

Вы когда-нибудь задумывались...

Какие тайны скрываются в глубине стакана с водой?

Что заставляет тонкие облака пара подниматься над чашкой горячего кофе?

Почему язык прилипает к чему-то замороженному?

И почему суставы не скрипят?

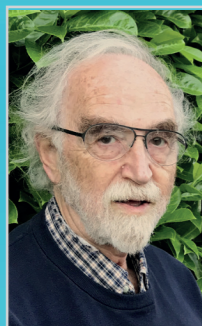


«Доктор Поллак – один из пионеров в этой области, и можно ожидать, что его открытия будут иметь ключевое значение».

Брайан Джозефсон, лауреат Нобелевской премии

Профессор Поллак отправляет нас в фантастическое путешествие по воде, показывая нам скрытую вселенную, изобилующую физической активностью, – и дает ответы настолько простые, что любой любопытный читатель сможет их понять и оценить.

Автор предлагает нам открыть глаза и заново испытать наш естественный мир, при этом не принимать ничего как должное.



Джеральд Поллак – основатель и главный редактор журнала WATER, обладатель многочисленных наград в области науки. Один из основателей Американского института медицинской и биологической инженерии, член Американской кардиологической ассоциации и Общества биомедицинской инженерии. Интересы Поллака простираются от биологического движения и клеточной биологии до взаимодействия биологических поверхностей с водными растворами. Он известен во всем мире как энергичный оратор и ученый, готовый бросить вызов любой устоявшейся догме, если она противоречит фактам.

E&S

DMK
ИЗДАТЕЛЬСТВО

www.dmk.rf

ISBN 978-5-97060-901-9



9 785970 609019 >

Джеральд Поллак



ЧЕТВЕРТАЯ
ФАЗА
ВОДЫ

ЧЕТВЕРТАЯ
ФАЗА
ВОДЫ

Интернет-магазин:
www.dmkpress.com

Оптовая продажа:
КТК «Галактика»
books@aliens-kniga.ru

DMK
ИЗДАТЕЛЬСТВО

Джеральд Поллак

Четвертая фаза воды

The Fourth Phase of Water

Beyond Solid, Liquid, and Vapor

Gerald H. Pollak



EBNER & SONS PUBLISHERS
EBNERANDSONS.COM
SEATTLE WA, USA

Четвертая фаза воды

Джеральд Поллак



Москва, 2021

УДК 530.1
ББК 22.31
П49

Джеральд Поллак

П49 Четвертая фаза воды / пер. с англ. В. С. Яценкова; ред. д-р биол. наук, проф. В. Л. Воейков. – М.: ДМК Пресс, 2021. – 424 с.: ил.

ISBN 978-5-97060-901-9

Эта книга отправляет нас в фантастическое путешествие по миру воды, раскрывая перед нами двери в другую вселенную, которая полна жизни. Какие тайны хранятся в глубине стакана с водой? Что заставляет тонкие облака пара подниматься над чашкой горячего кофе? Как возникают облака и радуга? Почему язык прилипает к холодному железу? Почему наши суставы не скрипят? Профессор Поллак, известный ученый-биолог, дает ответы на эти и другие вопросы в простой и доступной форме. Переходя от частного к общему, он рассматривает фундаментальные принципы, объясняющие роль изменений структуры воды в трансформации энергии и движения на Земле.

В названии книги отражено стремление автора сместить акцент с общеизвестных фактов на те аспекты изучения воды, которые вызывают полемику в академической среде и пробуждают научную мысль. Поллак предлагает нам заново пересмотреть законы природы, не принимать никакие догмы как данность и вернуть нашу детскую веру в то, что все явления имеют смысл.

Для широкого круга читателей.

УДК 530.1
ББК 22.31

Copyright Title of English-language edition: “The Fourth Phase of Water”, published by Ebner and Sons.

Все права защищены. Любая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения владельцев авторских прав.

ISBN (анг.) 978-0962689543
ISBN (рус.) 978-5-97060-901-9

© Gerald H. Pollack, 2013
© Оформление, издание, перевод, ДМК Пресс, 2021

Оглавление

Предисловие от издательства	7
Предисловие автора к русскому переводу	8
Вступительное слово редактора русского перевода.....	10
Благодарности.....	13
Предисловие.....	17
Зверинец	26
РАЗДЕЛ I. Загадки воды: прокладываем путь.....	31
Глава 1. В окружении тайн	33
Глава 2. Социальное поведение воды	43
Глава 3. Загадка межфазной воды.....	55
РАЗДЕЛ II. Тайная жизнь воды.....	79
Глава 4. Четвертая фаза воды?.....	81
Глава 5. Электрическая батарея из воды.....	111
Глава 6. Как заряжается водяная батарея	127
Глава 7. Вода как движущая сила и источник жизни	147
РАЗДЕЛ III. Что движет водой, то движет миром.....	169
Глава 8. Универсальный аттрактор	171
Глава 9. Броуновское движение – танец под музыку энергии.....	189
Глава 10. Тепловая энергия и температура: новый взгляд на тепловую тьму.....	215
Глава 11. Осмос и диффузия – они не существуют	237
РАЗДЕЛ IV. Формы воды в природе.....	255
Глава 12. Энергия протонированной воды.....	257
Глава 13. Капельки и пузырьки – братья и сестры в водной семье.....	277
Глава 14. Рождение пузырька: от зародыша к зрелости	289

Глава 15. Облака из кофе: поразительная природа испарения	313
Глава 16. Водяные трамплины: скольжение по поверхности воды.....	341
Глава 17. Согреть для получения льда	367

РАЗДЕЛ V. Подводим итоги:

раскрываем тайны Земли.....	393
Глава 18. Тайные законы природы.....	395

Предисловие от издательства

Отзывы и пожелания

Мы всегда рады отзывам наших читателей. Расскажите нам, что вы думаете об этой книге – что понравилось или, может быть, не понравилось. Отзывы важны для нас, чтобы выпускать книги, которые будут для вас максимально полезны.

Вы можете написать отзыв на нашем сайте www.dmkpress.com, зайдя на страницу книги и оставив комментарий в разделе «Отзывы и рецензии». Также можно послать письмо главному редактору по адресу dmkpress@gmail.com; при этом укажите название книги в теме письма.

Если вы являетесь экспертом в какой-либо области и заинтересованы в написании новой книги, заполните форму на нашем сайте по адресу http://dmkpress.com/authors/publish_book/ или напишите в издательство по адресу dmkpress@gmail.com.

Список опечаток

Хотя мы приняли все возможные меры для того, чтобы обеспечить высокое качество наших текстов, ошибки все равно случаются. Если вы найдете ошибку в одной из наших книг – возможно, ошибку в основном тексте или программном коде, – мы будем очень благодарны, если вы сообщите нам о ней. Сделав это, вы избавите других читателей от недопонимания и поможете нам улучшить последующие издания этой книги.

Если вы найдете какие-либо ошибки в коде, пожалуйста, сообщите о них главному редактору по адресу dmkpress@gmail.com, и мы исправим это в следующих тиражах.

Нарушение авторских прав

Пиратство в интернете по-прежнему остается насущной проблемой. Издательство «ДМК Пресс» очень серьезно относится к вопросам защиты авторских прав и лицензирования. Если вы столкнетесь в интернете с незаконной публикацией какой-либо из наших книг, пожалуйста, пришлите нам ссылку на интернет-ресурс, чтобы мы могли применить санкции.

Ссылку на подозрительные материалы можно прислать по адресу dmkpress@gmail.com.

Мы высоко ценим любую помощь по защите наших авторов, благодаря которой мы можем предоставлять вам качественные материалы.

Предисловие автора к русскому переводу

Я счастлив, что моя книга «Четвертая фаза воды» наконец станет доступна широкому кругу российских читателей. Спасибо за ожидание.

Я знаю, что многие из вас – энтузиасты науки, на которых могут оказывать давление догматики, преобладающие в научном мире. Так происходит везде. Тем не менее я знаю, что многие читатели ведут здоровый образ жизни, требующий и свежего мышления. Вряд ли что-то может быть более свежим, чем новый взгляд на сущность, столь важную для всех аспектов жизни, – на воду.

Исходная версия этой книги стала популярной среди англоязычных читателей. Многие из них отмечали, что материал в книге дает естественные объяснения явлений, свидетелями которых они становятся каждый день, но не удосуживались задуматься о причинах. Вода заставляет нас задавать вопросы о сути разнообразных явлений, начиная с того, почему мокрый песок липкий, и до того, как вода может подниматься к вершинам самых высоких деревьев. Другие отметили, что, хотя они ожидали, что их научный опыт поможет пониманию воды, оказалось, что все наоборот: изучение воды научило их правильному пониманию науки. Естественно, я был доволен.

В ходе моего длительного сотрудничества с российскими учеными я понял, что они необычайно открыты и стремятся к новому пониманию. Они относятся к числу наименее консервативных ученых, которых я знаю, стремящихся к непрерывному развитию науки. Когда я встречаюсь с русским, я неизменно вижу глаза, сияющие от нетерпения слушать и учиться – всегда с глубокой искренней страстью.

Я отчетливо вспомнил эту страсть, когда несколько лет назад меня пригласили выступить с докладом в Московском университете. Мне помогал профессор Владимир Воейков, редактор русского перевода этой книги. Владимир представил меня аудитории, а затем начал переводить мою речь предложение за предложением. Не успел я показать несколько слайдов, как аудитория разразилась комментариями и вопросами, на которые Владимир тут же отвечал. Поскольку я не говорю по-русски, я остался в неведении относительно содержания диалога. Но я был уверен, что Владимир дает убедительные ответы на все вопросы, потому что, по моему опыту, он знает предмет лучше, чем я.

