дэвиду Хэллидею и Роберту Реснику (они уступили мне «Фундаментальные основы физики» в 1990 году), Эду Миллмену (он объяснил мне, как писать учебники), Мэри Джейн Сондерс (она вычитала много страниц рукописи и помогла появиться новому

изданию «Физического фейерверка»), Стюарту Джонсону (физическому редактору издательства John Wiley & Sons, который помог мне с этой книгой и с «Фундаментальными основами физики»), Кэрол Сэйтцер (она прочла рукопись этой книги и внесла много серьезных правок), Мэделин Лейже (дизайнер этой книги), Элизабет Суэйн (она отвечала за издание этой книги в John Wiley & Sons), Крису, Кэрол и Клэр Уокерам (мои взрослые дети, которым всю жизнь приходилось терпеть мою любовь к преподаванию и книгам), Патрику Уокеру (мой подрастающий сын — он не только терпел мою работу, но и научил меня подниматься на стены с отрицательным уклоном на скалодроме) и — больше всех — моей жене Мэри Голрик, которая подкинула мне много идей и подбадривала меня, когда я говорил «Все пропало».

*Джирл Уокер,
департамент физики,
Государственный университет Кливленда*

Предисловие

Обычно задача предисловия — помочь читателю решить, «покупать или не покупать», и подтолкнуть его к правильному (сами понимаете какому) выбору. В данном случае сложностей никаких: что такое задачник по физике, все и так знают, а открыв этот, вы сразу увидите, в чем его особенность, — достаточно прочесть первые две задачи. Только не дочитывайте до десятой — она к вам не имеет отношения!

Эта книга не похожа на обычные школьные задачки и пособия для подготовки к ЕГЭ — в ней описаны реальные природные или экспериментальные ситуации. Рассматривая задачу, надо сначала понять, какие физические законы проявляются в данном случае и как именно они работают, то есть построить модель явления. Именно такими вопросами занимается физика как наука, и именно с попытки понять, что важно и что не важно для конкретной ситуации, начинается поиск ответа. Поэтому сейчас у вас в руках не очередной задачник, который сулит вам «сто баллов». **У вас в руках способ понять, что такое физика, чем и как она занимается. Интересно ли, нужно ли это вам как ученику (или как родителю ученика).**

Правда, в «серьезной» физике мало поднять глаза к потолку и изречь, что дело в том-то и том-то, — надо построить связную и полную модель, дать расчет, результат которого умеренно близок к наблюдению или эксперименту. Но не всё сразу. Кошка тоже сначала боялась пылесоса — а потом втянулась. Потому что физика как профессия — это жизнь, со своими проблемами и решениями, огорчениями и радостями, с острым кайфом в момент, когда вы понимаете, что решили проблему и теперь в мире существует что-то, что знаете только вы, — и вам есть кому это рассказать. Уж можете мне поверить...

Книга принесет много пользы старшеклассникам и учителям: предложенные в ней задачи подойдут для занятий физического кружка или первого частично самостоятельного исследования. Многие задачи будут интересны студентам и преподавателям вузов: одни

из них могут стать темой самостоятельной научной работы, первой публикации в научном журнале, другими можно воспользоваться на лекции как красивой иллюстрацией действия того или иного закона. Книга доставит удовольствие тем инженерам и физикам, кто еще не совсем забыл свое детство и способен думать не только о проблемах Вселенной, но и о более земных вещах — дожде, трафике на дорогах, дятлах, долбящих дерево, и так далее. Кроме того, в задачнике есть повествовательные вставки, рассказывающие о реальных историях, которые имеют отношение к разбираемым задачам. Так что и развлечение вам обеспечено.

Сегодня на всех прилавках можно увидеть популярные книги о Вселенной и элементарных частицах, способные создать ощущение причастности к чему-то большому... Красивые слова действуют как гипноз. Однако для понимания того, как работает физика, этот задачник полезнее таких книг. Потому что передний край науки далек от нас, а ситуации, которые разбирает Уокер, — они вот тут, рядом и вокруг. **Вскоре вы начнете замечать физические задачи вокруг себя. И это не лечится.**

Сложны ли эти задачи? Да как сказать... Чтобы разобраться в их первом слое, школьного курса достаточно. Правда, надо его применить, а этому школа учит нечасто. Заодно и потренируетесь... Даже физик-профессионал не сможет щелкать эти задачи как орешки — вот и вы будете возвращаться к книге много-много раз. А то школьник — я вижу это ежегодно и в массовом масштабе — в теории знает, что такое котлета, но перед реальной тарелкой с реальной котлетой замирает в недоумении. Пахнет приятно... Но что с ней делать?

Да как что?! Котлету — есть! Книгу — читать, а задачи — пробовать на зуб.

*С уважением,
Леонид Ашкинази,
в некоторой мере научный редактор*

Глава 1

Механика твердых тел

Между каплями дождя

1.1 • БЕЖАТЬ ИЛИ ИДТИ ПОД ДОЖДЕМ?

Что лучше — перебежать улицу или спокойно перейти ее шагом, когда на улице дождь, а у вас с собой нет зонтика? Если вы побежите, то, конечно, проведете меньше времени под дождем, но зато на вас упадет больше капель. Изменится ли ответ, если ветер дует в лицо и струи дождя льют прямо на вас? А если дождь хлещет в спину?

Если вы ведете автомобиль под дождем, какую скорость вам выбрать, чтобы на лобовое стекло попадало наименьшее количество воды и сквозь него хоть что-то было видно?

ОТВЕТ • Если дождь падает вертикально или хлещет из-за встречного ветра в лицо, нужно бежать как можно быстрее. Хотя вы и набегаете на капли дождя, но чем меньше времени проведете под дождем, тем меньше намокнете. Чтобы уменьшить количество падающих на вас капель, следует уменьшить площадь своего сечения в перпендикулярной струям плоскости, то есть наклониться вперед. Как заметил кто-то из моих студентов, если под дождем нужно бежать, да еще и наклоняться при этом, проще уж воспользоваться скейтбордом. Но тогда вы привлечете к себе повышенное внимание, а кроме того, таскать с собой скейтборд еще неудобнее, чем зонтик.

Если же ветер дует вам в спину, лучше всего бежать со скоростью, равной горизонтальной составляющей

скорости падающих капель. В этом случае намокнут голова и плечи, но ни на переднюю, ни на заднюю часть тела капли попадать не будут. Однако эта стратегия не сработает, если под дождем перемещается объект с гораздо большей, чем у вас, площадью горизонтального поперечного сечения. Такой объект соберет заметное количество воды на своей верхней поверхности, даже если его скорость совпадет с горизонтальной скоростью капель дождя. Чтобы меньше промокнуть, этот объект должен перемещаться как можно быстрее.

