

Андрей Варламов  
Жак Виллен  
Аттилио Ригамонти

# физика повседневности

ОТ МЫЛЬНЫХ ПУЗЫРЕЙ  
ДО КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**АНО**  
АЛЬПИНА НОН-ФИКШН

  
ТРАЕКТОРИЯ

Премия  
Роберваля  
(Prix Roberval)  
в номинации  
Grand Public, 2015  
за книгу  
«Le kaléidoscope  
de la physique»

Жак Виллен

**Физика повседневности.  
От мыльных пузырей до  
квантовых технологий**

«Альпина Диджитал»

2014

**Виллен Ж.**

Физика повседневности. От мыльных пузырей до квантовых технологий / Ж. Виллен — «Альпина Диджитал», 2014

ISBN 978-5-0013-9340-5

Почему при течении воды в реках возникают меандры? Как заставить бокал запеть? Можно ли построить переговорную трубку между Парижем и Марселем? Какие законы определяют форму капель и пузырьков? Что происходит при приготовлении жаркого? Можно ли попробовать спагетти альденте на вершине Эвереста? А выпить там хороший кофе? На все эти вопросы, как и на многие другие, читатель найдет ответы в этой книге. Каждая страница книги приглашает удивляться, хотя в ней обсуждаются физические явления, лежащие в основе нашей повседневной жизни. В ней не забыты и последние достижения физики: авторы посвящают читателя в тайны квантовой механики и сверхпроводимости, рассказывают о физических основах магнитно-резонансной томографии и о квантовых технологиях. От главы к главе читатель знакомится с неисчислимыми гранями физического мира. Отмеченные Нобелевскими премиями фундаментальные результаты следуют за описаниями, казалось бы, незначительных явлений природы, на которых тем не менее и держится все величественное здание физики.

ISBN 978-5-0013-9340-5

© Виллен Ж., 2014

© Альпина Диджитал, 2014

## Содержание

Благодарности	7
Предисловие	8
Часть 1	10
Глава 1	11
Чаинки в чашке...	11
Как меняется русло рек?	13
Какую форму принимают меандры?	15
Озера и реки	17
Глава 2	19
Распространение звуковых волн	19
Скорость звука в морской воде	22
Когда звук распространяется зигзагами	25
Глава 3	29
Цвет моря и сила ветра	29
Цвет неба в хорошую погоду	33
Небо на закате... и после	36
Цвет облаков	36
Интерференция и когерентность	39
Цвета радуги	42
А птицы?	44
Глава 4	46
Маятник Фуко на Северном полюсе	47
Сила Кориолиса	48
Конец ознакомительного фрагмента.	51

# Андрей Варламов, Жак Виллен, Аттилио Ригамонти

## Физика повседневности. От мыльных пузырей до квантовых технологий

Переводчик Мария Прилуцкая

Научный редактор Сергей Парновский, д-р физ. – мат. наук

Редактор Александра Бачурина

Издатель П. Подкосов

Руководитель проекта И. Серёгина

Корректоры М. Миловидова, О. Петрова

Компьютерная верстка А. Фоминов

Дизайн обложки Ю. Буга

Иллюстрация на обложке Legion-Media

© Attilio Rigamonti, Andrey Varlamov, Jacques Villain, 2014

© Издание на русском языке, перевод, оформление. ООО «Альпина нон-фикшн», 2020

*Все права защищены. Данная электронная книга предназначена исключительно для частного использования в личных (некоммерческих) целях. Электронная книга, ее части, фрагменты и элементы, включая текст, изображения и иное, не подлежат копированию и любому другому использованию без разрешения правообладателя. В частности, запрещено такое использование, в результате которого электронная книга, ее часть, фрагмент или элемент станут доступными ограниченному или неопределенному кругу лиц, в том числе посредством сети интернет, независимо от того, будет предоставляться доступ за плату или безвозмездно.*

*Копирование, воспроизведение и иное использование электронной книги, ее частей, фрагментов и элементов, выходящее за пределы частного использования в личных (некоммерческих) целях, без согласия правообладателя является незаконным и влечет уголовную, административную и гражданскую ответственность.*



Издание подготовлено в партнерстве с Фондом некоммерческих инициатив «Траектория» (при финансовой поддержке Н.В. Каторжного).



Фонд поддержки научных, образовательных и культурных инициатив «Траектория» ([www.traektoriafdn.ru](http://www.traektoriafdn.ru)) создан в 2015 году. Программы фонда направлены на стимулиро-

вание интереса к науке и научным исследованиям, реализацию образовательных программ, повышение интеллектуального уровня и творческого потенциала молодежи, повышение конкурентоспособности отечественных науки и образования, популяризацию науки и культуры, продвижение идей сохранения культурного наследия. Фонд организует образовательные и научно-популярные мероприятия по всей России, способствует созданию успешных практик взаимодействия внутри образовательного и научного сообщества.

В рамках издательского проекта Фонд «Траектория» поддерживает издание лучших образцов российской и зарубежной научно-популярной литературы.

## Благодарности

Авторы посвящают эту книгу своим внукам, которые вступают в мир, преображенный физиками; мир, значительно отличающийся от того, который в соответствующем возрасте открывался их бабушкам и дедушкам; мир более удобный, где куда сложнее заскучать, но где по-прежнему не так-то просто найти свое место и обрести счастье:

Маргерит Селене Строцци Ригамонти,

Матильде и Лукасу Шмитт,

Михаилу Варламову.

Наконец, мы благодарим всех, кто согласился критически прочесть нашу рукопись, и тех, кто, насколько это возможно, помог нам не потеряться среди повседневных проявлений физики и найти наш путь в сложнейшей науке, о которой не знают всего даже профессионалы.

В частности: Алена Аспекта, Джузеппе Балестрино, Себастьяна Балибара, Клода Бертъе, Патрика Брюно, Марка де Буасьё, Александра Буздина, Элен Бушиа, Александра Валанса, Юрия Гальперина, Сильвию Герен, Юрия Ерина, Мориса Голдмана, Дениса Гратиаса, Изабель Грило, Гая Делавала, Роберта Дотрэ, Анн-Мари Казаба, Кристиана Кароли, Дэвида Кере, Жака Ламберта, Дмитрия Ливанова, Уильяма-Луи Мама, Валери Массон-Дельмот, Кейзо Мурата, Филиппа Нозьера, Сергея Парновского, Жан-Луи Потра, Пьера Пуна, Оливье Пьер-Луи, Реймонда Пьерумбера, Альберта Стасенко, И. Сайто, Сергея Салихова, Стефанию Тантони, Эрве Тис, Игоря Тралле, Стефана Фова, Жан-Пьера Халина, Кэтрин Хил, Алексея Чепелянского, Сергея Шарапова, Даниела Эстива.

## Предисловие

Мы не всегда осознаем, насколько наша повседневная жизнь наполнена проявлениями физики. Эта книга адресована тем, кто хочет понять окружающие нас удивительные природные явления. Почему небо голубое? Как появляется радуга? Что вызывает приливы и отливы? Почему пивная и морская пена белого цвета? На эти и другие вопросы мы отвечаем в первой части.

Список физических явлений, с которыми мы сталкиваемся каждый день, значительно обогатил сам человек. Как работают микроволновая печь или индукционная плита? Как вырабатывается электрическая энергия? Окружающие нас изобретения стали предметом рассмотрения второй части этой книги.

Третья часть – гастрономическая. Она посвящена искусству наших друзей – поваров. Если один цыпленок в два раза больше другого, его нужно жарить в два раза дольше? Конечно, мы не собираемся учить поваров готовить, но, возможно, сумеем ответить на некоторые вопросы, возникающие в связи с их искусством, или, по крайней мере, предложим им интересное занятие на то время, пока очередное блюдо томится в духовке.

Четвертая, заключительная часть – наиболее амбициозная. В ней мы пытаемся прояснить некоторые из самых загадочных аспектов современной науки, объяснить, как в течение последнего столетия привычный взгляд на природу коренным образом изменился благодаря открытой в начале века новой области физики – квантовой механике; и как на пороге нового тысячелетия эти потрясения стали предметом непосредственных экспериментальных наблюдений.

Не слишком ли на многое мы замахнулись? Надеемся, что читатель, изучая первые три части, обретет вдохновение и усердие, необходимые для освоения четвертой части.

Мы предполагаем, что наш читатель обладает некоторой научной подготовкой – будет достаточно математического багажа бакалавра. Но, насколько это возможно, мы избегали сложностей и использовали простой язык. Точно так же мы по мере возможности старались обходиться без уравнений и формул, но иногда они упрощают восприятие. Когда опускаются целые страницы вычислений, то время от времени одно или два уравнения разбавляют монотонность научного текста и привлекают внимание там, где это необходимо. В любом случае наш читатель имеет большое преимущество по сравнению с работающим с учебником старшеклассником или студентом: он может пропустить отрывки, которые покажутся ему чересчур сложными или, наоборот, элементарными, и обратиться к другим главам, которые, как мы надеемся, придутся ему по вкусу.

Чтобы разбудить читателя, задремавшего за чтением, мы предлагаем несколько упражнений: задачи и несложные эксперименты.

Книга во многом навеяна работами выдающихся ученых, в том числе публикациями рано ушедшего из жизни замечательного физика и популяризатора науки Льва Асламазова. Главы 1, 4, 6 и 8 развивают темы, которым он посвятил ряд статей. Другие главы представляют темы, рассматриваемые ранее в книгах «Удивительная физика» А. Варламова и Л. Асламазова и «Чудесный калейдоскоп физики» (Rigamonti A., Varlamov A. *Magico caleidoscopio della fisica*. La Goliardica Paveze, 2007). Все они были дополнены и обновлены.





## **Часть 1**

### **Физика вокруг нас**

Согласно этимологии, физика – это наука о природе (др.-греч. φύσις) или, по меньшей мере, о природных явлениях. Действительно, созерцание этих явлений поставило перед людьми первые вопросы физики: среди них, например, приливы, поразившие марсельца Пифея, когда он направил свой корабль за пределы родного Средиземного моря; радуга, возникновение которой объяснил Декарт; видимое движение планет на небе, ошибочно описанное Аристотелем и стоившее многих неприятностей Галилею; форма капель и пузырей, интересовавшая Пьера-Симона Лапласа и Томаса Юнга. Многие из этих, казалось бы, простых вопросов нашли свои ответы только в XIX веке. И в прошлом столетии Альберт Эйнштейн все еще задавался вопросом о форме излучин реки... Некоторым из этих явлений мы и посвящаем первую часть книги.

## Глава 1

### Реки, меандры и озера

**Течение воды в реке – сложный процесс, который происходит в неоднородной среде. Хотя наука не объясняет всех нюансов ее движения, она дает ключ к пониманию основных свойств этого явления.**

Сколько раз, гуляя по тропе вдоль ручья или реки, мы задавались вопросом: почему поток вместо кратчайшего пути (прямой линии) петляет из стороны в сторону? Конечно, некоторые его части почти прямые – из-за особенностей рельефа местности или проложенного человеком русла. Однако, когда водный поток свободно распространяется по равнине, обычно он вырисовывает петли и изгибы. Иногда образующиеся петли повторяются относительно регулярно (илл. 1). Как объяснить появление этих излучин, или меандров?

### Чаинки в чашке...

Одним из первых, кто задумался о причинах формирования этих изгибов, был Альберт Эйнштейн. В 1926 году он представил Прусской академии наук доклад без каких-либо уравнений, озаглавленный «Причины образования извилин в руслах рек и так называемый закон Бэра». В чем же суть этого знаменитого закона? Основываясь на наблюдениях выдающихся географов XIX века, естествоиспытатель Карл Бэр пришел к выводу, что в Северном полушарии, в равнинной местности, правый берег рек обычно более крут, чем левый, а в Южном полушарии все наоборот: левый берег круче правого.

Прежде чем перейти к изучению излучин рек и формы берегов, Эйнштейн предлагает поставить небольшой опыт, воспроизводящий повседневное привычное нам действие: размешать ложечкой сахар в чашке чая. В этом эксперименте Эйнштейна заинтересовало явление, которое на первый взгляд кажется противоречащим здравому смыслу: вызываемое ложкой вращение жидкости создает вертикальные вихри (илл. 2). Чтобы их увидеть, Эйнштейн добавляет в воду чаинки. При размешивании жидкости ложкой видно, что чаинки собираются в центре дна чашки (илл. 3). Предлагаем читателю убедиться в этом самостоятельно!



### 1. Излучины реки Снейк («Змея»), США

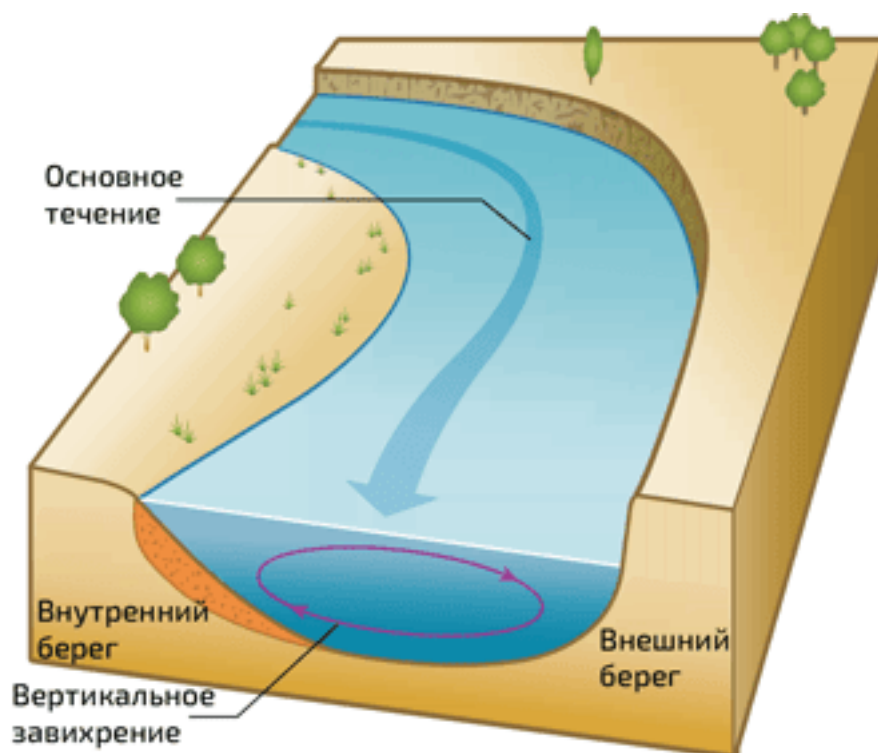
Вот как Эйнштейн объясняет это явление: в результате вращения на жидкость действует центробежная сила, отбрасывающая ее от оси вращения, и она тем сильнее, чем быстрее вращение (см. главу 4, «Еще одна фиктивная сила: центробежная»). У стенок чашки жидкость тормозится трением, поэтому вращается немного медленнее, чем в центре чашки. «В частности, – добавляет Эйнштейн, – угловая скорость вращения, а следовательно, и центробежная сила у дна чашки меньше, чем у краев. Таким образом возникает циркуляция жидкости, показанная на илл. 2, которая и заставляет чайники собираться в центре чашки».