Как бы то ни было, разгоревшаяся в тот день открытая дискуссия пробудила эмоции российских ученых, а также подогрела их интерес к восприятию свежих идей. Волнение достигло такой степени, что я уже представлял себе разразившуюся потасовку. Около трех часов я практически молчал, пока российские ученые вели между собой ожесточенный спор. Я не могу сказать, кто в итоге победил, но я помню спокойную и уютную обстановку в доме

Владимира в тот вечер, когда было достаточно вкусной еды и расслабляющих напитков, чтобы успокоить мои расшатанные нервы.

Впечатлили меня не только российские ученые, но и российские студенты. Многие из них прибыли из Екатеринбурга благодаря помощи моего дорогого друга, профессора Феликса Бляхмана, чьи исследования были в основном посвящены сердечно-сосудистой динамике, а также гелевым биомиметикам. Их подготовка была превосходна. Ученики Феликса приехали в Сиэтл с решительным настроем. Студенты из других стран приезжают с большим багажом теоретических знаний, но, как правило, с ограниченным практическим опытом. Русские студенты всегда были лучше подготовлены. Они обладали не только впечатляющими теоретическими знаниями, но и обширными практическими навыками. С детства они научились ремонтировать разные устройства, от ламп до автомобилей. В лаборатории этот опыт превратился в хорошо развитую способность проводить эксперименты, в основном самостоятельно. Я был приятно удивлен.

В частности, я помню одного молодого ученого, который работал в моей лаборатории. Андрей Климов из Пущино был не только студентом, но и одним из самых творческих ученых, когда-либо работавших в моей лаборатории. Мы каждый день узнавали от Андрея что-нибудь новое. Некоторые скептически относились к его разнообразным идеям, но в конце концов Андрей научил меня ряду вещей, которые изменили все мое научное мировоззрение.

Наиболее отчетливо я запомнил его утверждение, что Земля не является нейтральной – она обладает отрицательным зарядом. Сначала я подумал, что Андрей бредит. Я изучал электротехнику и, если Земля действительно несет отрицательный заряд, наверняка слышал бы об этом. На следующий день один из моих студентов принес мне лекции Фейнмана. Глава 9 второго тома содержит множество экспериментальных доказательств того, что Андрей действительно был прав: Земля действительно заряжена отрицательно. Андрей заверил меня, что русские студенты (по крайней мере, его поколения) прекрасно знают о заряде Земли; но, судя по всему, редкие американцы о нем слышали. Хвала российской образовательной системе!

В общем, если есть какая-то категория людей, которой я восхищаюсь, то это, конечно, русские. Российские ученые наделены знаниями, страстью и глубоким желанием понять, как устроен мир. Я надеюсь, что эта книга будет им полезна. И конечно, я надеюсь, что эта книга послужит новым стимулом для изучения воды в России, а также для всеобщего понимания природы самой ценной субстанции Земли. Действительно, вода намного более удивительна, чем нам это представляется.

Желаю вам всего наилучшего.

Джеральд Поллак

Вступительное слово редактора русского перевода

Говорят, что с наступлением нового тысячелетия мир вступил в эпоху Водолея. Так это или нет, но в последние 10–15 лет во всем мире стало появляться все больше научных, научно-популярных книг, научных журналов и даже художественных книг и фильмов, главным персонажем в которых выступает вода. Казалось бы, вода – простейшее и столь распространенное в природе вещество – достаточно хорошо изучена и не таит в себе особых загадок. И вдруг выяснилось, что наши знания о субстанции, молекула которой выглядит столь просто, весьма поверхностны, что множество явлений, центральным участником которых выступает вода, – в первую очередь явления, связанные со всеми жизненными процессами, – не находят объяснений в рамках привычных представлений о воде. Более полувека тому назад Нобелевский лауреат Альберт Сент-Дьерди высказал нетривиальные мысли: «Вода – прародительница и матрица жизни», «Жизнь – это вода, танцующая под мелодию твердых тел», «Вода составляет неразрывное целое со структурными элементами клетки», «Биоэнергетика – не что иное, как специальный аспект химии воды». И при этом он констатировал, что «биология забыла о воде или совсем не думала о ней». К сожалению, призывы Сент-Дьерди и немногих его единомышленников о необходимости заняться глубоким изучением водной основы живых организмов оставались без внимания научной общественности еще в течение многих десятилетий. Как же можно пробить глухую оборону ортодоксии и зародить у способных к размышлениям исследователей хотя бы тень сомнений в том, что не все так лучезарно и в молекулярной биологии, и в клеточной физиологии, не признающих ключевой роли воды в жизнедеятельности? На роль «стенбитной машины» претендовала вышедшая в 2001 году книга профессора Джеральда Поллака «Клетки, гели и моторы жизни. Новый целостный подход к клеточной функции».

Поллак уже был признанным экспертом в области мышечного сокращения. Его работы публиковались в самых авторитетных журналах Nature и Science, а книга «Мышцы и молекулы, раскрывающие принципы биологического движения» (1990 г.) была награждена премией «За выдающиеся достижения» Общества технической коммуникации США. И при этом он не побоялся высказать сомнения в правоте общепризнанной теории мышечного сокращения Нобелевского лауреата сэра Эндрю Хаксли, которая не позволяла объяснить целый ряд важных наблюдений. Это и послужило стимулом к написанию книги «Клетки, гели...». При этом Поллак не ограничился пересмотром механизма мышечного сокращения, а пошел дальше. Он увидел в объяснениях многих других явлений клеточной физиологии, кочующих из одного университетского учебника в другой, массу несуразностей, а иногда и вообще отсутствие каких бы то ни было объяснений. Но одно дело – наводить критику, а другое – предложить альтер-

нативу. Поллак осознал, что общепринятые теории не учитывают центральную роль воды в процессах жизнедеятельности, и выдвинул концепцию, которая позволяет с единых позиций дать как минимум правдоподобное объяснение множеству проявлений жизнедеятельности клетки. Клетку следует рассматривать как динамичный гидрогель. В каждый момент времени часть воды в клетках находится в особом состоянии – связанном, но при этом не в твердом, как лед, и не в свободном, т.е. не в таком жидком, как вода в стакане. В ответ на минимальные по силе, но адекватные текущему состоянию клетки импульсы, которые можно рассматривать как информационные (видоизменяющие и форму, и функции клеток), в клетке происходят кооперативные переходы ее водной основы из связанного с биополимерами, в первую очередь белками, состояния в жидкое состояние – гель-золь переходы. Концепция Поллака позволила с единых позиций объяснить не только мышечное сокращение, но и практически все другие проявления клеточной активности. Книга ученого удостоилась положительных рецензий в ведущих научных журналах, включая Science, Nature, Cell, Journal of Cell Science, была удостоена престижных наград, попала в список бестселлеров New York Times. Некоторые рецензенты книги Поллака столь высоко оценили его теорию, что утверждали: «Если тезис, выдвинутый Поллаком, окажется обоснованным, произойдет революция в клеточной биологии».

Однако концепция Поллака подразумевала, что часть клеточной воды находится в особом – связанном или структурированном состоянии, а споры о том, отличается ли клеточная вода от внеклеточной, продолжаются с возникновения клеточной теории. Поллак знал работы предшественников, доказывавших, что существенная часть клеточной воды представлена особой структурированной формой. Среди них были и советские биологи – последователи основателя Института цитологии АН СССР чл.-корр. АН СССР Д. Н. Насонова. Но особо сильное влияние на Поллака оказал выдающийся американский физиолог Гилберт Линг. Встреча с ним и знакомство с его работами послужили одним из стимулов к написанию этой книги. Однако данные, на которые опирались предшественники, утверждая, что клеточная вода обладает особой структурой и свойствами, были косвенными, и в целом отношение к их идеям было весьма скептическим. К моменту выхода книги ученого большинство клеточных и молекулярных биологов считали, что никакой воды, отличающейся по своим свойствам от обычной жидкой воды, в живых клетках нет. Поэтому Поллак и его коллеги приступили к экспериментальному проекту по проверке обоснованности выдвинутого в книге «Клетки, гели и двигатели жизни» тезиса об особых свойствах воды, смачивающих гидрофильные поверхности.

Удивительные, если не сказать – революционные, результаты этой работы, полученные с 2003 по 2013 г. (исследования в этой области продолжаются и сегодня), их смелая, часто шокирующая, но убедительная интерпретация составляют суть предлагаемой вашему вниманию книги «Четвертая фаза воды». Во вступительном слове я не вижу возможности углубляться в анализ множества разнообразных экспериментов, описанных в этой книге, тем более что она написана чрезвычайно увлекательно и доходчиво. Когда начинаешь ее читать, то оторваться так же трудно, как будто взял в руки научно-фантастическую повесть. Но художественная сторона изложения в этой книге не наносит ущерба ее научной строгости. Как это могло получиться – для меня загадка, но такая же загадка таится

в любом труде, освященном исключительным талантом автора. Тем не менее я не могу не отметить то главное, что было сделано Поллаком и его учениками за это десятилетие, а впоследствии подтверждено независимыми исследователями. Во-первых, Поллак обнаружил, что вблизи различных гидрофильных поверхностей формируется очень толстый слой организованной воды, настолько отличающийся по своим физико-химическим свойствам от «объемной» воды, что его можно считать особой, «четвертой» фазой воды. Доказательство существования такой воды служит серьезным аргументом в пользу того, что его предшественники, утверждавшие, что клеточная вода имеет особое строение, были правы, как был прав и сам Поллак, ранее предложивший «новый целостный подход к клеточной функции» в книге «Клетки, гели и машины жизни». Но если существование особой организованной воды в клетках уже было предсказано предшественниками Поллака, то он, изучая ее свойства как простейшими, так и самыми современными методами, сделал поистине эпохальные открытия. Во-первых, было обнаружено, что эта вода несет электрический заряд и в паре с объемной водой, несущей противоположный заряд, представляет собой электрическую батарею, способную не только быть источником энергии для реализации биологических функций, но и своеобразным «рабочим телом», осуществляющим часть этих функций. Второе открытие не менее значимо: источником энергии, заряжающим «водяную батарею», служит вездесущее электромагнитное излучение, в частности инфракрасное излучение. Эти открытия особых свойств воды позволяют по-новому посмотреть как на происхождение, так и на повсеместность жизни, что подтверждает пророческое высказывание Сент-Дьерди: «Вода – прародительница и матрица жизни».