Если вы в дождь ведете машину, вы не рискуете промокнуть, но вам важна хорошая видимость. Если капли падают вертикально вниз или если их сдувает в лобовое стекло, нужно ехать медленно. Если же капли сдувает ветром в направлении вашего движения, то в идеале вам нужно ехать со скоростью, равной горизонтальной скорости капель, но тогда, возможно, уж лучше вообще не трогаться в путь.

1.2 • КОЛОННЫ АВТОМОБИЛЕЙ И ТРАНСПОРТНЫЙ КОЛЛАПС

Как согласовать последовательность переключений светофоров на перекрестках улиц, чтобы плотный поток транспорта ехал по улице равномерно и без остановок? Нужно ли менять график переключений в часы пик? Почему иногда, например во время снежной бури, эти схемы переключений перестают работать, собираются пробки и поток машин фактически останавливается?

ОТВЕТ • Автомобили движутся группами, или, иначе, колоннами. Допустим, на перекрестке 1 колонна останавливается на красный свет светофора. Когда светофор переключается на зеленый, передние машины в колонне первыми ускоряются и начинают двигаться с некоторой обычной для этой магистрали скоростью потока. До того как они подъедут к перекрестку 2, сигнал светофора на этом перекрестке должен

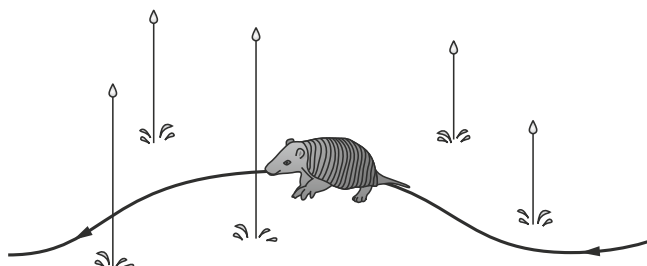


Рис. 1.1 / Задача 1.1

переключиться на зеленый, чтобы водители не испугались и не начали тормозить. Если знать расстояние между перекрестками, типичное ускорение машин-лидеров и время, которое им понадобится, чтобы доехать до перекрестка на данной скорости, можно рассчитать момент, в который сигнал светофора 2 должен переключиться на зеленый.

Движение задних автомобилей в колонне начинается не в момент переключения сигнала светофора на зеленый, а с задержкой, то есть тогда, когда «волна стартов» дойдет до них (водители начинают движение не одновременно). Возможно, на это понадобится несколько десятков секунд. Если хвост колонны начнет движение слишком поздно, он будет остановлен следующим красным сигналом светофора на перекрестке 2. Предположим, колонна, движущаяся по той же улице следом за первой, такой же длины или даже длиннее предыдущей. Тогда количество машин, остановленных следующим красным сигналом светофора на перекрестке 2, увеличится.

Положение ухудшится, если и следующие за ними колонны тоже длинные. Колонна машин, остановленных на перекрестке 2, может увеличиться и растянуться до перекрестка 1. Тогда задние машины перекроют поперечное движение на этом перекрестке. Так начинается транспортный коллапс. Чтобы разрядить ситуацию, последовательность переключения сигналов светофоров на перекрестках 1 и 2 нужно поменять. Зеленый сигнал на светофоре 2 должен теперь загораться раньше зеленого на светофоре 1, тогда машины, остановленные на светофоре 2, смогут уехать до того, как прибудет следующая колонна. Смену режимов переключения сигналов светофоров можно производить вручную или с помощью компьютера, отслеживающего количество машин, стоящих на перекрестке 2.

Движение колоннами можно наблюдать и в тоннелях (особенно там, где перестроение между полосами запрещено), и на двухполосных загородных шоссе. В каждом случае колонны машин образуются тогда, когда более быстрый автомобиль упирается в более медленный, например в фуру. На сельских дорогах колонна рассасывается, если водителям удастся обогнать автомобиль-тихоход.

1.3 • «ВОЛНЫ ТРАФИКА» НА АВТОСТРАДЕ

Почему, когда поток машин, движущихся по шоссе или автостраде, уплотняется, «волны трафика», образуемые ускоряющимися и замедляющимися автомобилями, перемещаются по потоку? Эти волны иногда

возникают, когда случается ДТП или когда заглохшая машина блокирует полосу, а иногда поток замедляется из-за разных несущественных причин вроде перестраивания какой-то машины с полосы на полосу. В каком направлении движутся эти «волны» — по ходу потока или в противоположном направлении? Почему «волны» долго не исчезают после того, как попавшие в ДТП или заглохшие машины были эвакуированы?

ОТВЕТ • Когда машин мало, действия отдельного водителя не оказывают большого влияния на других водителей, особенно если есть возможность обгона. Когда плотность потока несколько увеличивается, водители начинают влиять друг на друга — в том смысле, что они начинают медленнее двигаться (частично из соображений безопасности, а частично — из-за того, что уменьшается возможность обгона). Предположим, вы ведете машину в таком потоке. Если водитель перед вами замедляется или ускоряется, через секунду вы среагируете и сделаете то же самое. Водитель, едущий позади вас, еще через секунду последует вашему примеру. И так волна изменений скорости распространится по цепочке автомобилей назад. Вероятно, эта волна со стороны малозаметна, поскольку обычно скорости не меняются резко.

Теперь предположим, что передний водитель резко ударил по тормозам. И вы, и водитель за вами тоже резко затормозите, но каждому из вас потребуется примерно секунда на то, чтобы среагировать. Резкое торможение распространится в виде волны назад по цепочке машин, и такая волна уже будет заметна для наблюдателя, находящегося на обочине дороги. Эта волна — «волна трафика», или «стоп-волна». В зависимости от концентрации машин она может распространяться как в направлении движения машин (по ходу движения), так и в противоположном направлении (против хода движения), иногда она даже может стать стоячей.

Предположим, волна возникла, когда одна из машин заглохла в достаточно плотном потоке, и водителю потребуется 15 минут, чтобы убрать машину с дороги. Поскольку после этого автомобили начинают разгоняться до нормальной своей скорости, через длинную цепочку скопившихся машин пройдет «волна разрежения». Может пройти много времени, прежде чем «волна разрежения» догонит «стоп-волну», или, иначе, «волну трафика», все еще распространяющуюся по цепочке машин назад. И только тогда движение автомобилей вернется в нормальное русло.