2. При размешивании воды в чашке ложечкой в жидкости образуются вертикальные вихри



3. Опыт Эйнштейна. Воду с чайниками размешивают ложечкой (а). Вскоре чайники собираются в центре стакана (b) и в конечном итоге опускаются на дно (c). Их движение доказывает наличие вертикальных вихрей, хотя их существование, кажется, противоречит интуиции



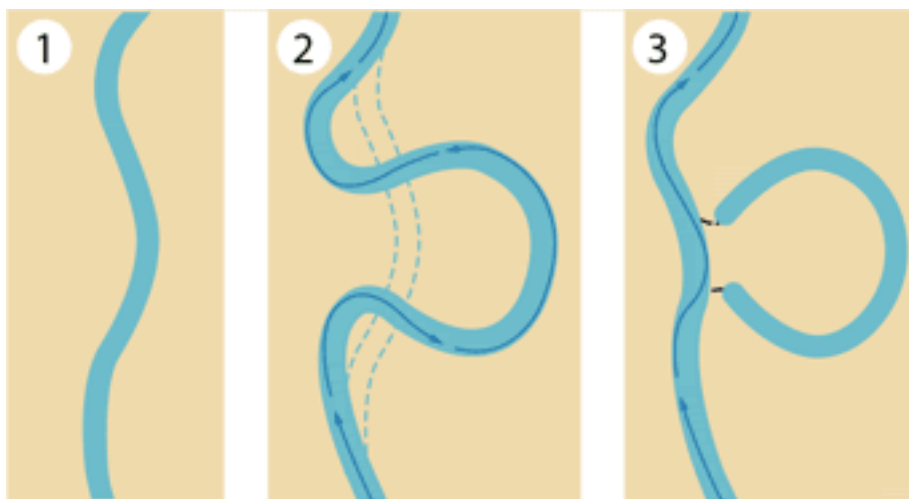
**4.** Циркуляция воды на изгибе реки по Эйнштейну. Центробежная сила, направленная от внутреннего берега к внешнему, действует в каждой точке жидкости. Но вблизи дна ее действие уменьшается из-за трения, и в основном потоке возникает вертикальная циркуляция. Она захватывает песок с внешнего берега и относит во внутреннюю часть меандра

## Как меняется русло рек?

Теперь проанализируем движение воды в той части реки, где она образует излучину. Оно аналогично движению воды в чашке, отмечает Эйнштейн. Так же как жидкость в ходе эксперимента тормозилась стенками чашки, скорость потока уменьшается трением в непосредственной близости от дна: таким образом, центробежная сила, направленная наружу от поворота, здесь меньше, чем у поверхности. Таким образом, возникает вертикальная циркуляция, обращенная во внешнюю сторону излучины около поверхности и внутрь вблизи дна (илл. 4).

Это завихрение переносит внутрь изгиба землю и гальку, которые вымывает из внешнего берега. На внутреннем берегу образуется намыв точно так же, как возникал «нанос» чайнок в центре дна чашки в предыдущем опыте. В обоих случаях, когда вода поднимается и под действием силы тяжести оставляет все, что влекла за собой, происходит осаждение. Эрозия внешнего берега и намыв на внутреннем берегу постепенно превращают едва заметный изгиб в меандр с крутым внешним и пологим внутренним берегом. Вследствие продолжающейся эрозии русло реки, скорее всего, в конце концов сольется у начала и конца изгиба и возникнет остров (илл. 5 и 6).





**5.** Изгиб реки, поначалу умеренный (1), постепенно увеличивается, образуя излучину с отложением нанесенного песка на внутреннем берегу (2), а затем приводит к образованию острова или озера в форме подковы (3)

Вышеизложенные соображения делают понятным различие между формой внешнего и внутреннего берегов в излучине, но это еще не все. Как объяснить закон Бэра, согласно которому формы правого и левого берегов различны не только на излучинах? И как объяснить наблюдения географов, которые указывают, что в Северном и Южном полушариях крутость берегов противоположна? Читатель уже догадывается, что здесь, вероятно, играет важную роль вращение Земли, мы вернемся к нему в главе 4, «Возвращение к закону Бэра».

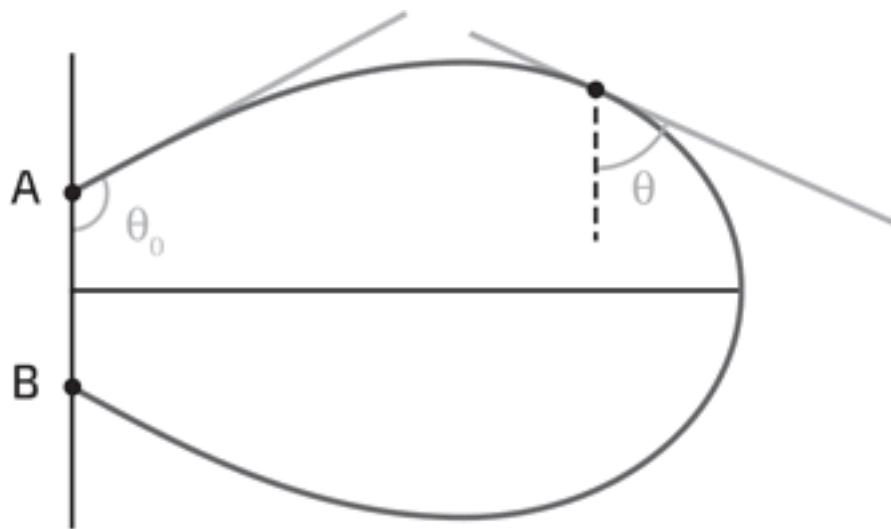


**6.** Меандр Сены в Лез-Андели, вид на замок Шато-Гайар и остров. Внешний берег крутой, а внутренний – пологий

## Какую форму принимают меандры?

Форма русла реки во многом зависит от рельефа местности, по которой река протекает. В районе с неоднородным ландшафтом река петляет, избегая неровностей и выбирая путь с наибольшим уклоном. Но и на равнине прямолинейность русла не сохраняется. Небольшой обвал земли или падение дерева на берегу заставляют поток образовать изгиб, который может постепенно увеличиваться, образуя меандр в соответствии с описанным выше процессом.

Какую именно форму обычно принимают меандры реки, текущей по равнине? В 1960-х годах геологи пришли к выводу, что каждая извилина имеет специфическую форму – такую, которую принимает гибкий стержень, если его согнуть, приблизив концы друг к другу (илл. 7). Она представляет собой эйлерову кривую, названную так в честь швейцарского математика Леонарда Эйлера (1707–1783), который первым решил эту задачу. Работа Эйлера по-прежнему широко цитируется в руководствах о прочности балок – те начинают изгибаться, если слишком сильно надавить на их концы (см. врезку в главе 1, «Опыт с продольным изгибом»).

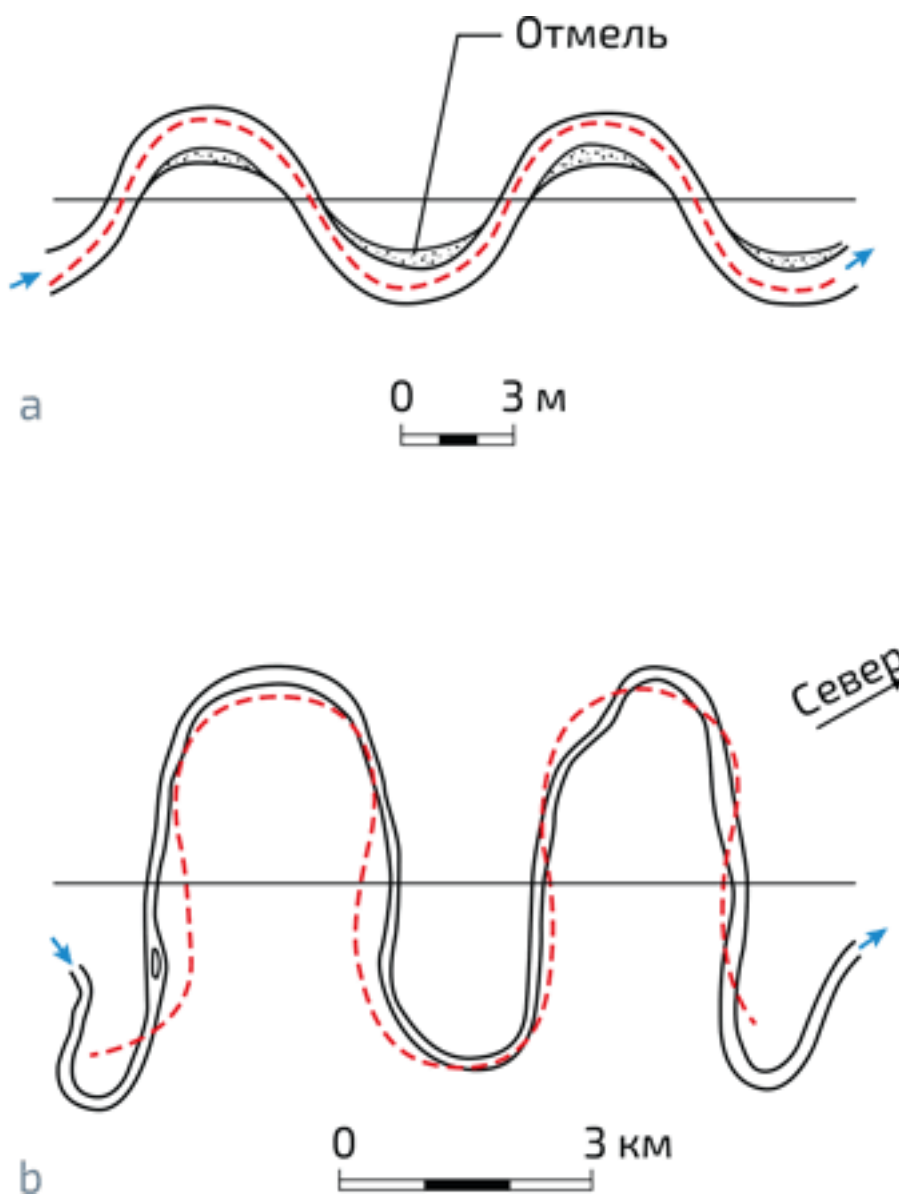


7. Форма, принимаемая упругим стержнем, концы которого зафиксированы в А и В, называется кривой Эйлера. Угол  $\Theta$  между касательной и прямой АВ позволяет определить кривизну  $d\Theta/ds$ , производную от  $\Theta$  относительно пути, пройденного по кривой. Эйлерова кривая минимизирует среднюю квадратичную кривизну стержня, то есть минимизирует интеграл  $\int (d\Theta/ds)^2 ds$ , где  $\Theta$  – угол между касательной и некоторым выбранным направлением, а  $s$  – длина вдоль кривой. Интеграл берется вдоль всего стержня

Это заключение согласуется с ранее проведенными лабораторными экспериментами, в которых моделировался процесс эволюции русла реки «в идеальных условиях». Оказалось, что в изначально прямолинейном русле очень быстро образуются меандры, хорошо описываемые кривой Эйлера (илл. 8а). Очевидно, что в природе поведение русла реки существенно сложнее «лабораторного» русла (например, из-за неровной местности). И все же подобные структуры, обычно периодические, возникают естественным образом, когда река течет по равнине (илл. 8б). Как правило, чем шире река, тем больше на ней излучин.

Термин «меандры» породила очень извилистая турецкая река Большой Мендерес (тур. Büyük Menderes), название которой происходит от греческого Μαιανδρος («меандрос»). Помимо излучин реки, меандрами называют также извилистые потоки, которые образуются на поверхности ледников, или океанические течения, такие как Гольфстрим.

Для всех этих явлений, происходящих в однородных средах, случайные процессы способствуют образованию более или менее периодических излучин, однако причины их возникновения различны.



**8. а.** Меандры, появившиеся в лабораторных условиях в первоначально прямолинейном канале, проложенном в однородной рыхлой среде. Через несколько часов под действием эрозии он изгибается и появляются меандры. Соответствующая кривая Эйлера обозначена пунктиром.

**б.** Форма природной реки (Потомак в Поу-Поу, США) и ее приближение эйлеровой кривой (пунктирная линия)

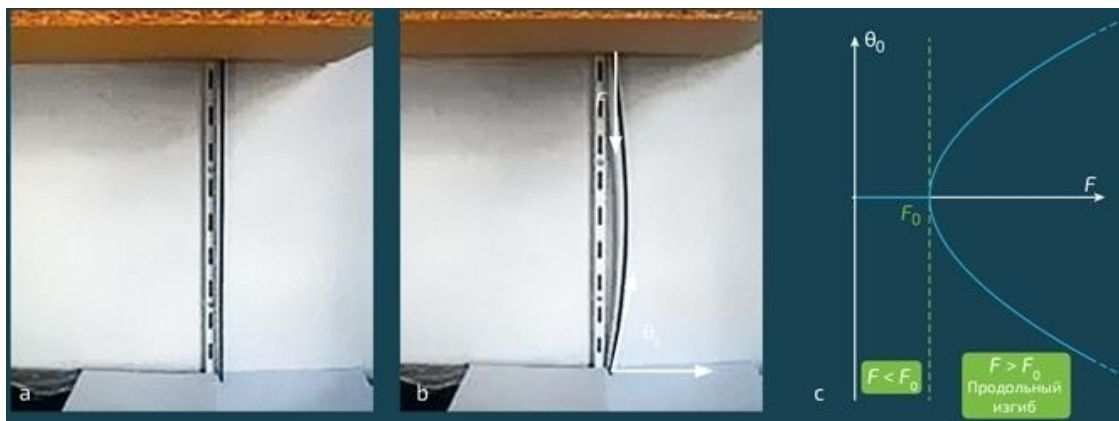
### Опыт с продольным изгибом

Возьмем плоскую пластиковую линейку, поставим ее на стол и надавим на верхний конец. Пока приложенная сила невелика, линейка остается прямой (см. илл. ниже). Но при определенном давлении линейка сгибается: это явление называется продольным изгибом. Оно возникает, когда сила, действующая на концы, превышает некоторый предел, который тем ниже, чем



длиннее и гибче линейка. Очевидно, архитекторы и строители не должны превышать этот предел, когда, например, подпирают террасу металлическими опорами...

В нашем опыте, когда сила воздействия превысила этот предел, линейка согнулась вправо. Но с той же вероятностью она могла бы согнуться и влево! Эту ситуацию можно сравнить с выбором, стоящим перед путешественником, который оказался на незнакомой развилке. Физическое явление, которое открывает две равновероятные возможности изменения какого-либо параметра, ученые называют бифуркацией (от лат. *bifurcus* – «раздвоенный»).



### Явление продольного изгиба

**а.** До тех пор, пока вертикальная сила  $F$ , прилагаемая к линейке, остается меньше предела  $F_0$ , линейка не деформируется.

**б.** Как только  $F > F_0$ , линейка начнет сгибаться (и даже может сломаться, если сила станет слишком большой).

**с.** Изменение угла  $\Theta_0$ , который образует вертикальная линейка в зависимости от величины силы  $F$ . Когда последняя достигает величины  $F_0$ , линейка может изогнуться вправо ( $\Theta_0 > 90^\circ$ ) или влево ( $\Theta_0 < 0$ ): кривая изменения угла  $\Theta_0$  имеет две ветви, которые создают бифуркацию

## Озера и реки

В большое озеро обычно впадает много водных потоков. Например, в Женевское озеро втекает не только Рона, но и небольшие реки, такие как Дранс на юге и Вёвеж на севере. А вытекает из него одна Рона. И это общее утверждение: независимо от количества впадающих в озеро рек, из него никогда не вытекает более одной! Как это объяснить?