Мне посчастливилось познакомиться с Джерри Поллаком почти 20 лет тому назад и быть свидетелем того, как он упорно и неустанно развивал новую Науку о Воде. Мне повезло быть научным редактором перевода этой книги на русский язык, что потребовало не просто чтения, а вглядывания в нее, и я получал громадное удовольствие от этой работы. Когда я ее закончил, то возникло даже чувство некоторой потери. Но радуется, что книга стала доступна и русскоязычному читателю – от школьника до высококвалифицированного специалиста – и что как ее достоинства, так и недостатки станут стимулом для того, чтобы задуматься об уникальной роли воды в природе, и послужат импульсом для любознательных исследователей включиться в дальнейшее изучение этого эликсира жизни.

*Доктор биологических наук,
профессор биологического факультета МГУ
В. Л. Воейков*

Благодарности

Словно ребенок, воспитанный деревней, эта книга развивалась благодаря усилиям многочисленных слабо связанных между собой людей.

Первым, безусловно, должен быть упомянут Гилберт Линг (Gilbert Ling), чей монументальный вклад в науку пробудил мой интерес к воде. Линг намного опередил свое время. Его новаторская работа открыла глаза многим ученым на тот факт, что вода является не просто пассивным переносчиком обычных молекул жизни; это центральный игрок во всех жизненных процессах. К сожалению, его многочисленные заслуги остались незамеченными, и его готовность бросить вызов научным догмам сделала его чем-то вроде отверженного. С тех дней, когда я впервые встретил Гилберта в середине 1980-х, он продолжал вдохновлять меня; если кто-то стал причиной написания этой книги, то этим человеком является Гилберт Линг.

Следующий в моем списке – профессор Владимир Воейков из Московского государственного университета. Трудно назвать научные области, в которых Владимир не обладает обширными знаниями, и я должен признаться, что многие темы, рассматриваемые в этой книге, родились во время бесед с ним. Его потрясающая эрудиция значительно расширила мой кругозор. Я также благодарю Владимира за то, что он приготовил серию изумительных русских обедов во время нашего пребывания в петербургской квартире. Сочетание пельменей и русской водки настолько возбудило творческие нейроны, что их излучение можно было зафиксировать даже в Чикаго.

Что касается непосредственной работы над этой книгой, я в основном обязан трем помощникам, перечисленным в хронологическом порядке их участия.

Первый, Брэндон Рейнс (Brandon Reines), помог еще до нашей встречи. У нас с Брэнденом была давняя научная переписка. Когда он задал мне сложный вопрос, я предположил, что ответ найдется в рабочем проекте моей будущей книги. И тут Брэндон совершил очень важный поступок. Он ответил, что книга слишком хороша: одно мороженое с фруктами на десерт может быть очень кстати, но пятнадцать порций подряд – слишком много, чтобы кто-нибудь смог их переварить. «Кулинарный» подход Брэндона избавил вас от глав, посвященных различным темам: от того, как птицы летают (не так, как вы думаете), до того, почему продолжительность жизни различных видов может различаться от нескольких дней до нескольких тысяч лет. Я оставляю эти и другие темы для последующих книг. Брэндон был невероятно полезен в оформлении материалов каждой главы удобным для читателя способом, в создании заголовков, которые не вызывают зевоты, и в прочих бесчисленных, но очень важных вещах. За все это я и мои читатели должны быть ему безмерно благодарны.

Второй помощник – мой сын Итан Поллак (Ethan Pollack). Уже в возрасте четырех лет Итан всю изучал скульптуру в Сиракузском университете, затем развивал свои навыки во Флоренции, учился в Нью-Йорке у художника мирового уровня Джеффа Кунса – и наконец вернулся домой в Сиэтл. Работать с ним было

чистым удовольствием. Итан продемонстрировал глубокое понимание соответствующих научных идей, высокую восприимчивость, необычный творческий подход, выраженную склонность уделять внимание деталям и неослабную преданность общему успеху проекта. Если вам покажется, что мои соображения ясно и привлекательно проиллюстрированы, – благодарите за это Итана.

Наконец, я благодарю моего редактора Дона Скотта (Don Scott). Из всех, кого я знаю, Дон способен наиболее четко формулировать мысли. Философ по образованию и адвокат по профессии, Дон удивительно ловко управляется со словами. Соответственно, он легко угадывал, что я из всех сил пытался сказать, когда не мог подобрать подходящие слова. Он предложил изящные варианты для неуклюжих фраз, которые я написал. А еще он показал удивительную способность выявлять пробелы в логике, даже в материалах, лежащих далеко за пределами его компетенции. Если в книге остались какие-то неясности, возможно, это из-за моего упрямого желания игнорировать его советы.

Помимо этих основных участников проекта, мне помогали три группы рецензентов, в одну из которых входили сотрудники моей лаборатории. Сотрудники лаборатории не стеснялись сообщать мне, с какими аспектами книги они не согласны. Отдельные коллеги выразили недовольство в связи с моими неортодоксальными идеями; в свою очередь, я заявил, что ответственность лежит полностью на мне, а не на них. Их острые комментарии, высказанные при обсуждении книги во время обеденного перерыва, помогли сформировать окончательный вариант проекта – особенно некоторые из наиболее сложных глав. Само собой разумеется, что результаты их многочисленных экспериментов составляют каркас всей этой книги.

Столь же полезные отзывы предоставили и магистранты. В лаборатории работает большая группа исследователей-добровольцев. Для многих из них эксперименты больше похожи на игру, чем на работу: мы предоставляем игрушки, а они используют свое воображение для проведения экспериментов, о которых «взрослые» ученые не осмеливаются даже подумать. Студенты любят эти эксперименты. У некоторых из них результаты оказались совершенно неожиданными, у нескольких – даже прорывными. Эти находки представлены в книге. Помимо экспериментального вклада, многие из этих студентов читали и критиковали последовательные версии текста, за что я выражаю им искреннюю благодарность.

Помимо этих двух групп рецензентов, многие коллеги во всем мире критиковали ранние черновики рукописи. Диапазон специальностей этих рецензентов простирается от химиков, физиков и инженеров до биологов. Была даже небольшая группа людей, далеких от науки. Некоторые из них потратили на мою книгу много часов личного времени. Их коллективный совет позволил мне избежать глубоких заблуждений. Они также помогли мне организовать материал – задача более сложная, чем вы можете себе представить. Некоторые рецензенты отметили, что цель, подразумевающая создание монографии, охватывающей всю науку о воде, была почти недостижимой: каждая глава грозила разрастись до целой книги, и выбор правильного баланса между удобочитаемостью и объемом текста оказался сложной задачей.

По совершенно иным причинам я благодарю членов моей семьи. Моей спутнице жизни Эмили Фридман я приношу публичное покаяние: я нарушил обещание, данное в моей предыдущей книге, что следующая книга будет короче

и будет занимать меньше моего времени. Эта книга длиннее; и у меня в работе две новые книги. Эми прекрасно понимала, каких трудозатрат требуют проекты такого масштаба. У нее воистину ангельское терпение. Остальная часть моей семьи также поддержала меня: Миа, вынужденная буквально записываться в очередь, чтобы отвлечь своего отца от затягивающего ноутбука; не теряющий оптимизма Итан, милостиво реагирующий на мои многочисленные требования о доработке иллюстраций, и Сет с его вечными шутками о моей склонности по любому поводу упоминать «структурированную воду». Моя семья не могла бы быть более благосклонной в этом многолетнем испытании.