1.4 • МИНИМАЛЬНАЯ ДИСТАНЦИЯ МЕЖДУ МАШИНАМИ ПРИ БУКСИРОВКЕ

Каким должно быть минимальное расстояние между буксирующим и буксируемым автомобилями, при котором буксируемый автомобиль успеет остановиться, прежде чем столкнется с буксировщиком, если тому придется резко затормозить? Общие рекомендации состоят в том, что расстояние между двумя этими автомобилями должно зависеть от скорости и при возрастании скорости на каждые 16 км/ч увеличиваться минимум на одну длину машины. Обоснованы ли эти рекомендации?

ОТВЕТ • Рекомендации необоснованы, поскольку держатся на двух сомнительных предположениях. Одно из них состоит в том, что у обоих водителей одинаковая скорость реакции в чрезвычайной ситуации. Если водитель буксируемого автомобиля реагирует медленнее, чем водитель буксировщика, потребуются большая дистанция. Другое, менее явное, предположение состоит в том, что обе машины замедляются одинаково. Это предположение вообще нереально, если только автомобили не тормозят юзом, хотя и в этом случае нет гарантии. Конечно, опасная ситуация возникает, когда именно буксирующая машина тормозит быстрее, чем буксируемая.

Предположим, разница в скорости торможения у машин мала. Есть ли простое правило для расчета минимальной дистанции, позволяющей избежать столкновения при экстренном торможении? Как ни странно, нет, поскольку она зависит от квадрата скорости, так что ее нелегко вычислить в уме применительно к данной ситуации. Поэтому, если вы быстро едете за другой машиной, лучше держаться на гораздо большем расстоянии, чем того требует инструкция.

1.5 • ПРОЕЗД НА ЖЕЛТЫЙ СВЕТ

Допустим, вы подъезжаете к перекрестку и тут светофор переключается на желтый. Что нужно сделать: жать на тормоза и останавливаться, продолжать движение на прежней скорости или ускориться? Вы можете принять решение, основываясь на собственном опыте, оценив свою скорость, расстояние до перекрестка, ширину поперечной улицы и попытавшись угадать, как долго будет гореть желтый сигнал светофора. Есть ли вероятность, что вы нарушите правила дорожного движения при любых действиях, даже если не превысите разрешенную скорость?

ОТВЕТ • Ответ зависит от местного законодательства. В одних местах считается, что вы нарушаете закон, если в тот момент, когда загорелся красный свет, находитесь на перекрестке, в других вы имеете право находиться на перекрестке, если въехали на него до того, как светофор переключился на красный. В первом случае вы вполне можете оказаться в патовой ситуации, когда не имеете возможности ни вовремя остановиться, ни достаточно ускориться (не превысив при этом допустимой скорости), чтобы проскочить перекресток. В таком случае есть диапазон расстояний до перекрестка, в котором любые ваши действия приводят к нарушению закона. Ситуация еще более усугубится, если окажется, что желтый сигнал горит недолго, а разрешенная скорость мала. Возможность возникновения такой ситуации зависит от расстояния до перекрестка, времени горения желтого сигнала, вашего тормозного пути при данной скорости, возможности увеличения скорости и ее разрешенного предельного значения. Опасность столкновений меньше, если зеленый сигнал для потока, движущегося по перпендикулярной улице, загорается с задержкой в одну-две секунды после включения красного сигнала для потока в вашем направлении.

1.6 • ЗАКРУЧИВАНИЕ АВТОМОБИЛЯ ПРИ ЭКСТРЕННОМ ТОРМОЖЕНИИ

Когда машины, в которых нет системы АБС (антиблокировочной системы), экстренно тормозят, они начинают вращаться, а иногда даже ехать задом наперед (рис. 1.2а). Что заставляет их вращаться и почему не все типы автомобилей закручиваются при резком торможении? Какой стратегии лучше придерживаться, чтобы восстановить управляемость, если автомобиль уже начал вращаться? Куда нужно поворачивать колеса — в сторону заноса или в сторону предполагаемого движения?

ОТВЕТ • Разворачивает обычно автомобили, у которых двигатель крепится спереди, поскольку больший вес у них приходится на передние колеса и меньший — на задние. Это означает, что, скорее всего, сначала заблокируются задние колеса и они начнут скользить первыми, а уже потом — передние. И тогда любой случайный поворот, вызванный, например, неровностью дороги, быстро приведет к развороту.

Для того чтобы объяснить, отчего возникает разворот, рассмотрим трение между покрытием дороги и шиной, когда машина, у которой двигатель спереди, начинает поворачивать налево по отношению

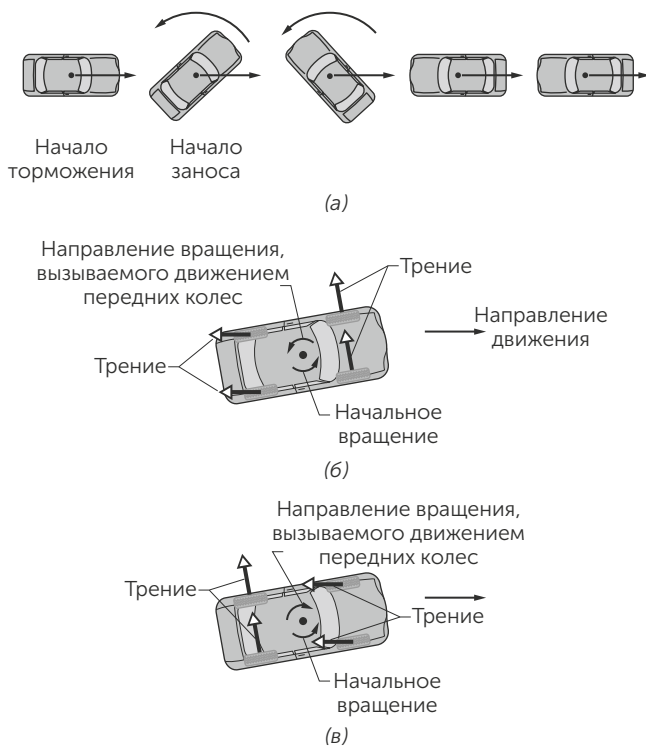


Рис. 1.2 / Задача 1.6. а) Разворот автомобиля при резком торможении. Показаны силы трения, действующие на шины при размещении двигателя под передним капотом (б) и задним капотом (в).

к первоначальному направлению движения (рис. 1.2б). Силы трения, приложенные к проскальзывающим задним шинам, направлены назад. Силы трения, приложенные ко все еще вращающимся передним шинам, параллельны передней оси и направлены налево и частично назад. Все эти силы создают крутящий момент, стремящийся развернуть машину в горизонтальной плоскости вокруг ее центра масс. Момент сил, приложенных к передним колесам, больше, и он пытается развернуть машину в том же направлении, в котором машина уже начала вращаться. Таким образом, угол поворота все растет, и машина разворачивается.