Причина заключается в том, что вода из озера вытекает по самому глубокому (низкому) руслу, которое она находит. Если не принимать во внимание исключительные случаи паводков, то обычно поверхность воды в озере находится на уровне самого низкого из возможных мест вытекания, поэтому из него выходит только один поток. Даже если из озера в данный момент вытекает несколько рек, такая ситуация будет нестабильной: ее можно наблюдать только на недавно сформировавшихся озерах. Действительно, самый глубокий поток с более быстрым течением вызовет и более сильную эрозию. В результате его пропускная способность будет увеличиваться, что приведет к снижению уровня озера. Поэтому другие русла будут постепенно мелеть и в конце концов заполнятся грязью. Таким образом, из всех вытекающих из одного озера рек «выживает» только самая глубокая.



**9. Дельта Роны. Подходя к Средиземному морю, река разделяется на несколько рукавов**

Аналогичными свойствами обладают и реки. Хорошо известно, что реки способны сливаться (когда одна впадает в другую), в то время как разветвляются они очень редко. Поток воды повсюду следует по пути с наибольшим уклоном, и маловероятно, что в каком-то месте этот путь раздвоится. Лишь одна специфическая область является исключением: это устье реки, то есть место ее впадения в море, водохранилище, озеро или другую реку. Здесь река иногда разделяется на несколько рукавов, образуя дельту (илл. 9). Дело в том, что вдали от моря поток выстраивает свой путь через складки местности, которые формировались долгие миллионы лет. В дельте же, напротив, река сама формирует свои берега, при этом вынося песок в море и перекрывая этими отложениями свой путь.

Итак, река добралась до моря, и эта глава подходит к концу! Мы еще вернемся на морской берег в главе 5, чтобы обсудить другое удивительное природное явление – прилив.

## Глава 2

### Искусственные и природные волноводы

**Каким чудом звук, порожденный вблизи австралийского побережья, достигает Бермудских островов в десятках тысяч километров от него? Чтобы это понять, проведем параллель между распространением звука и света, для описания которого мы привыкли использовать понятие «луч». Затем мы погрузимся в океан в поисках таинственного волновода, который может передавать звук на огромные расстояния.**

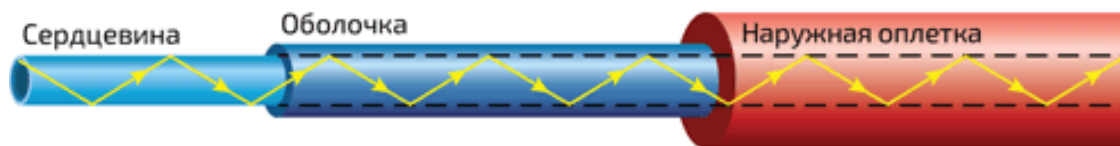
За последние 20 лет огромное, постоянно растущее количество данных перемещается с одного континента на другой благодаря оптоволоконным кабелям, пересекающим океаны (илл. 1). На илл. 2 показан путь сообщения, отправленного с вашего компьютера или телефона американскому или японскому коллеге. Конечно, эти световые волны слабеют во время пути, но затухание относительно невелико, а необходимое количество промежуточных станций удивительно мало.

### Распространение звуковых волн

Оказывается, что океан способен выступать в качестве акустического волновода. Это удивительное явление обнаружили советские и американские ученые в 1940-х годах: звуковые волны, распространяющиеся в океане, иногда обнаруживаются в тысячах километров от их источника! В одном из самых впечатляющих экспериментов звук подводного взрыва у побережья Австралии обогнул половину земного шара и был зарегистрирован на уединенном архипелаге Атлантического океана – Бермудских островах. Звуковой сигнал прошел под водой более 19 600 км – абсолютный рекорд!



**1. Пучок оптических волокон в защитной оболочке.** Оптические волокна из стекла или пластика имеют в диаметре 125 мкм



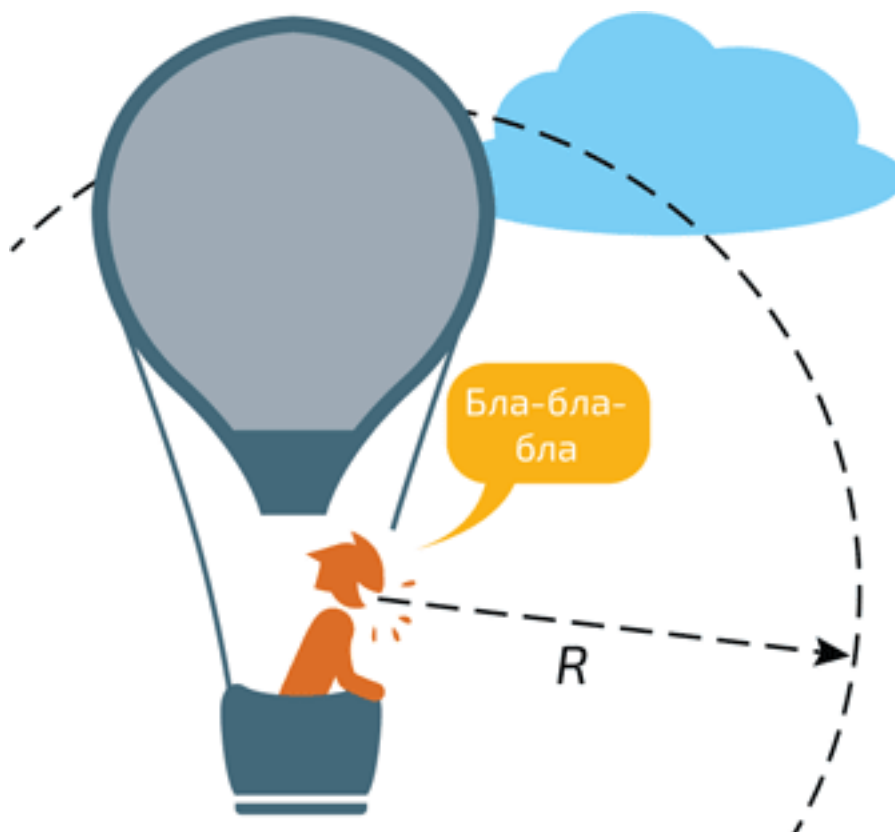
**2. Распространение светового луча в оптоволокне.** Передаваемый луч много раз отражается от границы между сердцевинной и оболочкой и таким образом направляется по волокну. Данные кодируются изменением интенсивности света

Интенсивность звукового сигнала падает по мере удаления от источника. Действительно, излучаемая источником энергия распределяется равномерно во всех направлениях. При этом в отсутствие затухания общая энергия звуковой волны остается неизменной. На расстоянии  $R$  от источника эта энергия распределяется по площади сферы, пропорциональной  $R^2$ . Таким образом, интенсивность звука при удалении от источника падает по закону  $1/R^2$  (илл. 3). И это еще не учитывая рассеивающих явлений, поглощения и диффузии в среде, где распространяется звук!

Чтобы австралийский взрыв был услышан на Бермудских островах, интенсивность дошедшей туда волны должна оказаться достаточно заметной. А для этого необходимо, чтобы излучаемая источником волна была направлена на архипелаг и не рассеивалась в других направлениях. Чтобы волна распространялась соответствующим образом, нужно, чтобы у волновода были полностью отражающие стенки: непроницаемые и не поглощающие звук.

На каком же принципе основывается этот «акустический волновод» в океане? Можно предположить, что он аналогичен принципу оптических волноводов, который предполагает полное внутреннее отражение волн от стенок (см. главу 2, «Отражение и преломление световых волн»). Значит, происходит полное отражение акустических волн на границе между водой и воздухом? Нет! Скорость звука в воде намного выше, чем в воздухе (в холодном Гренландском море она составляет в среднем 1411 м/с, в теплом Средиземном море – 1554 м/с, в то время как скорость звука в воздухе при нормальных условиях равна 335 м/с). Это означает, что вода для звука является средой гораздо менее «плотной», чем воздух, – ситуация, прямо противоположная случаю распространения света.





**3.** Интенсивность звука, издаваемого говорящим, уменьшается как  $1/R^2$  по мере удаления от него, при отсутствии препятствий или фокусировки звука в одном направлении

Отсюда следует, что условия полного отражения для звуковой волны, распространяющейся из воды в воздух, не соблюдаются. Когда исходящая от дна моря звуковая волна доходит до поверхности, всегда возникают преломленная и отраженная волны. Еще одно следствие: в случае акустической волны преломленный луч не отклоняется от вертикали, а, наоборот, приближается к ней.

Значит, предположение, что поверхность океана может быть отражающей поверхностью, неверно? Не так быстро! Фактически доля энергии, которая преломляется на границе между водой и воздухом, во многом зависит от угла падения и соотношения скоростей между средами. В случае очень разных скоростей, как в нашей ситуации, интенсивность преломленной (вышедшей в воздух) волны невелика вне зависимости от угла падения. Таким образом, на поверхности океана отражение *почти* полное: доказано, что не более 1 % интенсивности падающей звуковой волны, распространяющейся почти горизонтально, проходит из воды в воздух. Следовательно, поверхность океана, похоже, способна хорошо отражать звук из глубин...



**4.** Пример направленного распространения акустических волн в воздухе. Дети делятся секретом... Держа руку у рта, девочка предотвращает распространение звукового сигнала во всех направлениях

Так что же, мы, наконец, нашли объяснение распространения звука на большие расстояния в океанах? Увы, нет – по двум причинам. Во-первых, часть энергии все равно теряется каждый раз, когда звуковой луч попадает на поверхность океана. Во-вторых, она почти всегда неровная, что препятствует отражению звуковой волны. В конечном счете поверхность океана, за исключением случаев штиля, не может сформировать верхнюю границу природного океанического волновода, который мы пытаемся разыскать. Что касается дна океана, то оно еще меньше подходит для образования такой границы. Донные отложения не отражают звук, а, наоборот, склонны поглощать его. Таким образом, стенки океанического проводника звука должны находиться где-то между дном и поверхностью... именно здесь мы их и обнаружим! Чтобы продолжить наше исследование, давайте подробнее рассмотрим процесс распространения звука в океане.

## **Скорость звука в морской воде**

В такой жидкости, как морская вода, скорость звука зависит от ее свойств, которые неодинаковы в разных частях океана. Здесь и находится ключ к решению нашей задачи! В зависимости от содержания соли, температуры и давления воды, скорость звука варьирует от 1400 до 1540 м/с. Например, давление на глубине возрастает, что, как правило, делает звук быстрее. Также звук распространяется быстрее при более высокой температуре. Но более плотная холодная вода опускается на дно океана. Эти два противодействующих эффекта объясняют изменение скорости звука в зависимости от глубины (илл. 5). В непосредственной близости от поверхности резкое понижение температуры сначала приводит к постепенному уменьшению скорости звука  $c$ . На больших глубинах изменение температуры не так ощутимо, преобладает эффект увеличения давления, и это приводит к возрастанию  $c$  по мере приближения ко дну. Глубина  $z_m$  чаще всего составляет от 1000 до 1200 м, но может достигать и 2000 м на низ-

ких широтах, где теплым остается более толстый слой воды. В высоких широтах, наоборот,  $z_m$  может составлять всего 500 или даже 200 м, или еще меньше в полярных регионах. Изменение солёности в зависимости от глубины, как правило, незначительно и не оказывает заметного эффекта.

### Отражение и преломление световых волн

Напомним свойства отражения и преломления в случае оптики. Если луч света из среды 1 попадает на границу (предположительно плоскую) со средой 2, часть света отражается в среду 1, а другая часть проходит в среду 2 (см. илл. а): это явление преломления. Угол преломления  $\alpha_2$  связан с углом падения  $\alpha_1$  законом Снеллиуса:

$$\frac{\sin \alpha_2}{c_2} = \frac{\sin \alpha_1}{c_1},$$

где  $c_1$  и  $c_2$  – скорости света соответственно в средах 1 и 2.

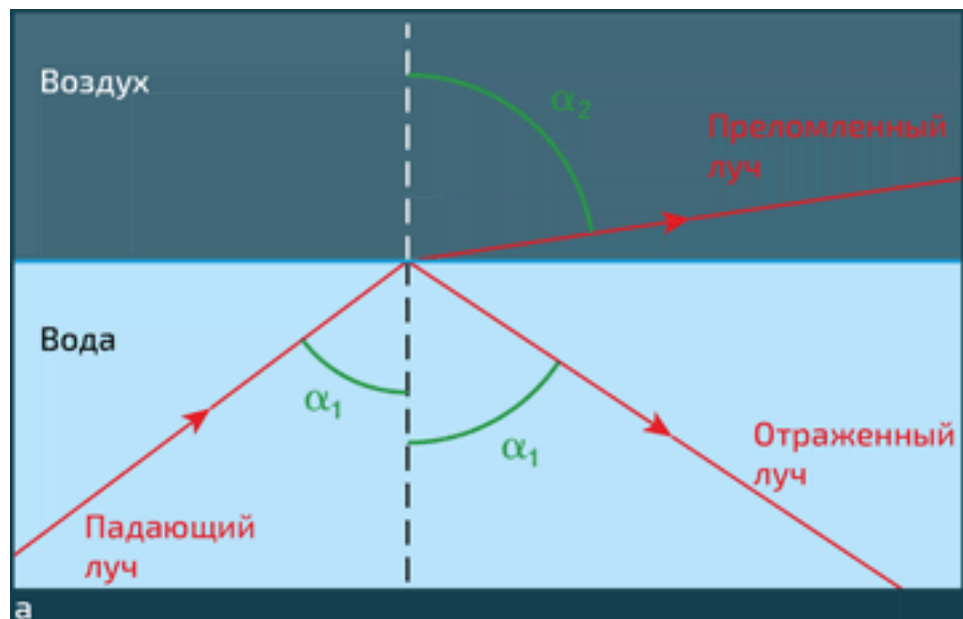
Эту формулу можно также написать, используя индексы преломления сред 1 и 2, соответственно  $n_1 = c/c_1$  и  $n_2 = c/c_2$ , где  $c$  – скорость света в вакууме.

Если световой луч попадает на поверхность с достаточно большим

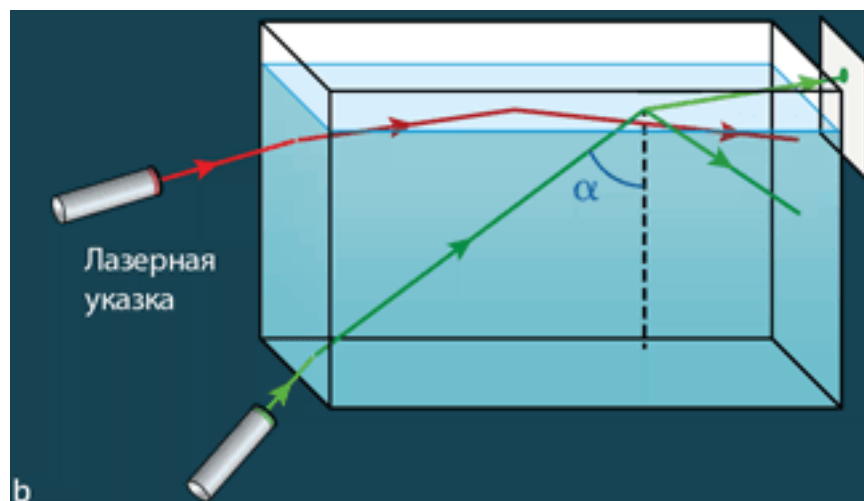
$$\frac{c_2 \sin \alpha_1}{c_1}$$

углом падения  $\alpha_1$ , то величина становится больше 1, и не существует такого значения угла  $\alpha_2$ , которое соответствовало бы приведенной выше формуле. Таким образом, преломление луча оказывается невозможным, и происходит полное внутреннее отражение (см. илл. б). Это явление используется в оптических волноводах: луч претерпевает целый ряд отражений внутри проводника, и поэтому свет распространяется по нему с минимальными потерями. Самый известный пример оптического волновода – оптоволокно.