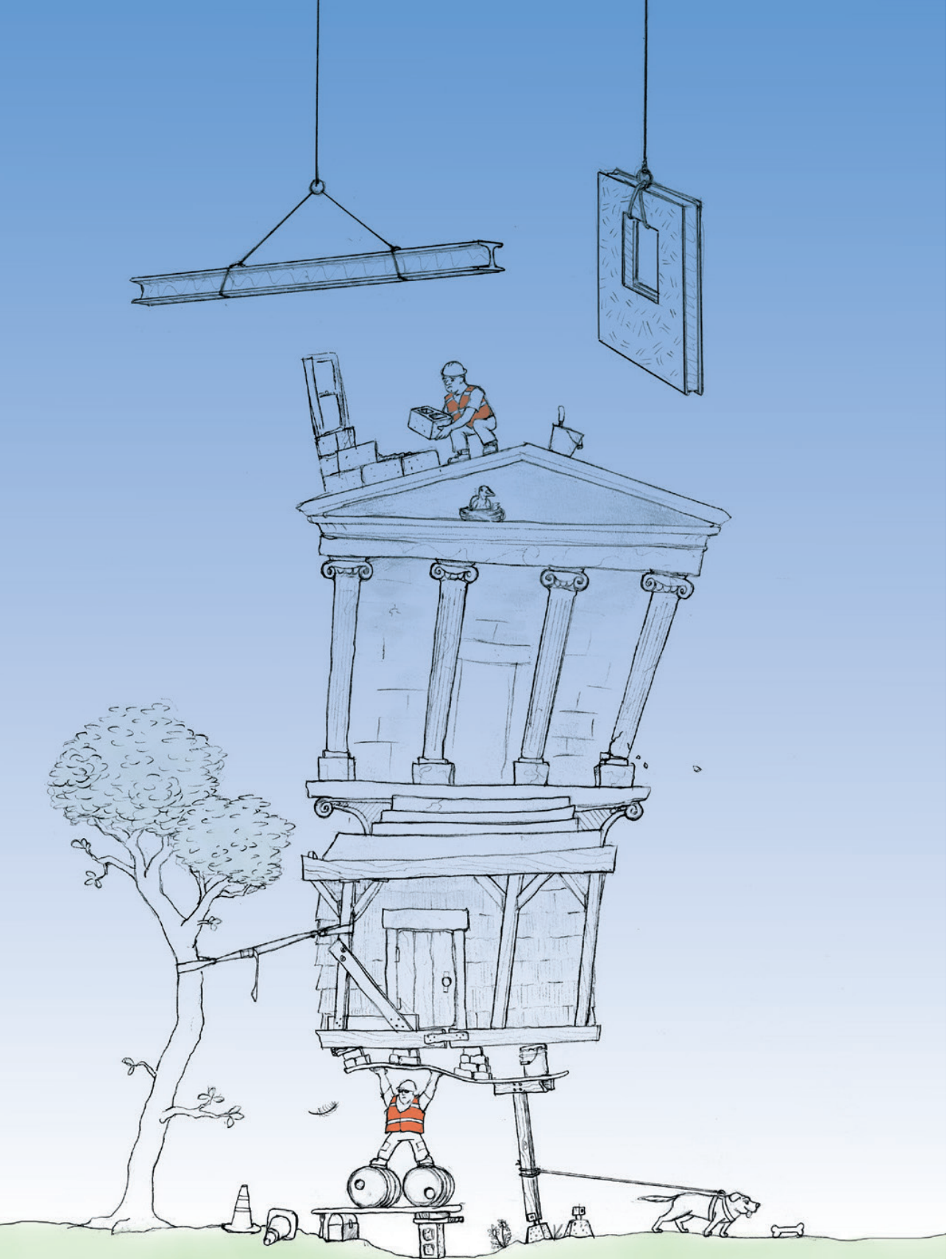
Наконец, из вышеупомянутых групп я хочу выделить всех тех, кто критиковал рукопись или ее части. Этот список включает студентов, лаборантов, ученых и рядовых граждан. Уровень их полезности часто был не пропорционален их академическому статусу; следовательно, я перечислю этих участников в порядке английского алфавита, и если чье-либо имя было случайно упущено, я приношу свои извинения.

Я выражаю благодарность следующим людям: Питер Аллен, Брэндон Буман, Брайан Биккум, Фрэнк Борг, Бинхуа Чай, Руйинг Чен, Даниэль Чан, Чи Чуан, Кара Комфорт, Чарльз Кушинг, Ронни Дас, Кен Дэвидсон, Джеймс де Мео, Апараджита Датчудхури Найджел Дайер, Коллин Эддингтон, Ксавье Фигероа, Херб Флешнер, Бен Флауэрс, Эмили Фридман, Гонсало Гарсия, Карл Гаттерер, Мэтью Гелбер, Кристал Гинтер, Матиас Гонсалес, Рон Гриффин, Джон Григг, Жанна Григорьян, Эммануэль Хэвен, Эммануэль Хавен Горовиц, Линда Хуфнагель, Брианна Хушка, Джон Хван, Федерико Иена, Хиромаса Ишиватари, Тенгиз Джалишвили, Манал Джмайле, Константин Коротков, Этан Кунг, Курт Кунг, Виктор Куз, Алиссия Летурно, Чжэн Ли Мюссер, Мюссер Лю Му Кайли ван Нгуен, Дерек Нхан, Габриэла Патилея, Бернард Пеннок, Ари Пенттила, Орион Полински, Итан Поллак, Сет Поллак, Сильвия Поллак, Лео Рамакерс, Рэнди Рэндалл, Судешна Саву, Райнер Шталберг, Клинт Стивенсон, Хизер Суэйн, Сааки Такарада, Шрути Тандон, Йолин Томас, Тони Томсон, Мерри То, Джерард Тримбергер, Кароли Тромбитас, Оути Виллет, Владимир Воейков, Якоб Воллер, Джефф Янг, Хёк Ю и Рольф Ипма. Три из них – Кара Комфорт, Чарльз Кушинг и Рольф Ипма – потратили исключительное количество времени и усилий.

Наконец, я благодарю Аманду Фредерикс за ее творческий вклад в верстку и внимание к деталям, а также Рольфа Ипму за его скрупулезную работу по индексированию.

Создание этой книги потребовало совместных усилий большого сообщества заботливых и вдумчивых людей. Я сердечно благодарю всех, кто внес свой вклад.





Предисловие

В моей гостиной сидел нобелевский лауреат. Он был застенчив, а я был напуган – сочетание, вызывающее взаимную неловкость. Это было все равно, что пытаться поболтать с Эйнштейном. Слова никак не приходили на ум.

Сэр Эндрю Хаксли (Andrew Huxley) был выдающейся личностью даже среди нобелевских лауреатов. Он уже провел классические исследования клеточных мембран и к моменту нашей встречи стал лидером в области изучения механизма сокращения мышц. Среди его многочисленных наград и титулов значились должность президента Королевского общества, звание магистра Тринити-колледжа в Кембридже и орден «За заслуги» от королевы Англии. Он также был членом выдающейся семьи Хаксли, в родословную которой входили легендарный биолог Томас Генри Хаксли («бульдог Дарвина») и выдающийся писатель Олдос Хаксли. И этот высокородный ученый аристократ сидел в моей скромной гостиной.

В той неловкой ситуации никто не решался упомянуть шило в мешке: результаты экспериментов, проведенных в нашей лаборатории, говорили о том, что теория моего гостя может быть неверной. Он приехал, чтобы проверить наши доказательства, полученные ранее в стенах моей лаборатории. Но в моей гостиной мы успешно избежали этого острого вопроса, сосредоточившись вместо этого на такой беспроблемной теме, как погода. Даже несколько бокалов хереса в качестве социальной смазки не развязали нам языки; в конце концов, Хаксли в наших глазах был научным оракулом – практически непогрешимым божеством.

Столь монументальные фигуры, как Хаксли, производят потрясающее впечатление; однако мы склонны забывать, что даже самые известные ученые – тоже люди. Они едят ту же пищу, что и мы, разделяют те же страсти и подвержены тем же человеческим слабостям. Поэтому, удивляясь остроте их ума и уважая их вклад в науку, мы не должны рассматривать их достоинства как свидетельство непогрешимости; научные формулировки вряд ли священны.

Считать любую научную формулировку священной – серьезная ошибка. Любая система знаний, ко-

торуую мы строим, должна опираться на прочный фундамент экспериментальных данных, а не на священные формулировки; в противном случае готовый продукт может напоминать одно из «невозможных» произведений художника Маурица Эшера (Maurits Escher) – результат, которого стоит избегать. Даже давние общепринятые модели остаются уязвимыми, если они не обладают простой и понятной структурой. История Галилея учит нас, что если теория нуждается в поддержке сложных «эпициклов» для согласования с эмпирическими наблюдениями, пора начинать поиск более простых объяснений.

Этой книгой я пытаюсь заложить надежный фундамент для новой науки о воде, основанный на недавних открытиях. На этом новом фундаменте мы построим систему знаний, обладающую значительной предсказательной силой: повседневные явления станут понятными без головокружных рассуждений и логических пробелов. А затем вы получите бонус – в процессе создания этой передовой системы мы сформулируем четыре новых научных принципа, которые могут найти применение за пределами науки о воде и охватывают природу в целом.

Как видите, я использую нетрадиционный подход. Он не опирается на «господствующую мудрость» и не считает изначально правильными общеизвестные принципы. Вместо этого я возвращаюсь к изначальному методу ведения науки – полагаться на общее наблюдение, простую логику и самые элементарные принципы химии и физики. Например, наблюдая за паром, поднимающимся из вашей чашки горячего кофе, вы можете увидеть небольшие облака. Что это говорит вам о природе процесса испарения? Дают ли общеизвестные принципы исчерпывающее объяснение наблюдаемого явления? Или мы должны начать искать в другом месте? (Вы поймете, что я имею в виду, если прочитаете главу 15.)

Этот старомодный подход может показаться слегка неуважительным, потому что в нем мало почтения к «богам» науки. С другой стороны, я считаю, что такой подход способствует более глубокому интуитивному пониманию природы – пониманию, которое могут оценить даже неспециалисты.

Разумеется, я не начинал свою жизнь как революционер. На самом деле я вполне сливался с фоном. Будучи студентом-электротехником, я ходил на занятия в аккуратной одежде и уважительно слушал

преподавателей. На вечеринках я, как и мои сверстники, носил галстук и пиджак. Мы выглядели столь же революционно, как пожилые дамы из кружка шитья и рукоделия.

И только аспирантура в Университете Пенсильвании пробудила во мне первые мысли о революции. В то время я занимался биоинженерией. Я обнаружил, что инженерная часть этой области науки вполне сформировалась, тогда как биологическая часть наводила на глубокие размышления. Биология казалась мне подходящим местом; она была полна динамизма и волнующих перспектив. Тем не менее ни один из моих преподавателей биологии даже не намекал на то, что такие студенты, как мы, могут однажды совершить научный прорыв. Наша работа заключалась в том, чтобы добавить плоть к существующим скелетам.

Я думал, что постепенно добавлять плоть знаний на скелет теории – это и есть задача науки, пока не встретил инакомыслящего коллегу. Тацуо Ивазуми (Tatsuo Iwazumi) прибыл в Пенсильванию, когда я был близок к завершению моей докторской диссертации. Я построил простую компьютерную модель сокращения сердца на основе мышечной модели Хаксли, и Ивазуми должен был пойти по моим стопам. Однако он заявил, что это невозможно! Забыв про присущее большинству японцев почтение, Ивазуми недвусмысленно заявил, что моя модель бесполезна: она опирается на общепринятую теорию сокращения мышц, однако этот теоретический механизм не работает. «Механизм Хаксли изначально нестабилен, – продолжил он. – Если бы мышцы действительно работали таким образом, то они разрушились бы при первом же сокращении».