Если же двигатель расположен у машины сзади, роли сил трения, действующих на передние и задние колеса, меняются и крутящие моменты, приложенные к задним колесам, преобладают — они стремятся уменьшить начальный поворот (рис. 1.2в).

Согласно стандартным рекомендациям, если вашу машину начинает закручивать, вы должны выворачивать передние колеса в сторону первоначального движения. При этом вы создадите крутящий момент, приложенный к передним колесам, который будет

препятствовать закручиванию. Но если вы не самый опытный водитель, то можете перестараться — и машину закрутит в противоположном направлении.

1.7 • СКОЛЬЗИТЬ ИЛИ НЕ СКОЛЬЗИТЬ

Предположим, что вы едете по шоссе и тут на дороге выскакивает огромный лось. Предположим также, что в машине нет АБС (антиблокировочной системы). Должны ли вы тормозить юзом, для чего надо как можно сильнее нажать на тормоз и тем самым заблокировать колеса, или же следует нажимать на тормоз лишь до тех пор, пока не почувствуете, что скольжение вот-вот начнется, то есть колеса не блокировать? Если автомобиль входит в режим полного скольжения (режим юза), почему скольжение так резко заканчивается в конце тормозного пути?

ОТВЕТ • В учебниках обычно рекомендуют второй вариант, правильно отмечая, что машина останавливается именно из-за трения между дорогой и шинами. Если колеса крутятся, трение можно увеличивать до определенного уровня, выжав педаль тормоза до некоторой величины. Если вы нажмете на тормоз сильнее, колеса заблокируются, шины начнут проскальзывать, трение уменьшится и тормозной путь увеличится.

Наилучший способ, как пишут в учебниках, — сильно тормозить, но только до тех пор, пока не начнется проскальзывание, и тогда тормозной путь будет минимальным. На самом деле это не совсем верно, поскольку в таком случае тормозной путь может быть на 25% длиннее, чем если бы вы заблокировали колеса и тормозили юзом.

Совет из учебника в экстренной ситуации может оказаться неправильным по двум причинам. Во-первых, у вас вряд ли будет время для экспериментов с тормозами. Вторая причина связана с крутящими моментами, создаваемыми силами трения между колесами и дорогой. Эти моменты стремятся наклонить машину, повернув вокруг горизонтальной оси, проведенной через центр масс (рис. 1.3), что уменьшает нагрузку на задние колеса и увеличивает на передние. Предположим, вы нажали на тормоз с таким усилием, что колеса еще крутятся, но еще чуть-чуть — и заскользят. Поскольку колеса все еще вращаются, а нагрузка на задние колеса уменьшилась, именно они (а не передние, испытывающие большую нагрузку) уже находятся на грани проскальзывания, и сила трения, приложенная к задним колесам, мала. Следовательно, общее

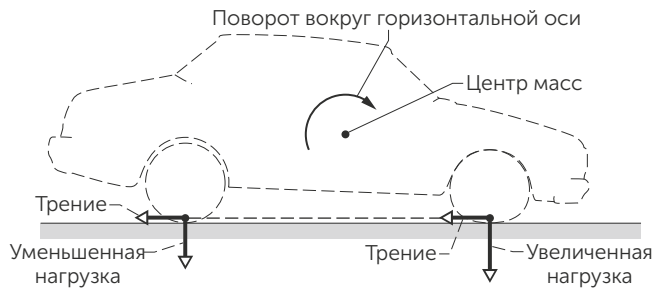


Рис. 1.3 / Задача 1.7. Машина наклоняется вперед при торможении.

трение у всей машины будет меньше, а тормозной путь — больше.

Теперь предположим, что вы нажали на тормоз с такой силой, что заблокировали все колеса, то есть машина пошла юзом. При полном скольжении трение между колесами и покрытием дороги зависит от нагрузки на них. Поскольку нагрузка на передние колеса увеличена, сила трения между ними и дорогой велика. Но даже притом, что нагрузка на задние колеса мала, увеличенное трение между передними колесами и покрытием означает, что общее трение больше, чем в предыдущем случае, а следовательно, тормозной путь машины короче. И все же блокировать колеса без крайней необходимости не стоит, так как при скольжении теряется контроль над машиной, и она вполне может развернуться (см. задачу 1.6) и даже столкнуться с движущимися в том же или в противоположном направлении машинами.

Резкая остановка в режиме полного скольжения объясняется тем, что внезапно возрастает трение между шинами и асфальтом. При скольжении в области их соприкосновения в начале торможения образуется смазка из расплавившегося гудрона и резины (см. задачу 1.8). Но при замедлении автомобиля количество расплавленного вещества — смазки — уменьшается, и трение внезапно возрастает.

1.8 • ТОРМОЖЕНИЕ ЮЗОМ

При экстренном торможении, если колеса блокируются, шины начинают скользить по асфальту и на нем остаются следы. Предположим, машина начинает скользить на определенной скорости и останавливается. Влияет ли на длину тормозного следа вес машины? А рисунок протектора и ширина шин? Что, если «резина лысая»?

Почему остановить машину труднее, когда дорога лишь слегка мокрая, чем когда по ней ручьями течет вода?

ОТВЕТ • При экстренном торможении трение между шинами и дорогой сначала увеличивается до максимальной величины, а затем падает, когда колеса блокируются и начинают проскальзывать. При скольжении от шин отрываются кусочки, а дорога и сами шины нагреваются. Шина может расплавиться, а если дорога покрыта составом, содержащим битум, может расплавиться и он. В таком случае образуется жидкая смазка, и трение еще уменьшается.

Расплавленное вещество быстро вернется в твердое состояние, но след от проскальзывавших колес останется надолго, возможно, на несколько месяцев. Часто по всей длине следа тянутся бороздки, возникшие либо из-за рельефа покрышек, либо из-за того, что в основании дороги лежит рыхлый гравий.

На бетонированных покрытиях следы скольжения остаются редко, а если и остаются, то они почти невидимы и образованы в основном оторванными или расплавленными фрагментами шин.

Если машина весь путь до остановки проходит юзом и ни с чем не сталкивается, длина тормозного следа позволяет установить ее скорость в момент, когда скольжение началось. Правда, это значение скорости можно определить только ориентировочно, поскольку в этих расчетах используется слишком много параметров. Один из них — масса (или вес) автомобиля. Для тяжелого автомобиля тормозной путь до остановки немного длиннее, чем для более легкого, в первую очередь из-за того, что при большем весе образуется больше смазки. (В судах при разборе ДТП и в книгах по физике этим фактором пренебрегают.)