Как и световые волны, звуковые волны могут отражаться и преломляться. Формула Снеллиуса остается применимой и к описанию поведения «звуковых лучей», но  $c_1$  и  $c_2$  в этом случае, очевидно, представляют собой скорости звука, а не света.

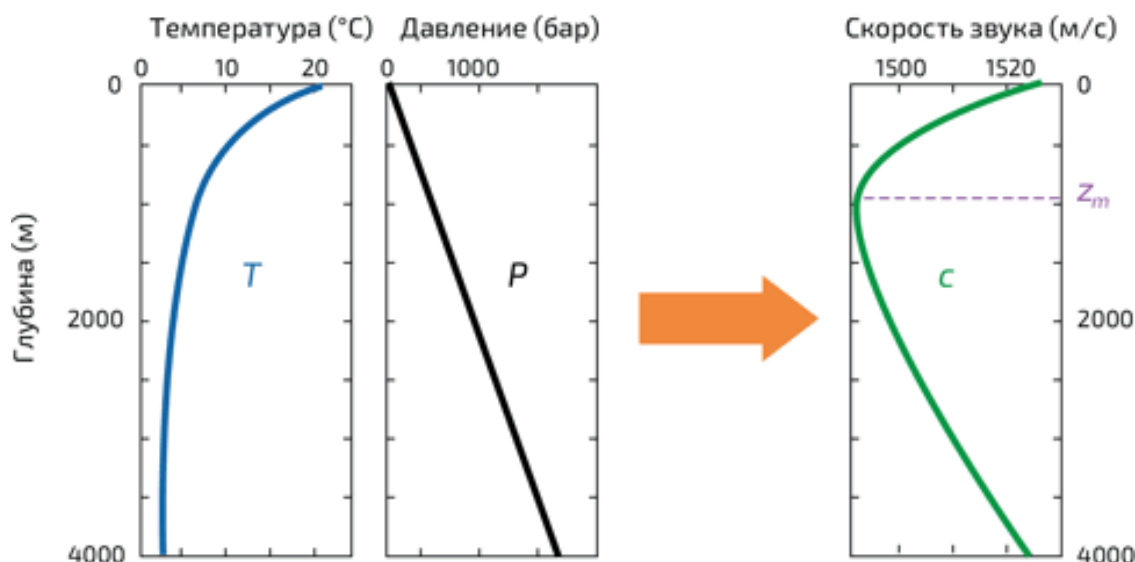


Преломление и отражение светового луча (красные стрелки), выходящего из воды (показатель преломления равен 1,33) в воздух (показатель преломления близок к 1,0)



Опыт с лазерными указками демонстрирует явление полного отражения на границе между водой и воздухом. Луч, падающий на поверхность воды под небольшим углом  $\alpha$  (зеленый), подвергается лишь частичному отражению: часть энергии покидает воду с преломленным лучом, и на экране появляется световое пятно. Скользящий луч (красный) испытывает полное внутреннее отражение





5. Пример изменения скорости звука  $c$  в океане в зависимости от глубины. В результате повышения давления и понижения температуры по мере приближения ко дну скорость достигает минимума на глубине  $z_m$ , чаще всего около 1000 м

## Когда звук распространяется зигзагами

Теперь рассмотрим звуковой луч, источник которого находится на глубине  $z_m$ . Независимо от того, пойдет ли он вверх или вниз, в области, в которой он оказывается, скорость звука выше, чем на оси. Таким образом, в результате последовательного прохождения слоев воды на своем пути звуковой луч постепенно искривляется, вплоть до скользящего падения под таким углом, для которого происходит полное отражение (см. врезку). Тогда он начинает искривляться в направлении увеличения (или уменьшения) глубины, пока снова не достигнет глубины  $z_m$ , где изменение скорости звука меняет знак. Таким образом, луч движется по зигзагообразной траектории между двумя плоскостями (илл. 6).

Эти две плоскости эквивалентны верхней и нижней границам волновода, у которого нет боковых стенок. Тем не менее благодаря описанному явлению звук способен распространяться в океане на большие расстояния. Наконец-то мы закончили расследование!

## Эффективность океанического волновода

Не все исходящие из источника звуковые лучи попадают в этот «океанический волновод». Первоначально звук из источника распространяется во всех направлениях, и превращение его в «звуковой луч» зависит от угла, образующегося между ним и вертикалью. Если этот угол достаточно велик, то звуковой луч распространяется безгранично. Если же угол слишком мал, звуковой луч достигнет поверхности или дна океана. Но дно океана неровное, и оно, как и поверхность (кроме редких моментов, когда она совершенно спокойна), рассеивает звук. Таким образом, море, как правило, может послужить волноводом только для звуковых лучей, которые не достигают ни поверхности, ни дна океана. На практике существуют «акустические каналы», по которым звук передается на большие расстояния, и «теневые зоны», куда звук никогда не попадает.

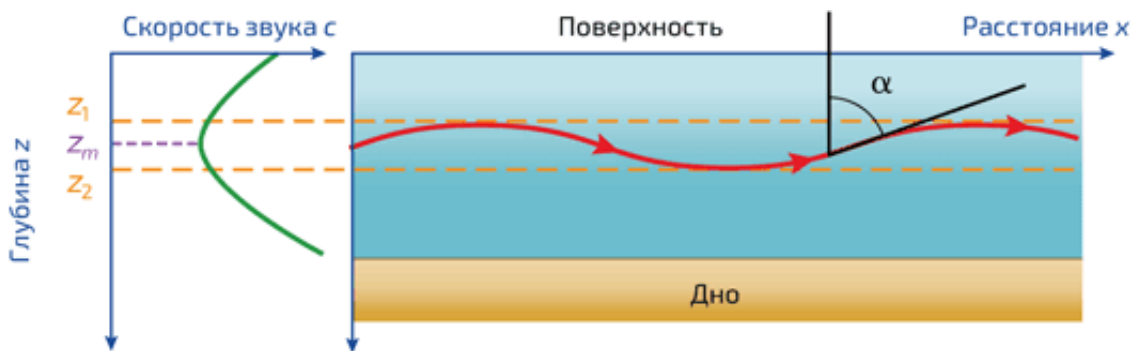
## Звуковые волноводы, созданные человеком

Распространение звука в газах или жидкостях представляет собой возмущение, периодически изменяющее в пространстве и времени плотность частиц, эту среду составляющих. Любой выделенный объем жидкости локально подвергается периодической череде сжатий и расширений.

Скорость звука в жидкостях и твердых телах, вообще говоря, выше, чем в газах. Это и не удивительно, ведь в вакууме звук не распространяется вообще, а разреженный газ имеет плотность промежуточную между вакуумом и конденсированным веществом. Однако если скорость звука в двух средах сильно отличается, то передача звука из одной в другую может быть затруднена. Это явление используется в стетоскопе – инструменте, который доносит в ухо врача звуки из грудной клетки пациента. Первоначально он представлял собой простую деревянную трубку.

Другой пример волновода, основанного на явлении полного отражения, которое возникает при переходе звука из воздуха в твердое тело, – это старинная система акустических труб, соединяющая различные уровни на кораблях. Сделанная обычно из меди или латуни, она передает приказ с капитанского мостика в машинное отделение. В таком волновode волна практически одномерна – это означает, что интенсивность звуковой волны остается постоянной по всей длине трубы, даже на удалении от источника. Затухание звука в воздухе настолько низкое, что, если бы можно было построить прямую трубку длиной 750 км и избежать поглощения звука стенками, она послужила бы телефоном между Парижем и Марселем. К сожалению, скорость звука в воздухе составляет всего 340 м/с, так что слова из Парижа в Марсель добирались бы более получаса...

Изучение распространения звука в океанах серьезно интересовало британских и американских ученых во время Второй мировой войны. Тогда речь шла об обнаружении немецких подводных лодок раньше, чем они подплывут достаточно близко, чтобы атаковать американские или английские суда. Акустическое обнаружение подводных лодок с помощью сонаров сыграло важную роль в битве за Атлантику: в 1943 году, после тяжелых потерь, союзники сумели уничтожить значительное количество немецких подлодок, установив тем самым свое превосходство на море.



6. Акустический луч (красный), излучаемый на глубине  $z_m$ , проходит между двумя плоскостями, от которых он полностью отражается. Зависимость скорости звука от глубины  $c(z)$  в океане представлена зеленой кривой. Значения  $z_1$  и  $z_2$  (считаем, что глубина равна 0 на поверх-

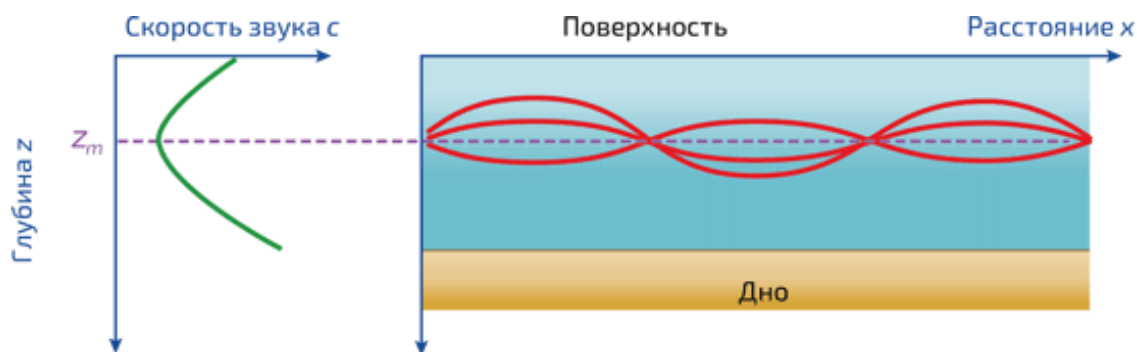
ности) зависят от угла падения луча на глубине  $z_m$  и определяются законом Снеллиуса:  $c(z_1) = c(z_2) = c_m / \sin \alpha(z_m)$

### Простая модель

Интересно рассмотреть случай, когда скорость звука  $c$  – простая функция глубины  $z$ . Например, функция, имеющая минимум в  $z_m$ :  $c(z) = c(z_m) + k(z - z_m)^2$ , где  $k$  – константа. В этом случае кривая, иллюстрирующая изменение скорости звука в зависимости от глубины (зеленая на илл. 5 и 6), является параболой. На самом деле это приближение почти всегда справедливо для глубин  $z$ , близких к  $z_m$ . Звуковой луч, немного отклоняющийся от горизонтали, следует по синусоиде, период которой не зависит от угла падения, так что все звуковые лучи в одной вертикальной плоскости сходятся в точках оси  $z = z_m$  (илл. 7). Эти точки аналогичны фокусам оптических приборов, таких как линзы, в которых сходятся падающие световые лучи, поэтому наблюдается явление фокусировки звуковых волн. Параболическая форма кривой хорошо описывает изменение скорости звука в зависимости от частоты в глубинах океана. Однако, поскольку кривая  $c(z)$  на практике не является параболой, то фокусировка звука не идеальна.

### Заключение

Когда звук излучается на соответствующей глубине в море, значительная часть звуковой энергии оказывается заперта в «акустических каналах». Достаточно ли это объяснение для прохождения звука от Австралии до Бермудских островов? Попробуем подсчитать. Хотя рассмотренный нами механизм описывает именно распространение звука в океане, остаются возможными еще два направления. Звуковая волна, излучаемая в середине океана, проходит в течение времени  $t$  расстояние  $R$  порядка  $c_{зв} t$ , где  $c_{зв}$  – средняя скорость звука в воде, скажем, 1500 м/с. Даже если предполагается, что потери равны нулю, энергия звуковой волны должна распределяться по всей, примерно цилиндрической, поверхности зоны  $2\pi Rh$ , где разница в глубине  $h$  между верхней и нижней границами канала может достигать глубины океана. Таким образом, интенсивность звука уменьшается как  $1/R$  по мере удаления от источника. Это происходит не так резко, как затухание, пропорциональное  $1/R^2$  звука в воздухе (илл. 3), но и оно едва ли оставляет надежду на то, что звук, раздавшийся в Австралии, будет услышан на Бермудах. Однако если приемник звука находился в точке фокуса, где сходятся звуковые лучи (илл. 7), а величина  $h$  невелика, то в принципе отголосок взрыва мог быть услышан. Кроме того, можно допустить, что колебания солености и температуры в толще океана на пути звуковых лучей создают и вертикальные отражающие стенки, препятствующие рассеянию энергии звуковой волны. И все же удивительно, что звук достигает Бермудских островов в обход мыса Доброй Надежды, учитывая дополнительное поглощение энергии, например, пузырьками воздуха или планктоном.



### 7. Явление фокусировки звуковых лучей



**8.** Пример миража в Ливийской пустыне. По мере приближения к раскаленному песку солнечные лучи встречают все более горячий воздух (и, следовательно, среду с уменьшающимся показателем преломления): таким образом, они, как и звуковые лучи на илл. 7, все сильнее отклоняются вплоть до отражения. Наблюдателю кажется, что в продолжении этих отраженных лучей он видит воду

Распространение звука в естественных подводных каналах – не единственный случай волновода, созданного природой. Еще несколько примеров связаны со спецификой распространения электромагнитных волн. Наиболее эффектные миражи, которые возникают из-за непрямолинейного распространения света в очень неравномерно нагретой атмосфере (илл. 8). Кроме того, можно вспомнить короткие радиоволны, которые распространяются на большие расстояния благодаря отражению в ионосфере – верхней области атмосферы на высоте от 60 до 800 км. При определенных условиях радиоприемник может принимать радиопередачи из других стран.

## Глава 3

### Цвета моря и неба

**Когда стоит хорошая погода, днем небо голубое, а в сумерках – алое. Через несколько часов опускается ночная тьма, и на черном небе вспыхивают мириады звезд. Днем облака белые или сероватые. В дождливую погоду иногда появляется радуга... Какие физические принципы объясняют все эти цвета? Ответ вы найдете в этой главе. И поскольку речь идет о небесах, мы поговорим и об их крылатых обитателях – птицах и насекомых.**

Море и небо дарят нам разнообразные цвета, вдохновившие многих художников. Аркадий Рылов воспроизвел эти цвета на картине, выставленной в Третьяковской галерее в Москве (илл. 1). Белые хмурые облака плывут по небу всех оттенков синего. Поверхность моря более темная, подошвы волн – почти черные, а гребни местами образуют белые «барашки».

### Цвет моря и сила ветра

Количество «барашков» и высота волн зависят от скорости ветра. Эта информация имеет важное значение для моряков: для определения скорости ветра они пользуются эмпирической таблицей, которую разработал британский адмирал сэр Фрэнсис Бофорт (1774–1857) (см. главу 2). На картине Рылова наличие небольшого количества «барашков» свидетельствует о ветре 12–19 км/ч, то есть 7–10 морских узлов. Такой ветер считается слабым и соответствует силе в 3 балла по шкале Бофорта.