Ого! Открытый вызов мышечной теории Хаксли? Ни за что!

Хотя ныне покойный Ивазуми на каждом шагу излучал сияние таланта и получил безупречное образование в Токийском университете и Массачусетском технологическом институте, он, как мне казалось, не мог сравниться с легендарным сэром Эндрю Хаксли. Разве мог столь выдающийся нобелевский лауреат так глубоко ошибаться? Мы привыкли, что теории, предложенные такими мудрецами, являют собой священную истину и вписаны в учебники, но вдруг появился этот дерзкий молодой японский студент-инженер, который заявил мне, что эта конкретная истина является не просто ошибочной – она невозможна.

Я неохотно признал, что мнение Ивазуми звучит убедительно – ясно, логично и просто. Насколько я знаю, ничего не изменилось и по сей день. Те, кто впервые слышат аргументы, быстро находят в них логику, и большинство слушателей поражены их простотой.

Для меня возражение Ивазуми стало поворотным моментом. Оно научило меня тому, что здравые логические аргументы могут разбить даже давние системы убеждений, за которыми стоят армии последователей. Достаточно единственного опровержения, чтобы теории пришел конец.

Моя система научной веры была разрушена. Продолжать цепляться за нее было бы свойственно религиозному фанатику, а не ученому. Встреча с Ивазуми также научила меня тому, что независимое мышление – это больше, чем просто клише; это необходимое условие поиска истины. Фактически именно это условие привело к моему спору о сокращении мышц с сэром Эндрю Хаксли (который так и не состоялся).

Бросать вызов авторитетам – это неблагодарное занятие, уверяю вас. Вы можете подумать, что члены научного сообщества с радостью примут новые подходы, которые проливают новый свет на старое мышление, но в основном это не так. Новые подходы бросают вызов доминирующей мудрости. Ученые, возглавляющие науку, склонны обороняться, поскольку любой такой вызов угрожает их положению. Следовательно, путь первопроходца таит в себе множество опасных поворотов и грозных препятствий.

Несмотря на эти препятствия, мне как-то удалось выжить в ранние годы моей карьеры. Умело сочетая непочтительность с догматичной наукой и даже проявляя некоторое уважение к ней, я смог избежать неприятностей. Разумеется, не обошлось без проблем, но мы впервые применили настолько впечатляющие методы, что мои ученики смогли найти хорошую работу по всему миру, а некоторые из них достигли самых высоких уровней в академических кругах. Эта респектабельность спасла меня от печальной участи, характерной для большинства революционеров.

В середине моей карьеры мне захотелось расширить научный кругозор. Я стал внимательно приглядываться к самым разным областям науки, и поскольку у меня уже был опыт, я везде чуял запах скрытых проблем. Научных неувязок было предостаточно. С некоторыми из них я уже сталкивался, другие скрывались за личиной непогрешимой мудрости и казались такими

же недостижимыми, как и проблемы в области механизма сокращения мышц.

Одна из подобных сложнейших проблем, связанная с наукой о воде, стала предметом этой книги. В то время одной из звездных персон науки был Гилберт Линг. Он изобрел стеклянный микроэлектрод, который совершил переворот в клеточной электрофизиологии. За это достижение он должен был получить Нобелевскую премию, но вместо этого оказался в опале, потому что результаты его исследований говорили о том, что молекулы воды внутри клетки выстроены в упорядоченную структуру. С точки зрения большинства ученых-биологов и физиков такая упорядоченность была недопустимой ересью, однако Линг не стеснялся излагать свое мнение, особенно среди тех, кто думал иначе.

Это столкновение взглядов закончилось тем, что Линг потерял репутацию. Ученые, придерживающиеся более традиционных взглядов, осудили его как еретика-provokatora. Я думал иначе. Я обнаружил, что его взгляды на клеточную воду так же разумны, как взгляды Ивазуми на сокращение мышц. Некоторые вопросы остались без ответа, но в целом его предположения казались обоснованными, логичными и обещали новые большие открытия. Я помню, как пригласил Линга выступить с лекцией в моем университете. Старший коллега начал отговаривать меня. С якобы отеческой заботой он предупредил, что моя поддержка столь противоречивой персоны может причинить серьезный ущерб моей собственной репутации. Я рискнул – но обошлось без последствий.

Пример Линга открыл мне глаза. Я начал понимать, в чем причина неурядиц, которые испытывают бунтари от науки: их возражения чрезвычайно раздражают ортодоксальных ученых. Я также пришел к выводу, что проблемы ортодоксальной науки намного шире, чем принято думать. Мало того, что разразились целые битвы, связанные с механизмом работы мышц и наукой о воде, голоса несогласных можно было услышать и в других областях, начиная от передачи нервных импульсов до космической гравитации. Чем глубже я вглядывался, тем больше находил разногласий. Я не имею в виду скандальные бредни чудаковатых безумцев, которые стремятся привлечь к себе внимание; я говорю о настоящих глубоких сомнениях, возникающих у вдумчивых профессиональных ученых.

Современная наука пронизана противоречиями. Вы можете не знать об этих противоречиях, как я не знал

о них до недавнего времени, потому что противоречия часто остаются незамеченными. Действующие научные авторитеты не спешат демонстрировать трещины в своей броне, поэтому проблемы скрыты за кулисами. Даже молодые ученые, начинающие свою карьеру в какой-либо области науки, могут не подозревать, что ее ортодоксальность вызывает большие сомнения.

Несогласие в науке всегда развивается по предсказуемой схеме. Не в силах сдерживать внутренний протест против нарастающей сложности теории и ее расхождений с наблюдениями, некий ученый заявляет о своих возражениях; при этом он часто предлагает новую теорию. Догматические институты обычно игнорируют брошенный вызов. Это обрекает большинство новых идей на угасание в мрачном подвале забвения. Те немногие протесты, которые удостоились внимания, часто встречают агрессивный отпор: научный истеблишмент с пренебрежением и презрением отвергает бунтаря, часто обвиняя бедолагу в безумии.

Вывод очевиден: наука поддерживает статус-кво. В ней мало что происходит. Рак остается невылеченным. Здания науки продолжают громоздиться на выветрившихся, а иногда и разрушенных фундаментах, что заставляет строить громоздкие модели и постоянно раздувать учебники, и без того наполненные бесчисленными, иногда несущественными деталями. Некоторые области научного знания стали настолько запутанными, что практически непостижимы. Часто мы даже не понимаем друг друга. Многие ученые утверждают, что именно такой должна быть современная наука – сложной, самозамкнутой, отделенной от человеческого опыта. По их мнению, простые причинно-следственные связи являются неуместным пережитком прошлого, отвергнутым в пользу сложных статистических корреляций современности.

Я узнал намного больше о нашем молчаливом смирении перед научной сложностью, заглянув в книгу Ричарда Фейнмана по квантовой электродинамике с метким названием QED¹. Многие считают Фейнмана, легендарного ученого-физика, Эйнштейном конца XX века. Во введении к изданию книги Фейнмана

¹ Игра слов. Аббреатура QED обозначает не только *quantum electrodynamics* (квантовая электродинамика), но и выражение на латинском языке *quod erat demonstrandum* (что и требовалось доказать). На русском языке издана под названием «КЭД – странная теория света и вещества». – Прим. перев.

2006 года один выдающийся физик сказал, что вы, вероятно, не поймете материал, но вам все равно следует прочитать книгу, потому что это важно. У меня эти слова вызвали слегка отталкивающее чувство. Однако это было не настолько унижительно, как то, что сам Фейнман заявил во введении к своей книге: «Моя задача – убедить вас не отворачиваться из-за того, что вы этого не понимаете. Дело в том, что мои студенты-физики тоже этого не понимают. Потому что я сам этого не понимаю. Никто не понимает».

Книга, которую вы держите в руках, бросает вызов представлению о том, что современная наука должна лежать за пределами человеческого понимания. Мы стремимся к простоте. Если в настоящее время традиционные подходы ортодоксальной науки не могут просто и понятно объяснить повседневные наблюдения, то я готов воскликнуть, что король голый – эти подходы могут быть ошибочными. Хотя авторами основополагающих теорий могли быть выдающиеся гиганты научной мысли, мы не имеем права сбрасывать со счетов вероятность того, что новые идеи будут работать лучше.

Наша конкретная цель – понять природу воды. Сегодня вода *кажется* сложной. Объяснение повседневных явлений часто требует заумных рассуждений и неочевидных выводов – и все же нам не удастся достичь достаточно глубокого понимания. Не является ли причиной этой ненужной сложности догматическая система знаний – коллекция устаревших теорий, собранных из различных областей? Возможно, более подходящие теории – основанные непосредственно на изучении воды – помогут нам построить простую и понятную картину. Это направление, в котором мы движемся.

Чтобы читать эту книгу, вам не нужно быть ученым; книга предназначена для тех, кто обладает даже самыми начальными знаниями в области науки. Если вы знаете, что положительное притягивает отрицательное и слышали о периодической таблице, то вы сможете понять, о чем я говорю. С другой стороны, мой подход не понравится тем, кто склонен игнорировать любые сомнения в текущих догмах, поскольку нити сомнения вплетены в саму ткань книги. Эта книга нетрадиционна – сага с динамичным сюжетом и неожиданными поворотами, приводящими к заключениям, которые, я надеюсь, вы найдете обоснованными и, возможно, даже забавными для чтения.

Я ограничил формальные ссылки лишь теми случаями, когда цитаты казались абсолютно необходимыми. Там, где эта точка зрения общеизвестна или легко доступна, я их пропустил. Главной целью было упростить текст для удобства чтения.