А еще длина тормозного следа зависит от состояния дороги: он короче, если асфальт содержит вкрапления камня, и длиннее, если он отполирован шинами большого количества машин. Длина тормозного пути не зависит от ширины шин, так как, в принципе, силы трения между шинами и дорогой зависят только от веса, который давит на шины, от рисунка протектора (а следовательно, от сцепления шин с поверхностью дороги), но не от их ширины.

Если дорога сухая, бороздки на шинах не сильно влияют на длину тормозного пути, если же дорога влажная, их влияние может оказаться существенным. Когда воды много, как, например, во время ливня,

шины начинают скользить на тонком слое воды (*аквапланирование*). При этом движении трение почти нулевое, шины не соприкасаются с дорогой: поскольку вода не может найти выхода и вытечь из-под шин, они как бы парят над асфальтом. Чтобы уменьшить аквапланирование, на шинах делаются бороздки, которые направляют и выводят воду с нижней части шин наружу. Аквапланирование влияет еще сильнее, если до дождя дорога была грязной, потому что смешанная с водой грязь образует очень вязкую смазку — что-то вроде жидкой глины, и тогда трение между шиной и дорогой снижается еще сильнее. При экстренной остановке это может заставить водителей врасплох — ведь они считали, что раз дождь только начался, то дорога еще не настолько намочена, чтобы началось аквапланирование. Зато после того, как дождь смывает грязь, а дорога высохнет, трение между шиной и дорогой станет больше, чем до дождя, поскольку грязи на ней не останется.

Но даже если воды недостаточно, чтобы началось аквапланирование, она все же может значительно уменьшить трение между шиной и дорогой. За сухую дорогу шина зацепляется, потому что нижняя часть шины прогибается под весом и все время плотно прижимается к поверхности дороги. Из-за этого она может подстраиваться под неровности дороги, заполняя

собой небольшие выбоины и вбирая в себя легкие выступы. Такое плотное прилегание шины к неровностям дороги и обуславливает большое трение, требующееся при аварийной остановке. Когда же дорога мокрая, емкости заполнены водой, а когда шина «запечатывает» собой кусок дороги, вода из этих ямок не может никуда уйти, и дорога оказывается как бы выровненной, без бугров. Таким образом, шина уже не может зацепиться за эти неровности.

Если машину начинает вращать во время аварийной остановки, следы на дороге будут искривленными. Это вращение может начаться как из-за того, что задние колеса заблокируются раньше передних, так и из-за уклона дороги (часто средняя часть дороги делается выше, чем ее края, чтобы дождевая вода с нее стекала).

Если колесо все еще крутится во время заноса, оно боком трется о дорогу и *оставляет следы*, на которых не видны типичные для следов, оставляемых при скольжении, бороздки. Если дорога настолько неровная, что машина на ней будет подпрыгивать, или если торможение неоднородно, любые следы могут быть прерывистыми. Короткие разрывы в следах обычно говорят о том, что автомобиль подпрыгивал, а длинные могут означать, что водитель пытался остановиться, нажимая и отпуская тормоз.

КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

1.9 • РЕКОРДНЫЕ ТОРМОЗНЫЕ ПУТИ

Рекорд длины тормозного пути на общественных дорогах был установлен в 1960 году на шоссе М1 в Англии водителем «ягуара». Длина следа составляла 290 м. В суде утверждалось, что скорость автомобиля в момент, когда колеса только-только заблокировались, составляла примерно 160 км/ч. Но если принять коэффициент трения шин о покрытие дороги равным 0,7, можно подсчитать, что скорость машины составляла 225 км/ч.

Длина тормозного пути «ягуара», конечно, впечатляет, но она бледнеет при сравнении с рекордом, установленным Крейгом Бридлавом в октябре 1964 года на соляном озере Бонневиль-Солт-Флэтс. Пытаясь побить рекорд скорости для наземного автомобиля — 805 км/ч, Бридлав проехал на своем автомобиле «Спирит оф Америка» («Дух Америки») с установленным на нем ракетным двигателем мерную милю сначала в одном направлении, а потом в обратном, чтобы можно было учесть влияние ветра. Когда он мчался по мерной миле второй раз, его скорость составила 869 км/ч.

Для торможения он использовал парашют, но его стропы оторвались из-за недостаточной прочности, второй парашют тоже не сработал. Тогда он выжал педаль тормоза «в пол», но влияние тормозов сказалось в основном на появлении гигантского тормозного следа длиной почти 10 км, после чего они сгорели. После этого автомобиль продолжал мчаться со скоростью около 800 км/ч, проскочил две линии телефонных столбов, чудом не столкнувшись с ними. В конце концов он остановился, но как! Въехал на набережную, перескочил парапет и на скорости все еще больше 250 км/ч рухнул в соляное озеро глубиной 5 м. Бридлав был крепко пристегнут ремнями к сиденью и едва не утонул в салоне затопленного автомобиля. Но мерную милю Бридлав проехал и установил новый рекорд скорости, превывсив предыдущий почти на 40 км/ч. Его средняя скорость составляла 841 км/ч.

1.10 • ПОЧЕМУ ДЯТЛАМ И ТОЛСТОРОГИМ БАРАНАМ НЕ ГРОЗИТ СОТРЯСЕНИЕ МОЗГА

Дятел долбит клювом древесину, добывая пищу (насекомых, живущих под корой), строя дупла для выведения птенцов, а также выбивая громкую дробь для привлечения самки. При этих ударах голова дятла тормозит с отрицательным ускорением примерно в 1000 g (то есть в тысячу раз больше ускорения свободного падения). Для человека такая перегрузка смертельна или в лучшем случае может обернуться для него серьезной травмой мозга — сотрясением. Почему же дятел не падает с дерева мертвым каждый раз, когда вонзает свой клюв в дерево?

Сражаясь за самку в брачный сезон, самцы толсторогого барана с разбегу врезаются друг в друга и со страшной силой сталкиваются рогами и головами. И при этом они не падают на землю без сознания. Некоторые виды рогатых динозавров (например, *трицератопсы*) тоже наносили друг другу сокрушительные удары рогами. Почему же после таких столкновений соперники остаются целы и невредимы?