1. «В голубом просторе», картина художника-символиста Аркадия Рылова (1870–1939)

Баллы Бофорта	Словесное определение силы ветра	Скорость ветра на высоте 10 м		Внешний вид моря
		в морских узлах	в км/ч	
0	Штиль	< 1	< 1	Море зеркально гладкое
1	Тихий ветер	1–3	1–5	Рябь, пены нет
2	Легкий ветер	4–6	6–11	Гребни не опрокидываются
3	Слабый ветер	7–10	12–19	Короткие волны (< 60 см), маленькие «барашки»
4	Умеренный ветер	11–15	20–28	Удлиненные волны (< 1,5 м), «барашки» во многих местах
5	Свежий ветер	16–20	29–38	Умеренные волны (2 м) и слабые брызги
6	Сильный ветер	21–26	39–49	Крупные волны (4 м), белые пенистые гребни и брызги
7	Крепкий ветер	27–33	50–61	Следы пены и гребни высотой до 5,5 м, которые начинают бушевать
8	Очень крепкий ветер	34–40	62–74	Вихри пены на гребнях волн и полосы пены. Волны до 7,5 м в высоту
9	Шторм	41–47	75–88	Волны бушуют, брызги ограничивают видимость. Волны достигают 10 м в высоту
10	Сильный шторм (буря)	48–55	89–102	Волны до 12,5 м в высоту, гребни покрыты пеной
11	Жестокий шторм	56–64	103–117	Море покрыто пеной, взбиваемой ветром. Волны до 16 м
12	Ураган	> 65	> 118	Белое море пены, воздух полон брызг, почти нулевая видимость

### Шкала Бофорта

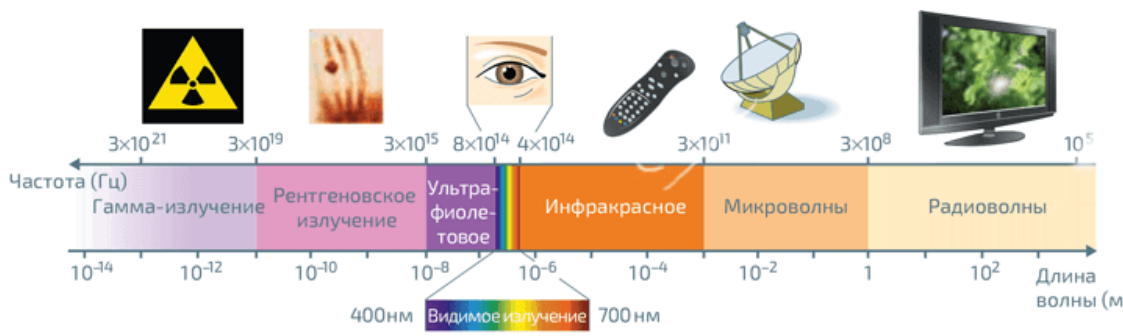
Представление о скорости ветра можно получить не только с помощью шкалы Бофорта, но и по контрасту между яркостью моря и неба. Они одинаковы, когда на море штиль, а горизонт едва различим. Как правило, легчайшего ветра достаточно, чтобы встревожить поверхность воды и создать контраст: небо ярче моря, горизонт выглядит как четкая линия. Это явление было изучено несколько десятилетий назад российскими учеными на борту исследовательского судна «Дмитрий Менделеев»

Яркость морской поверхности зависит от угла наблюдения. Действительно, луч света, падающий на поверхность моря, как частично преломляется, так и частично отражается (см. главу 2, «Отражение и преломление световых волн»). Интенсивность отраженного луча зависит, в частности, от показателя преломления воды и угла падения. Чем острее угол, тем сильнее отражение. Поэтому поверхность моря кажется более яркой у горизонта, чем вблизи наблюдателя.



А что насчет его цвета? Цвет поверхности практически непредсказуем, так как зависит от многих факторов, таких как глубина моря, положение солнца, цвет неба, наличие взвешенных частиц и водорослей и т. д. Все эти факторы влияют на отражение света от поверхности, его рассеяние и поглощение в воде. И все же море чаще всего синее. Причина в том, что вода поглощает меньше света в диапазоне между 400 и 500 нм (синего), чем в остальной части видимого спектра (см. ниже). Да, вода поглощает мало синего! стакан воды выглядит совершенно прозрачным. Но начиная с толщины в несколько метров вода начинает заметно поглощать свет.

## Цветовое зрение

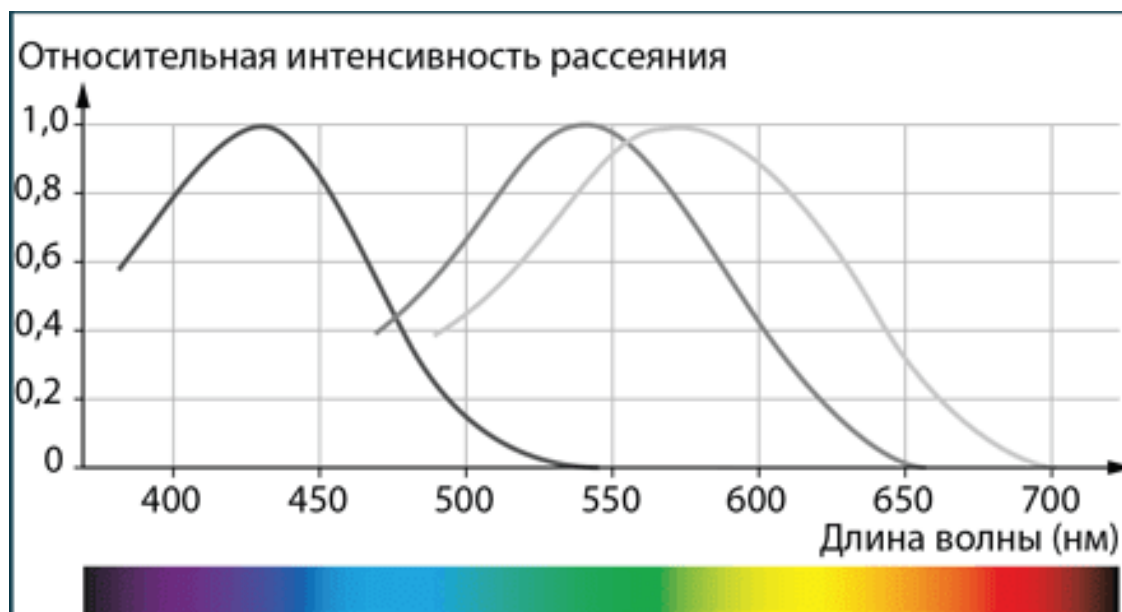


**Различные области электромагнитного излучения и их применение.** Узкая область между 400 и 800 нм (то есть на частотах между 800 и 400 ТГц) соответствует видимому спектру. Каждое излучение, или «спектральный цвет», обладает своей длиной волны  $\lambda$ , которая связана с частотой  $\nu$  отношением  $\lambda = c/\nu$ , где  $c$  – скорость света в вакууме

Человеческий глаз чувствителен к электромагнитному излучению волн длиной от 400 до 800 нм (см. илл.). Объекты кажутся цветными, либо когда они излучают свет, будучи достаточно нагретыми (как кусок раскаленного железа), либо когда они освещены и «рассеивают» (иными словами, возвращают) часть полученного света извне. Свет, попадающий в глаза, обычно полихроматичен, то есть содержит излучения с различными длинами волны в разных пропорциях. Эта композиция и определяет воспринимаемый нами цвет. Таким образом, объект, поглощающий все световое излучение, кажется черным; объект, излучающий электромагнитное излучение всех длин волн от 400 до 800 нм с сопоставимой интенсивностью, выглядит белым.

В глазу цветовое восприятие обеспечивается клетками, называемыми колбочками, которые выстилают заднюю поверхность сетчатки. Существует три типа колбочек (см. илл.), передающих сигналы в мозг, который интерпретирует их и получает визуальное ощущение цвета. Воспринимаемые цвета не ограничиваются цветами радуги или «спектральными цветами», которые возникают вследствие разложения белого света. Пурпурный, например, получается путем объединения красного (около 680 нм) и синего (около 480 нм) света. Кроме того, один и тот же воспринимаемый цвет может соответствовать свету самых разных композиций. Например, объект может казаться желтым, когда он излучает монохроматический свет длиной волны около 580 нм, или излучает свет видимого диапазона, лишенный своей синефиолетовой части, или даже комбинацию красного и зеленого светов.



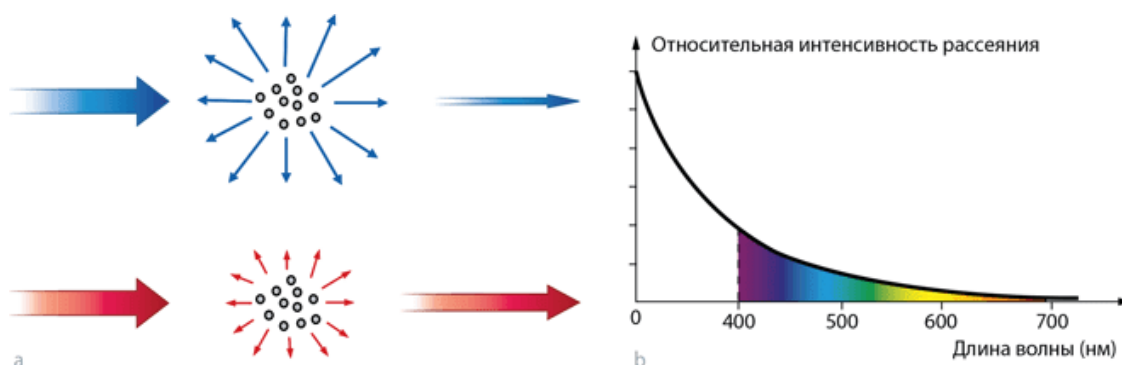


Чувствительность трех типов колбочек в зависимости от длины волны

## Цвет неба в хорошую погоду

В то время как предсказать цвет моря непросто, цвет неба в хорошую погоду легко объясняется физическими принципами, выявленными английским физиком лордом Рэли (Рэлеем) (1842–1919). В отсутствие облаков цвет неба определяется результатом взаимодействия солнечного излучения с компонентами атмосферы Земли, а именно с неоднородностями (флуктуациями) плотности молекул азота и кислорода.

Как эти молекулы ведут себя, попав в поле солнечного излучения? Рассмотрим монохроматический свет, обладающий заданной длиной волны  $\lambda$ . Он представляет собой колеблющиеся в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения света, с частотой  $\nu$  магнитное и электрическое поля. Под действием колеблющегося электрического поля электроны в молекулах также колеблются с частотой  $\nu$ . В результате и сама молекула становится маленьким излучателем, испуская свет той же частоты, что и падающая волна. Это похоже на то, как излучает электромагнитные радиоволны теле- или радиоантенна. В случае молекул и солнечного света длина его волны оказывается много большей размера молекул, и такое рассеяние называется «рассеянием Рэлея». Расчеты показывают, что интенсивность рассеянного света оказывается пропорциональной четвертой степени частоты  $\nu^4$  (или  $1/\lambda^4$ ). Это утверждение называется законом Рэлея – Джинса (илл. 2).



**2. Рассеяние света молекулами и закон Рэля.** Под воздействием падающего монохроматического света (а) молекулы переизлучают свет той же длины волны во всех направлениях. Синему цвету соответствует длина волны около 450 нм, а красному – около 650 нм. (b) Согласно закону Рэля, четвертая степень отношения  $650/450$  равна 4,3, то есть интенсивность рассеяния синего примерно в 4 раза выше, чем красного

Как все это связано с цветом неба? Согласно закону Рэля, рассеяние электромагнитных волн оказывается значительно интенсивнее для высоких частот по сравнению с низкими. Это означает, что молекулы атмосферы сильнее рассеивают синий цвет, чем красный, зеленый или желтый. Таким образом, наших глаз преимущественно достигают именно световые лучи синего цвета. Вот почему небо синее! Следуя этому рассуждению, можно было бы предположить, что небо должно быть фиолетовым, так как фиолетовое излучение обладает более высокой частотой, чем синее. В действительности в спектре солнечного излучения доля фиолетового меньше, чем синего. Кроме того, и максимальная чувствительность человеческого глаза находится в области зеленого (555 нм). В результате фиолетовая часть спектра солнечного излучения оказывается подавленной в восприятии человеческого глаза, и небо видится синим (см. главу 3, «Цветовое зрение»).



**3. а.** Днем чистое небо кажется синим, так как молекулы атмосферы сильно рассеивают синюю компоненту солнечного излучения.

**б.** На закате доходящий до нас солнечный свет преодолевает гораздо более толстый слой атмосферы, и небо пламенеет

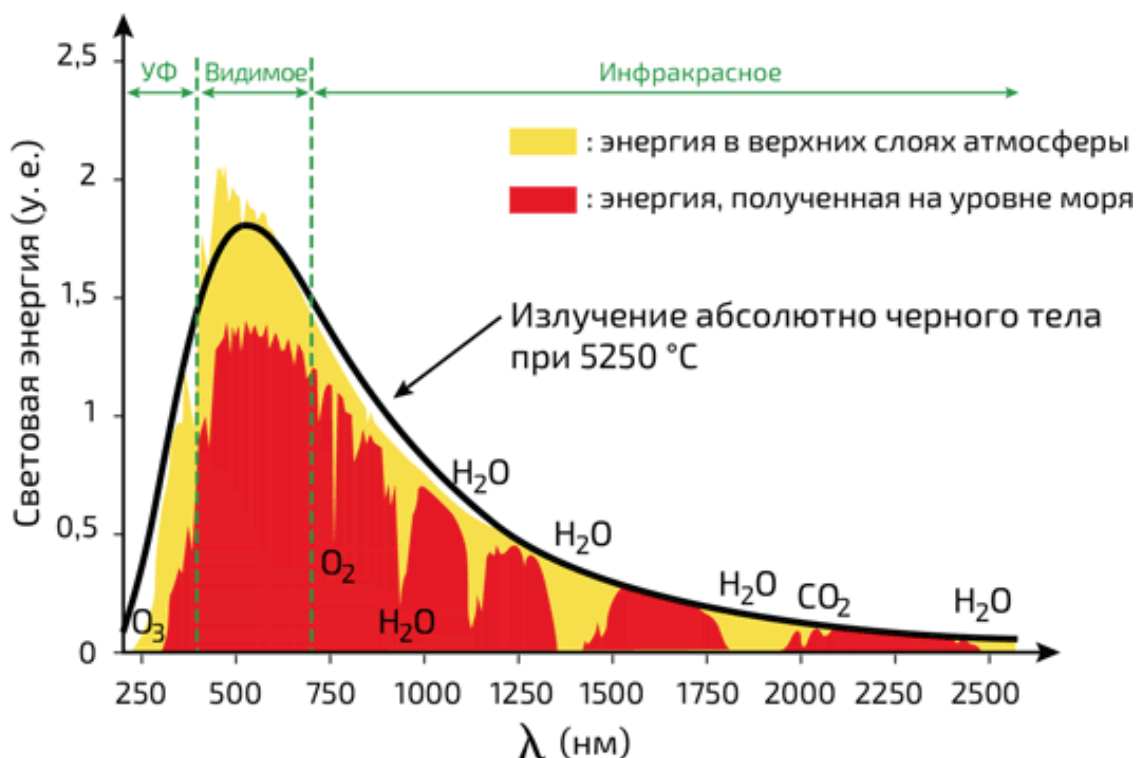
## **Небо на закате... и после**

На закате небо над горизонтом принимает красивый розовый оттенок (илл. 3). Этот цвет также обусловлен рассеянием солнечного света в атмосфере. Поскольку свет распространяется во всех направлениях, то до нас доходит лишь его часть, а остальное возвращается в пространство. Часть солнечной энергии, возвращающаяся за пределы земной атмосферы, невелика, однако для некоторых явлений она может оказаться существенной (илл. 4). В видимом излучении разница между энергией, получаемой поверхностью земли и верхними слоями атмосферы, обусловлена прежде всего рассеянием. Так, мы видим, что в дневное время энергия, получаемая на земле, меньше падающей на верхние слои атмосферы примерно на 25 % в синем и на 10 % – в красном диапазонах. На закате эти пропорции изменяются, поскольку свету приходится преодолевать гораздо большую толщину атмосферы (илл. 5). Таким образом, синий свет почти целиком рассеивается, и наблюдатель на земле видит в основном красный.