Наконец, я хочу отметить, что не питаю иллюзий на предмет того, что все идеи из этой книги лягут в основу новой теории воды. Некоторые из них останутся лишь рассуждениями. Я ведь стремился констатировать научные факты, а не писать научную фантастику. Однако, как вы знаете, даже один уродливый факт может разрушить самые красивые теории. Материал в этой книге представляет мою лучшую и самую серьезную попытку собрать имеющиеся доказательства в единую систему толкования. Однако материал нетрадиционный, и я уже знаю, что некоторые ученые не согласны со всеми аспектами. Тем не менее это искренняя попытка создать понимание там, где его почти нет.

Итак, погружаясь в эти мутные воды, давайте постараемся достичь необходимой ясности.

*Джеральд Поллак
Сиэтл, сентябрь 2012 г.*

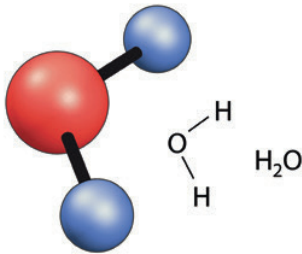
Открытие состоит в том, чтобы видеть то,
что видели все,
и думать так, как не думал никто.

*Альберт Сент-Дьёрды,
лауреат Нобелевской премии (1893–1986)*

Зверинец

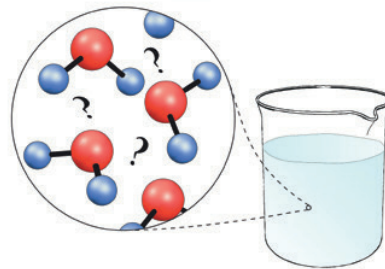
Краткий путеводитель по существам, обитающим в удивительном мире воды

Молекула воды



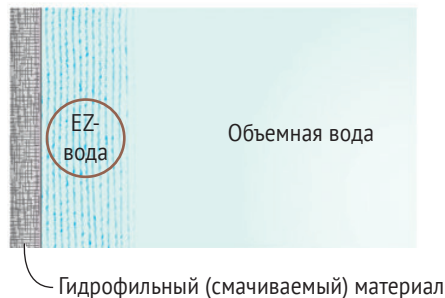
Всем известная молекула воды состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода

Объемная вода



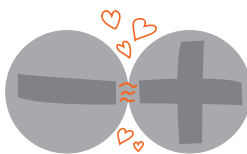
Множество молекул воды, взаимное расположение которых остается предметом споров

Исключающая зона (exclusion zone, EZ)



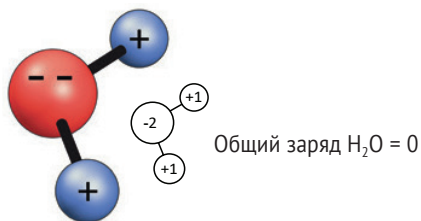
Исключающая зона – это неожиданно большая зона воды, возникающая у поверхности многих погруженных в воду материалов и названная так, потому что она исключает из себя практически любые примеси. EZ-вода содержит большое количество зарядов и по свойствам значительно отличается от объемной воды. Иногда EZ-воду называют *четвертой фазой воды*.

Электрон и протон



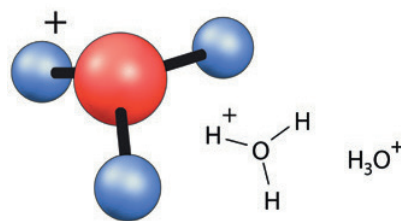
Электроны и протоны являются носителями элементарных зарядов. Они притягиваются друг к другу, потому что первый заряжен отрицательно, а второй положительно. Электроны и протоны определяют поведение воды – намного сильнее, чем вы могли подумать.

Заряд молекулы воды



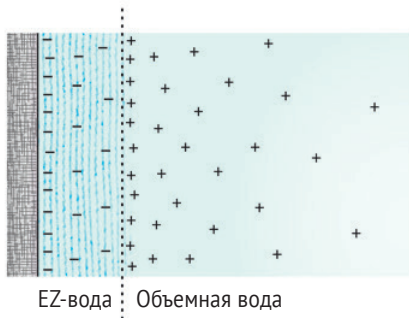
Молекула воды имеет нейтральный заряд. Заряд атома кислорода равен -2 , в то время как заряд каждого атома водорода равен $+1$.

Ион гидроксония



Протоны прицепляются к молекулам воды, образуя ионы гидроксония. Представьте себе положительно заряженную молекулу воды – это и есть ион гидроксония. Заряженные частицы, такие как ионы гидроксония, очень подвижны и могут сеять в воде большой хаос.

Поверхностная батарея



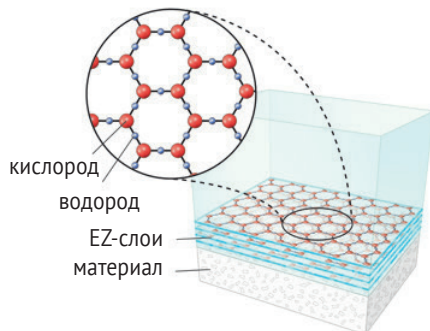
Эта батарея формируется из исключаяющей зоны и зоны объемной воды. Соответствующие зоны противоположно заряжены, сосуществуют длительное время, как полюса в обычной батарее.

Лучистая энергия



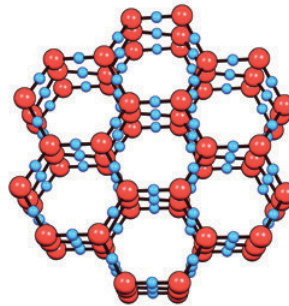
Батарею заряжает лучистая энергия. Энергия поступает от Солнца и других источников излучения. Вода поглощает энергию и использует ее для зарядки батареи.

Сотовый слой



Сотовый слой – это унитарная структура исключаяющей зоны (EZ). Слои укладываются друг на друга параллельно поверхности материала и образуют EZ.

Лед



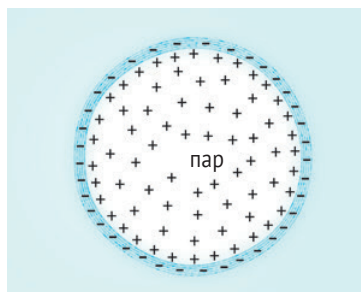
Структура льда на атомарном уровне очень близка к структуре исключаяющей зоны. Это не случайное совпадение – одно состояние воды трансформируется в другое.

Капелька



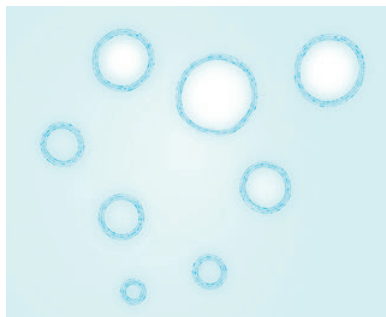
Водяная капелька состоит из EZ-оболочки и объемной воды внутри. Эти компоненты имеют противоположные заряды.

Пузырек

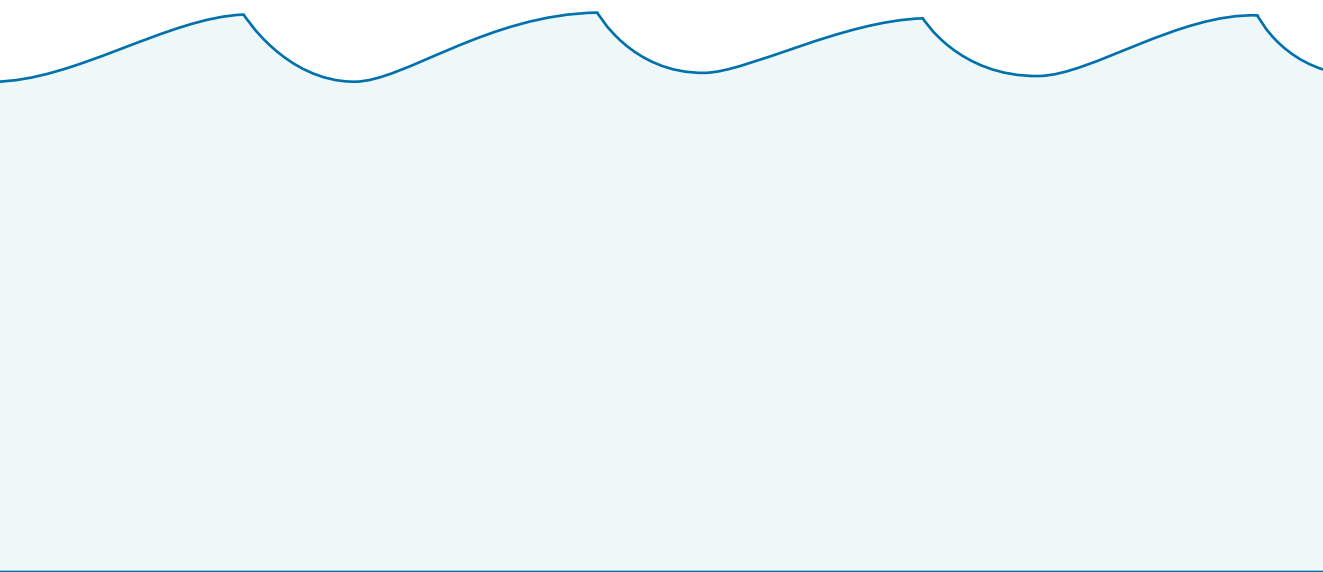


Строение пузырька похоже на строение капельки, только внутри оболочки газообразное содержимое. Обычно этим содержимым является водяной пар.