ОТВЕТ • До сих пор не вполне понятно, почему мозг дятла способен выдерживать огромные перегрузки, когда птица долбит дерево, но есть два основных предположения. Во-первых, клюв дятла движется строго по прямой. Некоторые исследователи считают, что сотрясение мозга у людей и животных происходит при боковых смещениях головы относительно шеи (в которой находится ствол головного мозга), а при движении головы вперед-назад вероятность сотрясения меньше. Во-вторых, мозг дятла плотно прилегает к черепу: он отделен от черепной коробки лишь тонким слоем вязкой жидкости, поэтому остаточные смещения или колебания ткани мозга сразу после удара не настолько сильные, чтобы вызвать повреждения.

Сшибающихся головами баранов обычно спасают три обстоятельства. 1. Их рога слегка деформируются во время удара, увеличивая время соударения и тем самым уменьшая силу удара. 2. Чтобы смягчить удар в голову, кости черепа также могут слегка сдвигаться или поворачиваться в соответствующих соединениях (швах черепа) наподобие пружин или шарниров. 3. Большая часть энергии удара гасится сильными шейными мышцами животных. И хотя соударения со стороны выглядят совершенно устрашающе, крепкие мышцы животных надежно защищают мозг от сотрясений, а прочные рога не ломаются при ударе. *Трицератопсов*, возможно, спасала еще и развитая система пазух, окружавших черепную коробку и служивших амортизаторами ударов.

КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

1.11 • РЕКОРДНЫЕ УСКОРЕНИЯ

В июле 1977 года на пересохшем озере Эль-Мираж в штате Калифорния Китти О'Нейл установила два рекорда на гоночном автомобиле типа «драгстер» на дистанции 402,3 м. Стартуя с места, она развила самую высокую зарегистрированную *финишную скорость* (скорость в конце дистанции) и поставила рекорд, преодолев дистанцию за самое короткое в истории время — 3,72 с. Развитая ею скорость была поразительной — 632,1 км/ч. Среднее ускорение на дистанции составило 47,1 м/с². Это почти в 5 раз больше ускорения свободного падения. На других соревнованиях на дистанции 1600 м она показывала среднюю скорость 843 км/ч, но при этом ускорения были меньше.

В декабре 1954 года на базе Холломан ВВС США в Нью-Мексико полковник ВВС доктор Джон Стапп пристегнулся к сиденью на ракетных санях*, оснащенных девятью ракетными двигателями. После запуска двигателей сани за 5 с разогнались до скорости 1018 км/ч. На стадии включения двигателей ускорение саней составило 56,4 м/с², или 5,76 g. Цифра говорит сама за себя, однако настоящим испытанием для полковника стала остановка с помощью гидротормоза: сани замедлялись с ускорением 20,6 g, сбросив скорость до нуля всего за 1,4 с.

В мае 1958 года на той же базе Холломан Эли Бидинг-младший развил скорость 117 км/ч на похожих санях. В самой скорости нет ничего примечательного, она обычна для автобанов. Впечатляет время разгона — 0,04 с. За это время человек не успевает буквально и глазом моргнуть. Ускорение Бидинга составило 82,6 g, этот рекорд не побит до сих пор (речь идет о контролируемых ситуациях).

В июле 1977 года в Нортгемптоншире (Англия) гоночный автомобиль Дэвида Пэрли был смят при наезде на препятствие — его скорость со 174 км/ч снизилась до нуля всего за 66 см пути. Ускорение, которое он испытал, было почти смертельно — 179,8 g, но Пэрли выжил, хотя получил 29 переломов и 3 вывиха, а его сердце останавливалось 6 раз.

* Платформа, которая движется по рельсам испытательного трека с помощью ракетных двигателей. *Прим. ред.*

1.12 • ЛОБОВЫЕ СТОЛКНОВЕНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ

Вы ведете автомобиль в тоннеле с односторонним движением и вдруг видите, что какой-то автомобиль едет вам навстречу. Что вы должны сделать, чтобы облегчить последствия надвигающейся аварии? Должны ли вы ускориться, замедлиться, остановиться или поехать назад?

Лобовые столкновения — самые страшные из всех автомобильных аварий. Удивительный факт: собранная статистика, касающаяся лобовых столкновений, говорит о том, что риск (вероятность) летального исхода для водителя меньше, если в машине кроме водителя находится и пассажир. Но почему?

ОТВЕТ • Лучший выход — остановиться и, если возможно, поехать назад. Полная кинетическая энергия или импульсы машин перед столкновением определяют тяжесть соударения. Если вы не погасите свою скорость, приближаясь ко второй машине, обе величины будут большими, и удар будет жестким.

В американском футболе, в котором игроки выступают в серьезной защитной амуниции, все не так. Там игрок одной команды может специально ускориться, когда бежит навстречу игроку другой команды. Но вся разница с автомобилями в том, что футболист как раз хочет, чтобы удар был посильнее, а правильно развернув корпус, он к тому же может направить его на уязвимые места соперника или сделать так, чтобы тот потерял равновесие и упал.

Вероятность фатального исхода зависит от изменения скорости в процессе соударения: большое изменение скорости означает, что на вас во время удара действовала большая сила, вызвавшая огромное ускорение. Например, если ваша машина имеет маленькую массу, а другая машина — большую, скорость вашей машины может измениться настолько, что она в результате будет отброшена назад. Дополнительная масса в вашей машине, будь то пассажир или даже мешок с песком в багажнике, может снизить изменение скорости, а следовательно, и риск фатального исхода. Вот численный пример: предположим, массы вашей и встречной машины одинаковы. И ваши с водителем встречной машины массы тоже равны. В этом случае риск фатального исхода для вас уменьшится на 9%, если рядом с вами будет сидеть пассажир весом 80 кг.

КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

1.13 • ПРЕДСТАВЛЕНИЕ С УЧАСТИЕМ ЛОКОМОТИВОВ

Это произошло 15 сентября 1896 года в американском городе Уэйко. Уильям Краш — сотрудник компании «Миссури — Канзас — Техас Рэйлроудс» — придумал беспроектную идею для шоу. На противоположных концах участка железнодорожных путей длиной 6,4 км он разместил два старых локомотива. Один был покрашен в красный цвет, другой — в зеленый. Идея состояла в том, чтобы столкнуть локомотивы друг с другом на полной скорости.

Известно, что публика любит смотреть на катастрофы, и 50 000 зрителей заплатили за право насладиться зрелищем крушения. После того как топки были заправлены топливом, а дроссельные заслонки открыты и зафиксированы, локомотивы двинулись навстречу друг другу. В момент встречи их относительная скорость составляла 145 км/ч.

Оказаться рядом со столкнувшимися локомотивами, чья кинетическая энергия трансформировалась в кинетическую энергию разлетевшихся обломков, — все равно что побывать на месте взрыва средней мощности. В результате несколько зрителей было убито разлетевшимися обломками, сотни ранены. Но остальные зевачи, вероятно, посчитали, что не зря потратили деньги.