Как только солнце исчезает за горизонтом, постепенно наступает ночь. Цвет неба в ночное время – совсем иной вопрос (см. главу 3, «Тайны безлунной ночи»).

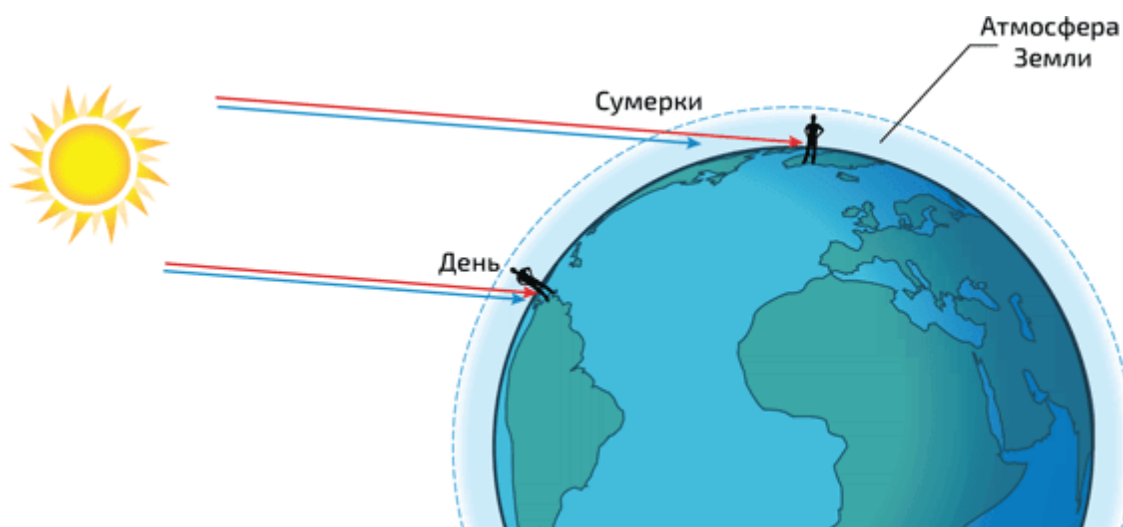
## **Цвет облаков**

Как можно увидеть на картине Рылова (см. илл. 1 в главе 3), облака бывают белые, серые или черноватые, в зависимости от их толщины и места, откуда их наблюдают. В любом случае они непрозрачны: солнце не видно сквозь облака, а солнечный свет оказывается более или менее интенсивным в зависимости от их толщины. Он доходит до нас, рассеянный каплями воды, из которых состоит облако. Такое рассеяние намного более интенсивно, чем рассеяние на флуктуациях плотности молекул кислорода и азота, которое мы описали выше. Почему?



4. Световая энергия, получаемая верхними слоями атмосферы (желтый) и на уровне моря (красный) в дневное время с учетом рассеяния и поглощения. Отметки «H<sub>2</sub>O» и «O<sub>2</sub>» обозначают диапазон поглощения воды и кислорода соответственно. Энергия, отложенная по оси ординат, выражается в ваттах на кв. м поверхности, в то время как длины волн на оси абсцисс измеряются в нанометрах

Причина в том, что большие объекты рассеивают свет намного сильнее, чем маленькие. Например, если капля воды содержит миллион молекул (и имеет диаметр около 0,04 мкм), она рассеивает свет почти в миллион миллионов раз интенсивнее, чем миллион отдельных молекул! Получается, что если в капле миллиард молекул, то она рассеивает свет в миллиард миллиардов раз больше, чем такое же число изолированных молекул? Нет! Диаметр этой капли составляет порядка 0,4 мкм — величина существенная по сравнению с длиной волны видимого света. Закон «голубого неба» Рэля в этом случае неприменим, поскольку переизлучение света каждой из молекул воды, находящейся в капле, случайно по фазе. Последнее обстоятельство приводит к ослабляющей интерференции этих вторичных волн — явлению, о котором мы поговорим чуть позже. Расчет интенсивности рассеяния электромагнитного излучения на сфере произвольного радиуса  $R$  был впервые выполнен немецким физиком Густавом Ми в 1908 году. Точный результат представляется бесконечной суммой слагаемых. Для небольшой капли ( $R \ll \lambda$ ) в этой сумме можно сохранить лишь первое слагаемое, которое и соответствует рассеянию Рэля. Чем больше капля, тем больше количество слагаемых, которые следует учитывать. При  $R \gg \lambda$  расчет упрощается: в этом случае применяется геометрическая оптика. Согласно очевидным геометрическим соображениям, количество энергии света, падающей на сферу, пропорционально ее сечению, то есть  $R^2$ . Таким образом, на большую каплю падает больше энергии, чем на меньшую; в меру квадрата своего радиуса она больше света и переизлучает. Кроме того, оказывается, что общая интенсивность света, рассеиваемого большой каплей, не зависит от длины падающей волны. Именно это и объясняет тот факт, что при падении на систему капель белого света и рассеянный свет также оказывается белым. Итак, облака белые, потому что белым является освещающий их солнечный свет!



5. Испускаемое Солнцем излучение с большими длинами волн в красной части спектра рассеивается меньше, чем излучение с короткими длинами волн в синей части. Поэтому в сумерках падающий под малым углом синий луч сильно рассеивается в атмосфере и доходит до Земли приглушенным, в отличие от красного. Днем же все цвета солнечного излучения достигают земной поверхности. (Пропорции не соблюдены.)

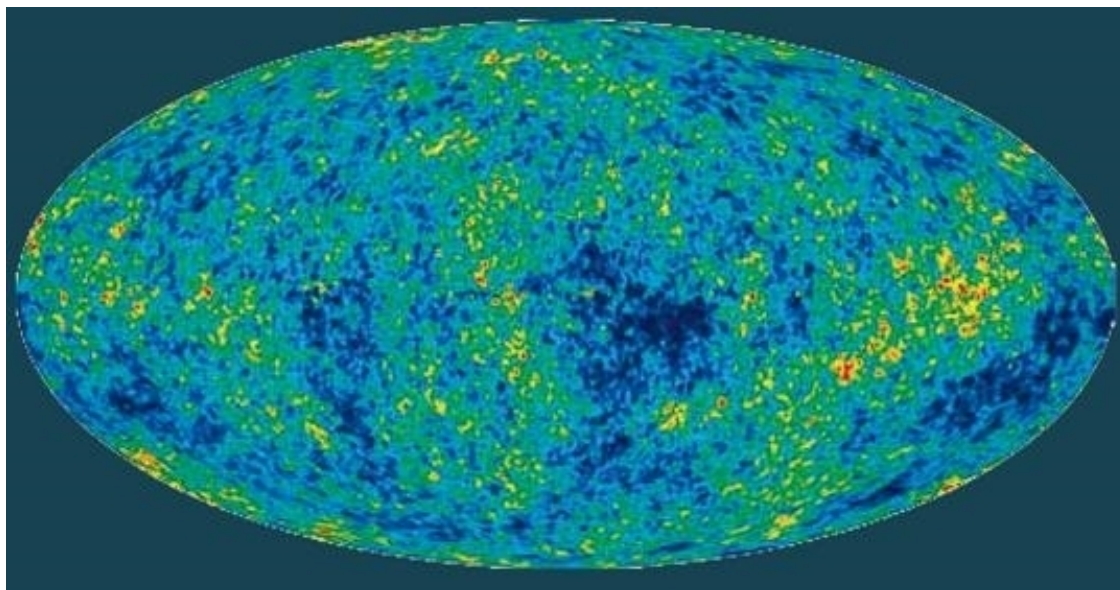
### Тайны безлунной ночи

Без Луны ночное небо черное, с разрозненными звездами. Это кажется нормальным. Но в небе колоссальное количество звезд, может быть, даже бесконечное. Бесконечное число звезд должно производить бесконечное сияние. Что, если черное небо – признак конца Вселенной? Именно это предположил немецкий ученый Иоганн Кеплер в начале XVII века. В XIX веке другой немец, Генрих Ольберс, заметил, что ближайшие звезды, вероятно, скрывают более далекие, поэтому, даже если Вселенная бесконечна, ее светимость будет не бесконечной... но все же очень большой! На сегодняшний день объяснение этого парадокса заключается в том, что Вселенная имеет конечный возраст. Она появилась в результате Большого взрыва, характеризующегося высокой плотностью и температурой и произошедшего 13,8 миллиардов лет назад. После этого Вселенная начала расширяться. В результате длина световых волн, излучаемых далекими галактиками, смещается к красному концу спектра. Кроме того, при наблюдении за удаленными объектами из-за конечности скорости света мы «обгоняем время»: галактики предстают перед нами в том состоянии, в котором они были, когда миллиарды лет назад испускали свет, который до нас доходит сейчас. Начиная с определенного расстояния мы возвращаемся к эпохе, очень близкой к Большому взрыву, когда первые галактики еще не родились и Вселенная была темной: мы достигаем «космологического горизонта» – границ наблюдаемой Вселенной. Таким образом, мы не можем наблюдать всю Вселенную, будь она конечной или бесконечной, и ночное небо кажется черным.

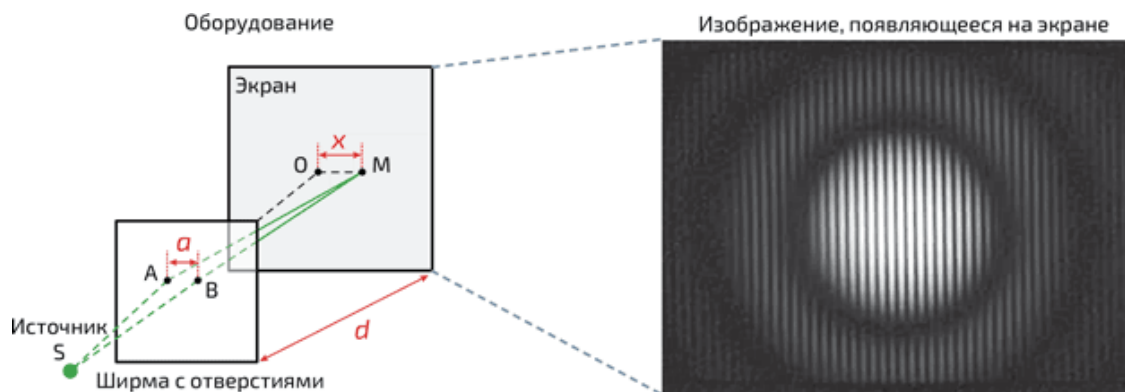
На самом деле оно не совсем черное, а наполнено электромагнитным излучением гораздо большей длины волны, чем видимый свет (порядка миллиметра вместо микрометра). Это низкочастотное излучение, невидимое для глаз, улавливается достаточно чувствительным радиотелескопом (см. илл.). Его непреднамеренное открытие в 1964 году принесло американцам Арно Пензиасу и Роберту Уилсону Нобелевскую премию по физике в



1978 году. Речь идет о «микроволновом реликтовом излучении», которое излучается не звездами. Из-за расширения Вселенной его длина волны со временем увеличивается.



Первая «карта» Вселенной, или микроволновое реликтовое излучение, около 14 миллиардов лет назад. Карта отображает колебания температуры в разных точках Вселенной через 380 000 лет после ее рождения, которые соответствуют местам зарождения будущих галактик. С момента экспериментального подтверждения существования реликтового излучения в 1964 году оно изучается с помощью приборов, установленных на спутниках или в люльках под аэростатами. Приведенная здесь первая детальная карта построена по данным со спутника Wilkinson Microwave Anisotropy Probe



**6. Опыт Юнга с интерференцией на отверстиях.** Источник монохроматического света направлен на отверстия: на экране наблюдается чередование светлых и темных полос. Лучи, исходящие из A и B, интерферируют. С одним отверстием можно наблюдать размытое пятно, окруженное кольцом из-за явления дифракции

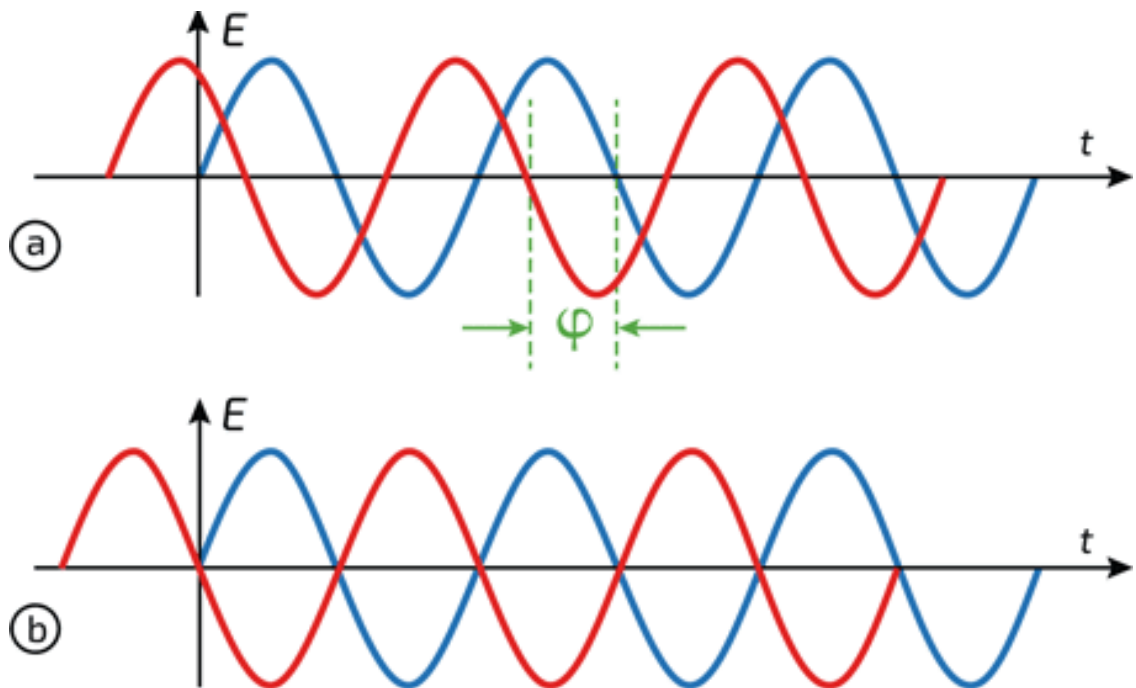
## Интерференция и когерентность

Явление интерференции света было доказано в начале XIX века историческим опытом английского физика Томаса Юнга. Ученые той эпохи спорили о природе света: его интерпрети-



ровали или как волновое явление, что, казалось, подтвердил опыт Юнга, или как поток частиц. В четвертой части этой книги (см. главу 22) мы увидим, что все они были правы.