Везикула

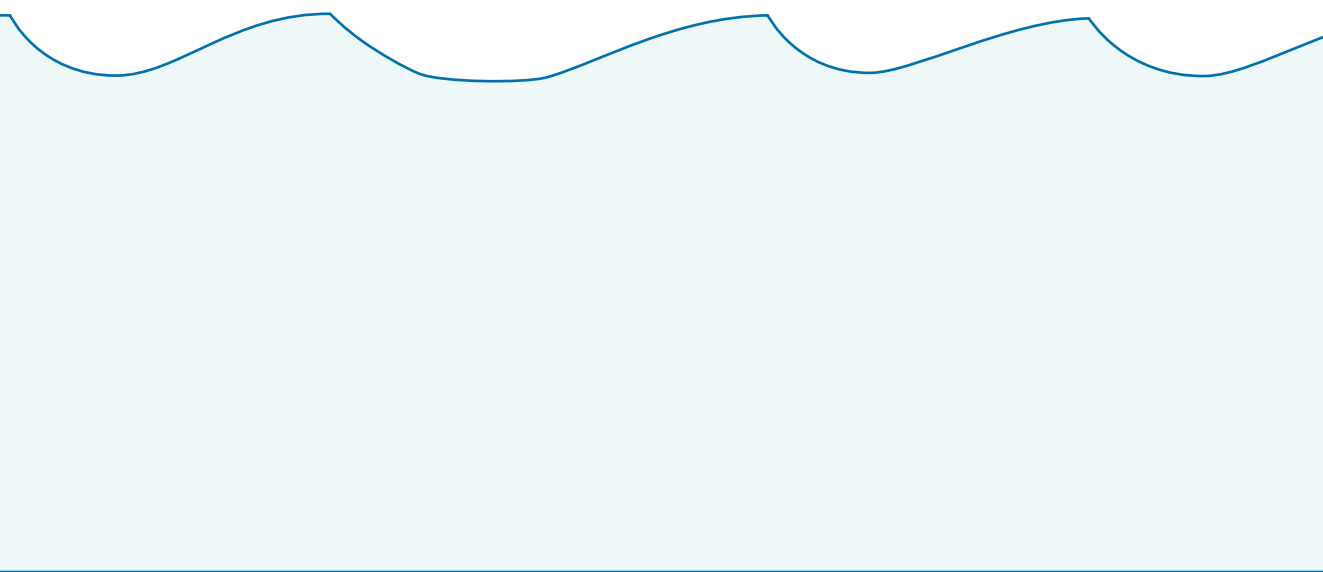


Поскольку капельки и пузырьки устроены одинаково, мы будем называть их одним словом: *везикула*. Везикула может быть капелькой или пузырьком в зависимости от фазового состояния воды внутри. Когда капелька поглощает достаточное количество лучистой энергии, она превращается в пузырек.



РАЗДЕЛ I

Загадки воды: прокладываем путь





Глава 1 В окружении тайн

Двое студентов со стаканом в руке мчались ко мне по коридору, чтобы показать что-то неожиданное. К сожалению, результат их эксперимента исчез, прежде чем я успел взглянуть. Но он не был случайностью. На следующий день результат повторился, и стало понятно, почему студенты отреагировали с таким волнением: они стали свидетелями явления природы, которое не поддается объяснению.

Вода покрывает большую часть земли. Она рассеяна по небу. Она заполняет ваши клетки – в большей степени, чем вы можете себе представить. Ваши клетки на две трети объема состоят из воды; однако молекула воды настолько мала, что если бы вы сосчитали каждую молекулу в своем теле, 99 % из них были бы молекулами воды. Чтобы заполнить две трети объема, нужно очень много молекул воды. Ваши ноги несут на себе огромный мешок, заполненный в основном молекулами воды.

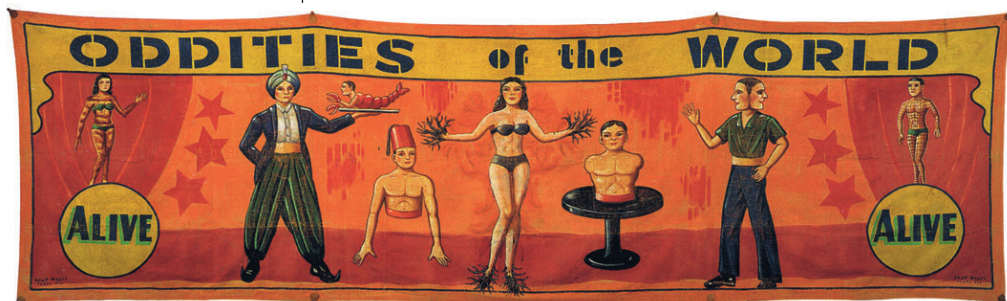
Что мы знаем об этих молекулах? Ученые изучают их, но они редко обращают внимание на ансамбли молекул воды, которые можно найти в мензурках. Скорее, большинство ученых сосредоточивается на отдельной молекуле и ее непосредственных соседях, надеясь экстраполировать предмет изучения на более масштабные явления. Каждый ученый стремится понять поддающееся наблюдению поведение воды, то есть выяснить, на чем основано «социальное» поведение молекул.

Действительно ли мы понимаем коллективное поведение молекул воды?

Поскольку вода повсюду, вы можете сделать разумный вывод, что мы ее полностью понимаем. Ну что же, попробуйте подтвердить это распространенное предположение. Ниже я представляю коллекцию ежедневных наблюдений, а также несколько простых лабораторных опытов. Посмотрим, сможете ли вы их объяснить. Если у вас это получится, то мне нечего добавить – вы можете перестать читать эту книгу. Если

же вы не можете найти объяснения даже после знакомства с многочисленными доступными источниками, тогда я прошу вас отказаться от уверенности в том, что мы знаем все, что нужно знать о воде.

Я думаю, что вы не справитесь. Но давайте посмотрим, что у вас получится.



1.1. ПОВСЕДНЕВНЫЕ ТАЙНЫ

Вот пятнадцать наблюдений из повседневной жизни. Вы можете их объяснить?

- *Разница между мокрым и сухим песком.* Ваша нога глубоко погружается в сухой песок, но этого не случается с мокрым песком у кромки воды. Мокрый песок настолько прочно связан, что вы можете использовать его для строительства устойчивых замков или больших песчаных скульптур. Вода, очевидно, служит связующим веществом. Но как именно вода склеивает песчинки? (Ответ раскрывается в главе 8.)
- *Океанские волны.* Волны обычно затухают, пройдя относительно короткое расстояние. Однако волны цунами могут облететь Землю несколько раз, прежде чем окончательно исчезнут. За счет чего они сохраняются на таких огромных расстояниях? (См. главу 16.)
- *Желатиновые десерты.* Желатиновые десерты в основном состоят из воды. Кажется бы, они должны свободно растекаться (рис. 1.1). Однако этого не происходит. Даже из гелей, которые содержат до 99,95 % воды [1], не вытекает ни капли жидкости. Почему же гели не теряют воду? (Прочтите главы 4 и 11.)
- *Подгузники.* Подобно гелям, подгузники могут удержать в себе много воды: мочи в 50 раз больше, а чистой воды в 800 раз больше собственного



Рис. 1.1. Что удерживает воду внутри геля?

веса. Как они могут удерживать так много воды? (См. главу 11.)

- *Скольжение по льду.* Твердые материалы обычно не склонны к взаимному скольжению: вспомните, как вы взбираетесь вверх по склону холма. Трение удерживает вас от соскальзывания обратно. Однако если холм покрылся льдом, вы должны быть очень осторожны, чтобы не разбить себе лицо при падении. Почему поведение льда так сильно отличается от поведения большинства твердых материалов? (Вы найдете объяснение в главе 12.)
- *Травматический отек.* Ваш друг ломает лодыжку во время теннисного матча. Его лодыжка увеличивается вдвое по сравнению с нормальным размером в течение нескольких минут. Почему вода так быстро скапливается в районе перелома? (Ответ в главе 11.)
- *Замерзание теплой воды.* Не по годам одаренный ученик средней школы однажды заметил нечто странное на уроке домоводства. Из порошкообразной смеси для мороженого быстрее получается замороженное лакомство, если добавить теплую воду вместо холодной. Это парадоксальное явление получило широкую известность. Как получается, что теплая вода может замерзать быстрее, чем холодная? (См. главу 17.)
- *Поднимающаяся вода.* Листья растений нуждаются в живительной влаге. Вода поднимается вверх от корней по вертикальным капиллярным каналам, чтобы восполнить потерю жидкости в результате испарения с поверхности листьев. Общепринятое объяснение утверждает, что капиллярные силы заставляют воду двигаться по каналам снизу вверх. Однако для стометрового красного дерева такое объяснение звучит проблематично: веса воды, накопленной в каждом капилляре, достаточно для разрушения канала. После разрушения канала вода больше не сможет поступать от корней к листьям. Как природа предотвращает это разрушение? (Ознакомьтесь с главой 15.)
- *Разрушение бетона.* Корни деревьев способны взломать бетонный тротуар. Корни состоят в основном из воды. Как водянистым корням удается развить огромное давление, чтобы сломать бетонные плиты? (Посмотрите главу 12.)

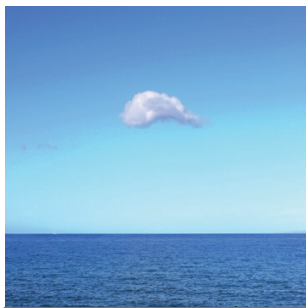


Рис. 1.2. Что заставляет поднимающийся водяной пар собираться в определенных местах?