1.14 • УДАР СЗАДИ И ТРАВМА ШЕЙНЫХ ПОЗВОНКОВ

Когда в задний бампер машины въезжает едущая следом машина, сидящий в передней машине нередко получает травму шеи. Инженеры и медики-исследователи долго пытались объяснить этот феномен. В 1970-е годы они наконец пришли к заключению, что травма возникает из-за того, что голова сидящего в передней машине, находящаяся над спинкой кресла, держится назад при рывке машины вперед. Это получило название хлыстовой травмы. Шея сильно растягивается при резком разгибании, а затем сильно сжимается при последующем резком сгибании головы. В результате этих исследований у автомобильных кресел появились подголовники, но водители продолжали получать травмы шеи при ударах сзади. Из-за чего все-таки происходят эти травмы?

ОТВЕТ • Причиной хлыстовой травмы является то, что голова пассажира и его тело резко перемещаются относительно друг друга. Такое воздействие на шейный отдел позвоночника повреждает его, причем опасно перемещение в любую сторону.

1.15 • ПОВОРОТЫ НА ГОНОЧНОМ АВТОМОБИЛЕ

Скоростные гонки часто выигрываются благодаря правильным действиям пилота на поворотах, когда скорость уменьшается. Рассмотрим поворот на 90° на плоском треке «Формулы-1». Очевидно, что оптимальный способ прохождения поворота зависит от характеристик систем управления автомобилем, опыта и мастерства гонщика и качества трассы. Но стоит ли гонщику в принципе совершать поворот по круговой траектории? Такой выбор обычно предполагает, что время, затраченное на поворот, будет минимальным, но почему иногда этот выбор не является оптимальным? Почему пилоты, привыкшие к плоским трекам «Формулы-1», испытывают трудности в гонке «Индианаполис-500», где трасса на виражах наклонена? В частности, почему болид там заносит, когда он входит в поворот?

ОТВЕТ • Пилот-новичок совершает поворот по круговой траектории. Опытный гонщик вначале слегка поворачивает руль и при этом тормозит, затем поворачивает более резко, а потом едет по траектории с меньшей кривизной и при этом ускоряется. Поворот тогда занимает больше времени, но позволяет выйти на прямолинейный участок трассы на большей скорости, чем у пилота-новичка. Большая скорость на прямолинейном участке с лихвой компенсирует потерю времени на повороте.

Такая тактика имеет еще одно преимущество. Если поворот проходится слишком быстро, сила, приложенная к шинам, превысит предельную силу трения между шинами и покрытием, колеса начнут проскальзывать и машина потеряет управление. Чтобы не терялось сцепление с поверхностью трека, опытный гонщик сначала тормозит, а потом резко поворачивает. А так как остальная часть поворота — плавная, водитель может ускориться и при этом не потерять сцепление с дорогой.

Чутье опытного пилота «Формулы-1» подсказывает ему, как действовать на плоских поворотах. Но ощущения на наклонных виражах совсем иные, и гонщики «Формулы-1», вероятно, слишком поздно входят в поворот.

1.16 • ДОРОЖКИ ДЛЯ СПРИНТА

Почему обычно одну и ту же дистанцию на прямолинейных дорожках бегуны преодолевают быстрее, чем на искривленных? Если треки плоские и овальные, почему бегун на внешней дорожке имеет преимущество перед бегуном на внутренней дорожке, даже если дистанции на обеих дорожках одинаковы? Почему скорость на таких дорожках зависит от формы овала?

ОТВЕТ • Входя в поворот, бегун замедляется, выходя из него — опять разгоняется до своей скорости на прямолинейном участке. Для того чтобы поворот стал возможен, должна возникнуть центростремительная сила, направленная к центру поворота. В данном случае центростремительная сила возникает за счет сил трения между подошвами обуви бегуна и дорожкой. В результате действия этой направленной к центру поворота силы, приложенной к подошвам обуви, тело бегуна стремится отклониться наружу, его как бы откидывает по направлению от центра поворота. И для восстановления равновесия бегун замедляется, чтобы уменьшить действующие силы, и наклоняется внутрь поворота, чтобы противодействовать силам, стремящимся отклонить его наружу. Чем круче поворот, тем больше бегун должен замедлиться и наклониться внутрь. Поэтому тот, кто бежит по внешней дорожке (дорожке с меньшей кривизной), вообще говоря, имеет преимущество перед тем, кто бежит по внутренней дорожке (которая имеет большую кривизну).

Когда трек плоский и овальный, время пробега по всей дорожке во многом определяется временем прохождения поворотов. В принципе, на овальных треках большого радиуса развиваются большие скорости, чем на овальных треках малого радиуса, поскольку кривизна изогнутых участков на треках большого радиуса меньше, чем на треках малого радиуса. Лучший вариант (если это, конечно, не прямолинейный трек) — окружность. У нее кривизна наименьшая.

1.17 • ИЛЛЮЗИЯ ЗАДИРАНИЯ НОСА САМОЛЕТА ПРИ ВЗЛЕТЕ

Реактивный самолет, взлетая с палубы авианосца, приводится в движение мощными двигателями, при этом он выталкивается вперед с помощью катапульты, установленной на палубе. Результирующее огромное ускорение позволяет самолету достичь скорости отрыва на коротком расстоянии, равном длине палубы. Однако это же высокое ускорение вызывает у пилота

желание резко опустить нос самолета вниз, когда самолет отрывается от палубы. Пилоты натренировались не обращать внимания на это желание, но иногда самолет после взлета врезается прямо в океан. В чем причина этого эффекта?

ОТВЕТ • Ощущение вертикальности у человека зависит от визуальных ориентиров и вестибулярного аппарата, расположенного во внутреннем ухе. Рецепторами этого аппарата являются волосковые клетки с выступающими ресничками, которые погружены в студенистую жидкость. Когда вы держите голову прямо, жидкость находится в покое и волоски клеток располагаются вертикально вдоль направления действующей на вас силы тяжести; система посылает в мозг сигнал о том, что вы держите голову вертикально. Когда вы откидываете голову назад, жидкость смещается, изгибая волоски, и рецепторы посылают в мозг сигнал о том, что голова

отклонилась от вертикали. Аналогично, при горизонтальном ускорении положение волосков в жидкости изменяется, и рецепторы сообщают, что вы движетесь вперед. В этом случае сигналы, поступающие в мозг от рецепторов, оказываются теми же, что и при отклонении головы назад, что не соответствует действительности. Однако ошибочные сигналы игнорируются мозгом, если визуальные подсказки говорят, что никакого наклона нет. То же самое происходит, например, когда вы разгоняетесь в автомобиле. У пилота, резко разгоняющего самолет ночью на палубе авианосца, почти нет визуальных ориентиров. Поэтому у него возникает очень убедительная иллюзия, что наклон реален. В результате пилоту кажется, что самолет отрывается от палубы с высоко задранной носом. Без специальной тренировки он будет стараться выровнять самолет, опуская его нос резко вниз, и направит самолет в океан.

КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

1.18 • РЕЙС 143 «ЭЙР КАНАДА»

Двадцать третьего июля 1983 года рейс 143 компании «Эйр Канада» готовили к длительному перелету из Монреала в Эдмонтон, и экипаж запросил у наземных служб информацию о том, сколько топлива заправлено в баки. Пилотам было известно, что для полета на борту должно быть 22 300 кг топлива. Они знали эту цифру в килограммах, поскольку Канада недавно перешла на метрическую систему мер (до этого вес топлива измерялся в фунтах). Но на земле могли измерять количество топлива только в литрах. Техники сообщили: заправлено 7682 л. Чтобы понять, сколько топлива на борту и сколько еще не хватает, пилоты попросили назвать коэффициент, позволяющий пересчитать литры топлива в килограммы. Им было сказано, что этот коэффициент равен 1,77. Его-то они и использовали, посчитав, что 1 л топлива весит 1,77 кг. Получилось, что заправлено 13 597 кг топлива и для дозаправки необходимо еще 4917 л.

К сожалению, заправщики ошиблись: по старой привычке, возникшей еще до перехода на метрическую систему, они сообщили коэффициент, переводящий литры горючего в фунты, а не в килограммы (1 литр весит 1,77 фунта). Фактически на борту топлива было всего 6172 кг, и требовалось добавить еще 20 075 л. Следовательно, когда рейс 143 вылетел из Монреала, на его борту было всего 45% топлива, необходимого для перелета.

По пути в Эдмонтон на высоте 7,9 км топливо кончилось, и самолет начал падать. Хотя тяги вообще не было, пилоты ухитрились перевести самолет в режим планирования и начать спуск. Ближайший действующий аэропорт был слишком далеко, и добраться до него планируя было невозможно, поэтому они направили самолет на старый заброшенный военный аэродром.

К несчастью, взлетная полоса этого аэродрома была переделана в трассу для автогонок и поперек трассы был установлен стальной разделительный барьер. К счастью, когда самолет ударился о взлетную полосу, переднее шасси отлетело, а нос самолета свалился на взлетную полосу. Маневр, называемый «скольжение на крыло», затормозил самолет, так что он остановился совсем близко от стального барьера, из-за которого за ним наблюдали ошеломленные гонщики и болельщики. Все находившиеся на борту благополучно покинули самолет. Вывод: если не указаны единицы измерения, любые цифры остаются просто цифрами, которые ничего не значат.

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° , 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° 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, визуальнo обезглавливая своих гостей. Ирония в том, что его собственный отец был обезглавлен по-настоящему, а не визуальнo.

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° . 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 наложиться 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.

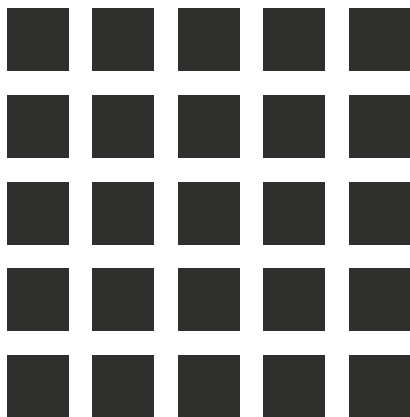


Рис. 7.2 / Задача 7.13. Решетка с появляющимися и исчезающими темными пятнами на пересечениях белых линий.

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.

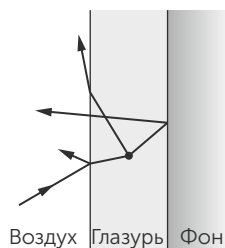


Рис. 7.3 / Задача 7.14. Картина маслом с глазурию. Свет рассеивается на передней и задней поверхностях, а также на красителе, входящем в состав глазури.

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 интерferируют, 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, приходящий 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.

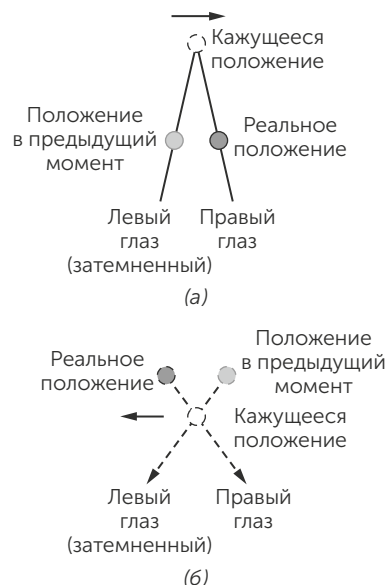


Рис. 7.4 / Задачи 7.23 и 7.30. Иллюзия Палфрича с маятником, качнувшимся вправо (а) и влево (б).

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.

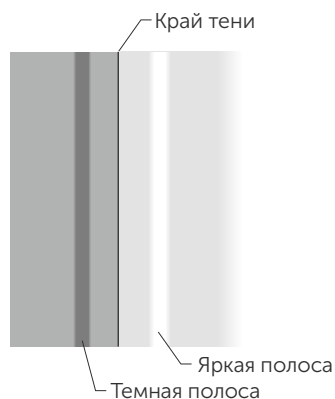


Рис. 7.5 / Задача 7.25. Полосы Маха, расположенные вдоль края тени.

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 регулировать 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).

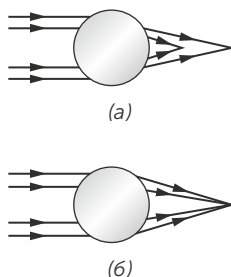


Рис. 7.7 / Задача 7.42. Фокусировка световых лучей сферической линзой с постоянным показателем преломления (а) и градиентным показателем преломления (б).

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).

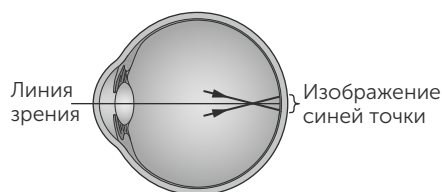


Рис. 7.8 / Задача 7.43. Если красная точка образует на сетчатке глаза четкое изображение, изображение синей точки будет находиться перед сетчаткой.

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 растёт 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.