Устройство Юнга (илл. 6) содержит точечный источник монохроматического света  $S$ , расположенный перед непрозрачной пластиной, в которой на расстоянии нескольких миллиметров друг от друга проделаны два отверстия чрезвычайно малого диаметра (порядка  $0,1$  мм). Свет, проходящий через отверстия, достигает экрана. И мы видим на нем – удивительно! – не сплошное пятно света, а пятно, демонстрирующее чередование темных и светлых полос. Как так получается?



**7. а.** Две волны с произвольным фазовым сдвигом  $\phi$ .

**б.** Две волны в противофазе интерферируют, мешая друг другу: максимальная амплитуда одной соответствует минимальной амплитуде другой

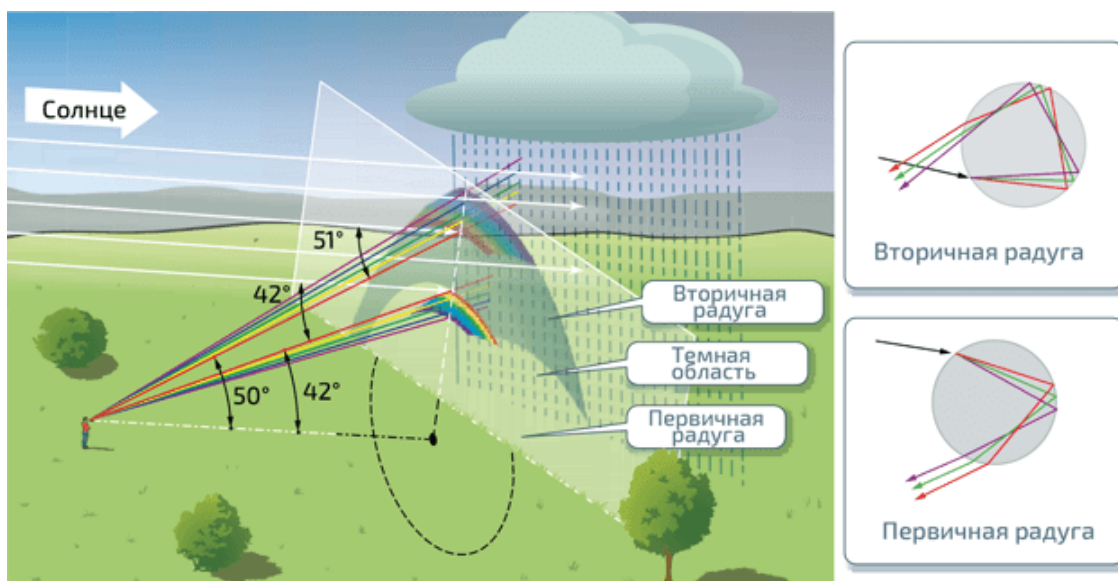


**8.** Основная (более яркая, справа) и вторичная радуги. Их цвета расположены в противоположном порядке

Интенсивность света, наблюдаемая в точке М экрана, является результатом наложения волн, исходящих из отверстий А и В. Это явление алгебраического суммирования волн, приходящих из разных точек, называется интерференцией. Оно может привести и к нулевой или низкой общей интенсивности (это означает деструктивную интерференцию), и к более высокой интенсивности (так называемая конструктивная интерференция). Конструктивный или деструктивный характер интерференции зависит от смещения волн относительно друг друга, или фазового сдвига, в момент их попадания на экран (илл. 7).

На оси SO волны, исходящие из А и В, находятся в фазе: наблюдается светлая полоса. По мере отклонения от этой оси, в зависимости от точки на экране, волны преодолевают различные расстояния (оптические пути) от отверстий. Их фазы расходятся, и в результате наблюдается периодический ряд светлых и темных полос. Существует деструктивная интерференция (темная полоса), когда разница в длине оптического пути равна половине длины волны, или нечетному числу длин полуволен. Есть и конструктивная интерференция (светлая полоса), когда разница в длине оптического пути кратна длине волны.

Для видимого света длина волны  $\lambda$  – порядка микрометра, что примерно в десять раз меньше диаметра волоса. Однако расстояние между полосами на экране значительно возрастает, если этот экран находится на достаточном расстоянии  $d$  от отверстий. Размер  $OM = x$  полос может быть найден из условия  $AM - BM = n\lambda$ , где  $n$  – целое число. Если  $a = AB$  – расстояние между отверстиями, то расстояние между полосами равно  $\lambda d/a$ . Приняв  $\lambda = 0,5$  мкм,  $d = 3$  м и  $a = 0,5$  см, находим, что расстояние между полосами составляет 0,3 мм. Таким образом, становится понятно, почему нам удастся увидеть интерференционные полосы невооруженным глазом, хотя это и не всегда просто. При практических работах по интерференции сегодняшние студенты часто сталкиваются с трудностями. Поэтому нам остается лишь восхищаться Юнгом, который сумел поставить этот опыт два века назад.



9. Путь световых лучей в основной и вторичной радугах. Средний угол отклонения –  $42^\circ$  и  $51^\circ$  соответственно. Впоследствии лучи света, составляющие основную радугу, образуют конус вращения, осью которого является прямая «Солнце – наблюдатель», а угол между ней и образующими составляет  $42^\circ$

А что будет, если вместо освещения двух отверстий одним и тем же источником света использовать два точечных источника монохроматического света? Оказывается, что в этом случае эксперимент потерпит неудачу! Интерференция возможна только для когерентных источников, фазовый сдвиг которых постоянен во времени. Два же случайных источника, если не принять каких-либо особых мер, не удовлетворяют этому условию.

Трудность наблюдения за интерференцией света может навести на мысль, что это довольно экзотическое явление. Вовсе нет! Хорошим примером интерференции служат радужные переливы на мыльных пузырях (см. главу 6, «Мыльные пузыри»). В этом случае интерференция происходит между светом, отраженным от передней и задней границ мыльной пленки. Поскольку наблюдения обычно производятся при белом свете, то волны, находящиеся в противофазе, гасят друг друга, и полученный свет выглядит разноцветным. Видимый цвет пленки зависит от ее толщины и от положения наблюдателя относительно пузыря. Подобные интерференционные переливы цвета можно увидеть на крыльях бабочек, в оперении колибри, а также на наружном покрове некоторых насекомых.

## Цвета радуги

Радуга возникает из-за взаимодействия солнечного света с каплями воды, взвешенными в атмосфере (илл. 8). Эти капли размером порядка  $0,1$  мм значительно больше, чем длина световой волны. В результате путь световых лучей в каждую каплю может быть описан геометрической оптикой, то есть преломлением на входе и на выходе. Между этими преломлениями внутри капли может произойти одно или несколько отражений. Основная радуга, часто единственная видимая, соответствует одному промежуточному отражению, а иногда появляющаяся вторичная радуга создана лучами, которые претерпели два отражения в каплях воды (илл. 9). Для данной длины волны отклонение светового луча каплей воды зависит от того, в какой точке он в нее попадает, и определяется законами преломления. Однако угол между входящим и выходящим из капли лучами не может принимать любое значение. В случае основной радуги он лежит в диапазоне от  $0^\circ$  примерно до  $42^\circ$ , в чем читатель может убедиться, если не

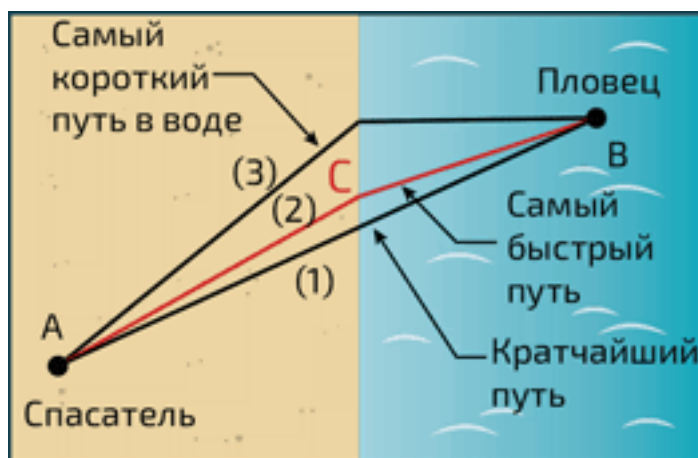
боится вычислений. Отклонения, превышающие  $42^\circ$ , допустимы, но максимальная интенсивность достигается в непосредственной близости от  $42^\circ$ . Для вторичной радуги этот угол составляет около  $51^\circ$ . Поворачиваясь к солнцу спиной, мы наблюдаем две яркие дуги. Между ними появляется темный участок: действительно, никакой луч не появится между двумя критическими углами после одного или двух отражений в каплях воды, и потому эта область выглядит темнее, чем остальная часть неба.

## Снелл, Декарт и Ферма

Давайте вспомним закон, названный во Франции законом Снелла – Декарта или просто законом Декарта, а в других странах – законом Снеллиуса (см. главу 2, «Отражение и преломление световых волн»). Декарт, по-видимому, первым опубликовал его в трактате «Диоптрика» в 1637 году, но закон уже был открыт голландским математиком Виллебрордом Снеллом, или Снеллиусом (1580–1626), а до него – персидским ученым Ибн Салемом в конце X века.

Снелл, вероятно, основывался на экспериментальных работах, в то время как Декарт утверждал, что открыл этот закон, приравняв луч света к траектории пули. Это не слишком понятное доказательство было раскритиковано Пьером де Ферма в работе, опубликованной в 1662 году под названием «Сумма о преломлениях» (*Synthèse pour les réfractions*). Принцип Ферма, изложенный в этом тексте, гласит, что свет проходит по пути, который позволяет ему скорейшим образом перейти от точки А к точке В (см. илл.). Предоставим читателю вывести закон Снеллиуса из принципа Ферма, что не составит труда при наличии некоторого знания тригонометрии и дифференциального исчисления. Просто найдите точку С, которая минимизирует время, затраченное светом, чтобы пройти по пути АВС, – это время равно  $(AC/c) + (BC/v)$ , где  $c$  – скорость света в воздухе и  $v = c/n$  – его скорость в воде.

Если доказательство Декарта любопытно скорее с исторической стороны, то принцип Ферма сохраняет определенный интерес и для современной физики. Кроме того, именно Декарт первым объяснил появление двух радуг и рассчитал соответствующие углы отклонения.



### Аналогия с проблемой спасателя

Спасатель (А), которому нужно как можно скорее спасти пловца (В), бежит по пляжу быстрее, чем плавает в море. Самый краткий путь, прямой (1), не будет самым быстрым: спасатель потеряет много времени в море. Если же он максимально сократит время плавания (3), то значительно увеличит путь по пляжу. В итоге самый быстрый путь (2), проходящий через С, – тот, который отвечает закону Снеллиуса

Так объясняется появление световых дуг, но не их цветов... На самом деле точное значение угла отражения зависит от цвета, так как показатель преломления воды  $n$  увеличивается, когда длина волны уменьшается. Итак, для фиксированного угла падения  $i$  угол преломления увеличивается с длиной волны, то есть двигается от синего к красному. Это значит, что отклонение на входе и выходе капли сильнее для синего, чем для красного. Таким образом, с внешней стороны дуги появляется красный цвет. Все наоборот во вторичной радуге, цвета которой расположены в обратном порядке: красный внутри. Эти вытекающие из геометрии и законов преломления странности – примеры сюрпризов, что порой несут нам научные расчеты.

### А птицы?

Рассматривая картину Рылова, мы еще не обсудили птиц, которые составляют неотъемлемую часть обаяния морских берегов. Давайте исправим это упущение такой задачей: как часто птице заданной массы нужно взмахивать крыльями, чтобы лететь? Возможно, читателю трудно будет увидеть связь между этими величинами, и он решит, что авторы играют с ним как кошка с мышкой.

Пусть  $m$  – масса птицы,  $S$  – общая площадь крыльев,  $v$  – средняя скорость крыла,  $t$  – продолжительность удара крыла и  $\rho$  – плотность воздуха. Во время взмаха крылом птица перемещает воздушную массу, равную  $M = \rho Svt$ , и сообщает ей скорость  $v$ , что соответствует среднему ускорению  $v/t$ , поэтому сила  $F = Mv/t = \rho S v^2$  должна сбалансировать вес  $mg$  птицы, где  $g$  – ускорение свободного падения. Так,

$$v = \sqrt{\frac{mg}{\rho S}}.$$

Скорость  $v$  крыла пропорциональна количеству взмахов крыльев в секунду  $\nu$  и длине крыла, которая также пропорциональна  $\sqrt{S}$ . Предполагая (довольно произвольно), что коэффициент пропорциональности равен  $2\pi$ , находим:

$$\nu = \frac{1}{2\pi S} \sqrt{\frac{mg}{\rho}}.$$

Для серой цапли (илл. 10) масса  $m$  составляет порядка 1 кг. Размах ее крыльев – около 2 м, и можно предположить, что площадь  $S \approx 0,2 \text{ м}^2$ . При приближительных значениях  $\rho = 1 \text{ кг/м}^3$



$m^3$  и  $g = 10 \text{ м/с}^2$  скорость крыла будет составлять порядка 3 взмахов в секунду, что вполне соответствует реальности между 2 и 3 взмахами в секунду в машущем полете.



**10.** Площадь крыла серой цапли примерно равна одной десятой квадратного метра

Пойдем дальше и предположим, что все птицы имеют тело той же формы и плотности. Площадь крыльев  $S$  в таком случае пропорциональна  $m^{2/3}$ , и из предыдущей формулы следует, что количество взмахов крыльев в секунду обратно пропорционально  $m^{1/6}$ . Действительно,  $\nu$  уменьшается при увеличении массы птицы: воробей (масса которого составляет порядка 20–30 г) совершает 13 взмахов в секунду, голубь (масса около 500 г) – до 8–9 взмахов, а сарыч (масса примерно килограмм) – до 3.

А насекомые? На картине Рылова их не видно, так как они слишком малы. У насекомых частота взмахов крыла значительно выше, чем у птиц, что соответствует нашей формуле. Предельный случай – комары, которые совершают примерно 400 взмахов в секунду. Ударяя воздух с такой частотой, насекомое производит слышимый человеком звук, чем предупреждает о своих атаках! Зная, что масса комара составляет 2 мг, и предполагая, что крылья имеют площадь поверхности  $S$  порядка  $10 \text{ мм}^2$ , можно заключить, что фактическая частота примерно в 10 раз выше, чем значение, получаемое по нашей формуле. В этом нет ничего удивительного, формула действительно очень приближительна, и скорее следует удивляться тому, что она дает разумные значения частот взмахов крыльями для крупных птиц и насекомых.

Мог ли художник Рылов, когда писал свою картину, предполагать, что затронет так много законов физики?

## Глава 4

### Маятник Фуко и сила Кориолиса

**В начале XIX века все были уверены, что Земля шарообразна и вращается вокруг своей оси, но экспериментальных свидетельств этому не имелось. Первым неоспоримым доказательством этих фактов стал известный опыт Леона Фуко.**

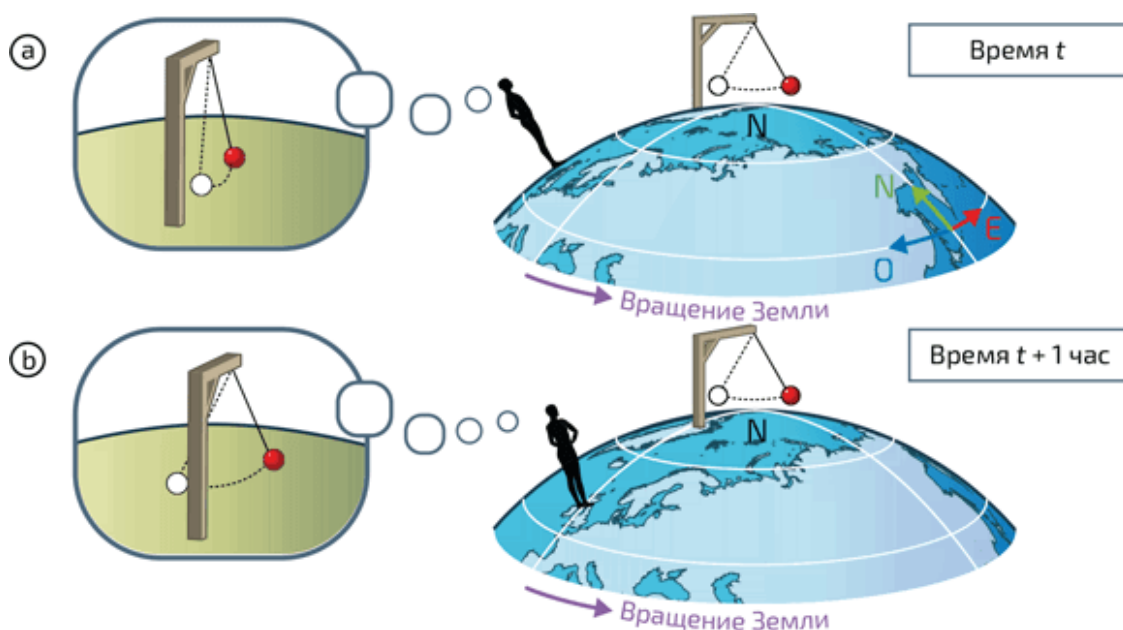
**Вращение Земли вокруг своей оси объясняет многие явления, например из области метеорологии и океанографии. Чтобы понять природу этих явлений, нужно научиться их описывать теоретически. Для этого физики прибегают к использованию фиктивной силы, называемой именем Гаспара-Гюстава де Кориолиса.**

В 1851 году парижский Пантеон стал местом проведения эксперимента, осуществленного физиком Леоном Фуко (1819–1868). К верхней части купола, на подвесе длиной 67 м, он прикрепил шар массой в 28 кг, создав таким образом маятник (илл. 1), аналогичный балансиру часов наших прабабушек и прадедушек. В отличие от маятника часов, который способен двигаться только в определенной вертикальной плоскости, маятник Фуко мог свободно колебаться в любых направлениях. Эксперимент предполагал отклонить маятник от равновесного положения (вертикального), а затем отпустить и позволить ему свободно колебаться. Поскольку трение крайне мало, маятник может очень долго колебаться без затухания. Что же наблюдали экспериментаторы? При первых колебаниях маятник, казалось, оставался в вертикальной плоскости, определенной осью маятника и начальным отклонением. Именно так, как читателя и учили в средней школе. Через несколько минут, однако, ученые заметили, что плоскость качания маятника начала постепенно поворачиваться! При этом поворачивалась она всегда в одном и том же направлении. Давайте поймем, в каком именно.



**1.** Маятник Фуко, установленный в зале Пантеона в Париже, где в 1851 году и был поставлен опыт Фуко. Отклоненный от равновесного положения, маятник колеблется в плоскости, которая постепенно поворачивается





## 2. Доказательство вращения Земли с помощью маятника Фуко.

**a.** Первоначальное положение маятника на Северном полюсе и наблюдателя на Земле.

**b.** Спустя час Земля относительно звезд повернулась вокруг себя на восток (в направлении фиолетовой стрелки), повернулась и стойка, но плоскость колебаний маятника осталась неподвижной. В то же время для наблюдателя на Земле стойка выглядит сохранившей свое первоначальное положение, а плоскость колебаний маятника кажется повернувшейся

## Маятник Фуко на Северном полюсе

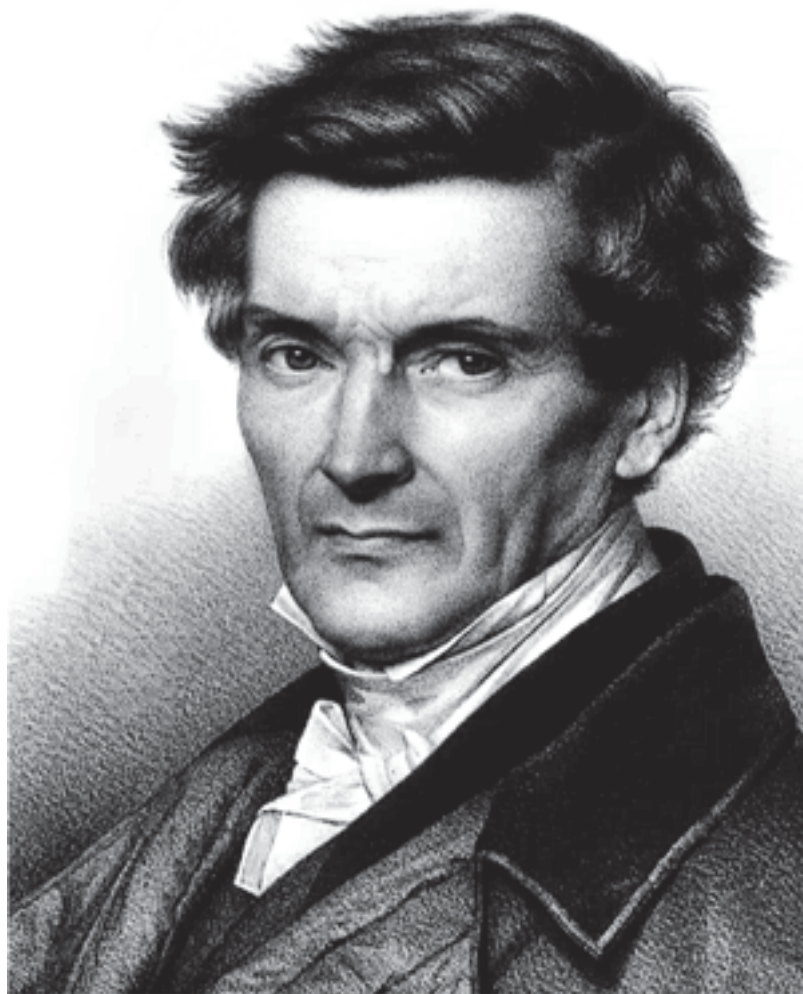
Почему же плоскость качания маятника поворачивается? Опыт Фуко легче понять, проведя его для начала на Северном (или Южном) полюсе. Представим себе маятник, равновесное положение которого совпадает с проходящей через полюс земной осью. Отклоним его от начального положения (илл. 2a). Для наблюдателя, неподвижного относительно Солнца и звезд (допустим, что относительное положение звезд не зависит от времени), маятник качается в фиксированной вертикальной плоскости (илл. 2b). Однако это совсем не так для наблюдателя, находящегося на Земле, так как последняя вращается вокруг своей оси, совпадающей в данном случае с вертикалью, на которой находится точка крепления маятника. Таким образом, наблюдатель поворачивается вместе с Землей относительно плоскости колебаний маятника на восток. Не чувствуя, что вращается вместе с планетой, такой наблюдатель считает, что это плоскость колебаний маятника поворачивается, и маятник для него отклоняется к западу (вспомните: для нас Солнце встает на востоке и движется по небосклону на запад. На самом же деле, как мы сегодня хорошо знаем, это земной шар вращается на восток, а Солнце остается почти неподвижным).

Из нашего рассуждения понятно, что на Южном полюсе маятник отклонится к востоку. На полюсе плоскость колебаний маятника выполняет полный оборот за 24 часа<sup>1</sup>. В Париже же этот процесс занимает значительно больше времени. Разберемся почему.

<sup>1</sup> На самом деле чуть меньше 24 часов. Во всей этой главе мы пренебрегаем вращением Земли вокруг Солнца. Таким образом, относительная ошибка равна  $1/365$ , что составляет абсолютную ошибку около 4 минут. Кроме того, достаточно половины оборота, то есть чуть меньше 12 часов, чтобы плоскость качания маятника вернулась в первоначальное положение.

## Сила Кориолиса

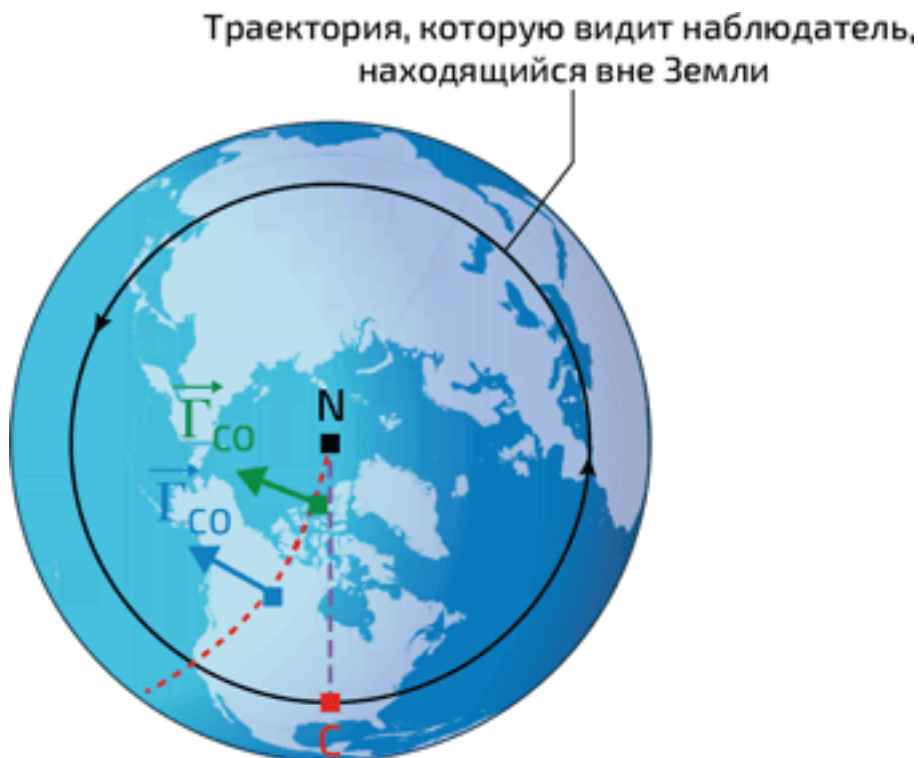
Представлять наблюдателя, неподвижного по отношению к звездам, чтобы понять, что видит его коллега, вращающийся вместе с Землей, неудобно. Проще было бы рассуждать только с точки зрения земного наблюдателя, предполагая, что на шар действует некая сила, которая заставляет его отклоняться к западу... И мы действительно можем так поступить! Для этого нужно рассматривать движение маятника Фуко в системе координат, или системе отсчета, связанной с Землей. Чтобы учесть вращение Земли вокруг своей оси, следует принять, что на шар, помимо сил веса и реакции нити (подвеса), действует еще одна сила. Ее назвали силой Кориолиса в честь французского математика Гаспара-Гюстава де Кориолиса (илл. 3).



**3.** Гаспар-Гюстав де Кориолис (1792–1843). Одно из немногих известных его изображений выполнено французским художником Бельяром по портрету кисти Роллера. Имя Кориолиса увековечено гравюрой на первом этаже Эйфелевой башни, наряду с еще 71 ученым

Чтобы двигаться дальше, давайте пока оставим в стороне маятник Фуко, колебания которого усложняют необходимые для дальнейшего рассуждения, и вместо него рассмотрим пулю массой  $m$ , выпущенную из ружья. Чтобы еще больше облегчить задачу, предположим, что пуля движется по прямой линии, и мы при изучении ее траектории учитываем только влияние вращения Земли. Это предположение является всего лишь искусственным приемом для упрощения дальнейших рассуждений.

Представим, что стрелок находится на Северном полюсе, в точке N (илл. 4), и выпускает в направлении цели С, движущейся вместе с Землей, пулю Р с начальной скоростью  $v$ . Земля вращается вокруг своей оси с угловой скоростью  $\Omega$ , равной одному обороту в день. Таким образом, через некоторое время  $t$  она повернется на угол  $\Omega t$ , и цель сместится вместе с ней. Тем не менее, с точки зрения стрелка, стоящего на Северном полюсе и глядящего на цель, все происходит так, будто бы последняя осталась на месте, а пуля отклонилась от заданной им траектории NC. Расстояние от Р до линии NC в момент  $t$  составляет приблизительно произведение угла  $\Omega t$  на пройденное пулей расстояние  $vt$ , то есть  $\Omega vt^2$ . В этом рассмотрении мы считаем промежуток времени достаточно коротким, а угловую скорость  $\Omega$  – измеренной в радианах в секунду.



**4.** Отклонение пули под действием силы Кориолиса в системе отсчета, связанной с Землей. Пуля, выпущенная из ружья на Северном полюсе N в направлении цели С, отклоняется к западу от цели. Для наблюдателя вне Земли траектория пули – прямая линия (фиолетовая). Для наблюдателя, связанного с Землей, траектория представляется красной кривой (ее кривизна здесь сильно преувеличена): действующая на пулю сила Кориолиса придает ей ускорение  $\vec{\Gamma}_{CO}$ , показанное на рисунке в два разных момента

Таким образом, для достаточно малых промежутков времени пуля *относительно Земли* будет равномерно двигаться в направлении NC со скоростью  $v$  и в то же время равноускоренно двигаться вправо, в направлении, перпендикулярном отрезку NC (если бы стрельба производилась на Южном полюсе, то пуля отклонилась бы влево). При этом ускорение, называемое Кориолисовым, оказывается равным  $2\Omega v$  (вторая производная по времени от пройденного расстояния  $\Omega vt^2$ ). В соответствии со вторым законом Ньютона (см. главу 4, врезку «Ньютоновская механика»), это означает, что на пулю воздействует сила величиной  $2\Omega vt$ , сонаправленная ускорению Кориолиса. Это и есть *сила Кориолиса*.

Ускорение Кориолиса всегда перпендикулярно мгновенной скорости (илл. 4). Напомним, что в рассматриваемой задаче, благодаря действию силы тяжести, имеется еще и вертикальное ускорение, которое мы (в отличие от артиллеристов!) здесь не учитывали.

Уточним, что сила Кориолиса – сила «фиктивная», или, как часто говорят, сила инерции, потому что она не вызвана *физическим* воздействием одного тела на другое. При описании движения тела во вращающейся системе координат сила Кориолиса должна учитываться всегда, когда скорость тела не направлена вдоль оси вращения.

## **Конец ознакомительного фрагмента.**

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.