- *Капли на поверхности.* Капли воды сохраняют округлую форму на одних поверхностях и свободно растекаются по другим поверхностям. Степень растекания фактически служит основой для классификации различных поверхностей. Наличие классификации, однако, не объясняет, почему капли растекаются по поверхности или как далеко они растекаются. Какие силы заставляют воду растекаться? (Перейдите к главе 14.)
- *Хождение по воде.* Возможно, вам попалось видео про ящериц-василисков по прозвищу «ящерица Иисуса Христа», бегающих по поверхности пруда. Эти ящерицы свободно бегают по воде от одного берега к другому. В качестве правдоподобного объяснения приходит на ум высокое поверхностное натяжение воды, но если поверхностное натяжение возникает только в нескольких верхних молекулярных слоях, то это натяжение должно быть слабым. Какое свойство воды (или ящерицы) делает возможным это, казалось бы, библейское чудо? (Прочтите главу 16.)
- *Одиночные облака.* Водяной пар поднимается со всей бескрайней поверхности океана. Этот пар должен быть рассеян повсюду. Тем не менее мы часто видим пухлые белые облака, одиноко плывущие по ясному голубому небу (рис. 1.2). Какая сила заставляет рассеянный восходящий пар собираться в определенных местах? (Этот вопрос рассматривается в главах 8 и 15.)
- *Скрип суставов.* Здоровые колени обычно не скрипят при энергичном сгибании. Это потому, что вода обеспечивает отличную смазку между костями (фактически между слоями хряща, которые разделяют кости). Какое свойство воды отвечает за это исчезающе малое трение? (Ответ в главе 12.)
- *Плаваемость льда.* Большинство веществ сжимаются при охлаждении. Вода тоже сжимается – но только до 4 °С. Ниже этой критической температуры вода начинает значительно расширяться, пока не превратится в лед. Вот почему лед плавает. Что происходит с водой около 4 °С, и почему лед гораздо менее плотный, чем вода? (На эти вопросы отвечает глава 17.)
- *Консистенция йогурта.* Почему йогурт так хорошо сохраняет свою консистенцию? (См. главу 8.)

1.2. ТАЙНЫ ИЗ ЛАБОРАТОРИИ

Дальше я расскажу про несколько простых лабораторных наблюдений, начиная с того, что увидели те студенты, которые мчались по коридору, чтобы показать мне свою находку.

1.2.1. Тайна мигрирующих микросфер

Студенты провели простой эксперимент. Они бросили горстку крошечных сфер, известных как «микросферы», в стакан с водой. Потом они встряхнули суспензию, чтобы микросферы равномерно смешались с водой, накрыли стакан, чтобы уменьшить испарение, а затем отправились домой спать. На следующее утро они вернулись, чтобы проверить результат.

С традиционной точки зрения ничего не должно было произойти, кроме, возможно, появления небольшого осадка на дне стакана. Суспензия должна была оставаться равномерно мутной, как будто вы налили несколько капель молока в воду и энергично встряхнули емкость.

Взвесь действительно выглядела равномерно мутной – по большей части. Однако вблизи центра стакана (если смотреть сверху вниз) необъяснимым образом сформировался вертикальный прозрачный цилиндр (рис. 1.3). Прозрачность означала, что в цилиндре не было микросфер. Какая-то таинственная сила вытеснила микросферы из центрального ядра к периферии стакана.



Если вы когда-либо смотрели фильм «Космическая одиссея 2001 года» и помните удивление людей-обезьян,

Рис. 1.3. В суспензии из микросфер приблизительно по центру образовалась прозрачная область. Почему самопроизвольно возникает этот цилиндр без микросфер?

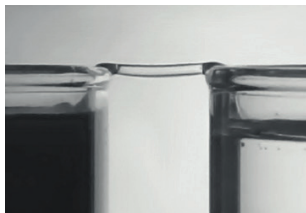


Рис. 1.4. Водный мост заполняет промежуток между двумя заполненными водой стаканами. Какая сила поддерживает мост?

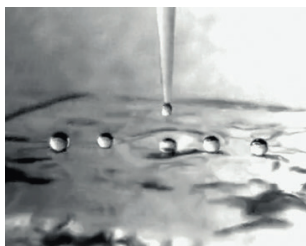


Рис. 1.5. Капельки воды плавают на поверхности воды в течение некоторого времени. Почему?

впервые увидевших безупречный монолит инопланетян, у вас есть некоторое представление о том, как отвисли наши челюсти. Это зрелище стоило видеть.

Пока начальные условия эксперимента оставались в четко заданных рамках, мы всегда обнаруживали эти прозрачные цилиндры; мы могли бы воспроизводить их снова и снова [2]. Вопрос: что движет удивительной миграцией сфер из центра? (Объяснение в главе 9.)

1.2.2. Водный мост

Другое любопытное лабораторное явление, так называемый «водный мост», соединяет воду через зазор между двумя стеклянными стаканами – если вы можете себе такое представить. Хотя водный мост – это диковинка столетней давности, Эльмар Фукс и его коллеги придумали современную реализацию, которая вызвала интерес во всем мире.

Демонстрация начинается с наполнения двух стаканов водой почти до краев, а затем стаканы ставят рядом, чтобы они соприкасались кромками. Электроды, погруженные в оба стакана, создают между стаканами разность потенциалов порядка 10 кВ. Сразу же вода в одном стакане перепрыгивает через край в другой стакан. Как только мост сформировался, можно медленно раздвинуть стаканы. Мост не разрушается; он продолжает удлиняться, заполняя зазор между стаканами, даже когда кромки удалены на несколько сантиметров (рис. 1.4).

Удивительно, но водный мост почти не провисает; он проявляет почти льдоподобную жесткость, хотя эксперимент проводится при комнатной температуре.

Я настоятельно прошу вас не поддаваться искушению повторить этот эксперимент с высоким напряжением, если только вы не считаете себя невосприимчивым к поражению электрическим током. Лучше посмотрите видео про это потрясающее явление [w1]. Вопрос: за счет чего держится мост из воды? (См. главу 17.)

1.2.3. Плавающая капелька воды

Вода должна мгновенно смешиваться с водой. Однако если выпускать капельки воды из тонкой трубки, расположенной чуть выше чашки с водой, они часто начинают плавать на поверхности воды в течение некоторого времени, пока не сольются с основной массой (рис. 1.5). Иногда капельки живут на поверхности до десятков секунд. Еще более парадоксально, что капелька не растворяется одновременно; она распадается на

вереницу уменьшающихся брызг [3]. Растворение капелек напоминает запрограммированный танец.

Плавающие капельки воды можно увидеть в природе, если вы знаете, где искать. Хорошее время – сразу после дождя, когда вода капает с выступа на лужу или с оснастки парусника на озеро под ним. Капли дождя иногда даже всплывают, когда они попадают прямо в лужу. Очевидный вопрос: если вода естественным образом смешивается с водой, то какая особенность воды может замедлить естественное слияние? (См. главы 13 и 16.)

1.2.4. Разряд лорда Кельвина

Наконец, на рис. 1.6 представлен еще один удивительный эксперимент. Вода, поступающая из перевернутой бутылки или обычного водопроводного крана, разделяется и протекает по двум трубкам. Капли падают с конца каждой трубки, пролетают сквозь металлические кольца и падают в металлические емкости. Кольца и емкости соединены между собой электрическими проводами, как показано на рисунке. К боковой стенке каждой емкости на проводящей стойке прикреплена металлическая сфера. Между сферами остается воздушный зазор в несколько миллиметров.

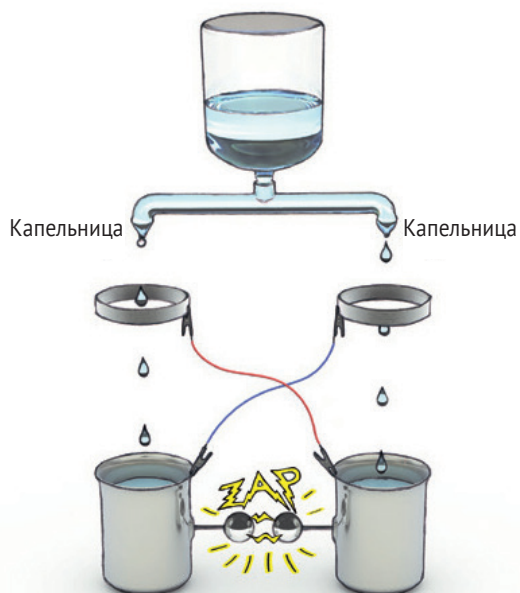


Рис. 1.6. Устройство капельницы Кельвина. Повышение уровня воды создает высоковольтный разряд. Почему это происходит?

Придуманый лордом Кельвином эксперимент дает удивительный результат. Как только капли начнут падать в емкости, вы услышите потрескивание. Затем, вскоре после этого, в зазоре между сферами проскакивает электрический разряд, сопровождаемый хорошо слышимым щелчком.

Электрический разряд может пробить воздушный зазор только в том случае, если между двумя емкостями возникает большая разность электрических потенциалов. Эта разность потенциалов может легко достигать 100 000 вольт, в зависимости от размера зазора. Тем не менее столь значительное разделение зарядов, необходимое для возникновения этой разности потенциалов, создается *из одного источника воды*.

Вы можете построить подобное экзотическое устройство в домашних условиях [w2], однако намного проще наблюдать за разрядом на видео. Прекрасный пример эксперимента представил профессор Волтер Левин (Walter Levin) [w3], который демонстрирует разряд перед аудиторией, наполненной восхищенными первокурсниками Массачусетского технологического института. Затем он предлагает студентам объяснить это явление как домашнее задание. Можете ли вы объяснить, как один источник воды может привести к такому огромному разделению зарядов? (Прочтите об этом в главе 15.)

1.3. Уроки, извлеченные из этих тайн

Явления, представленные в предыдущих разделах, не поддаются простому объяснению. Даже известные ученые в области воды, которых я знаю, не могут дать удовлетворительных ответов; большинство не может выйти за пределы самых поверхностных объяснений. В нашей системе знаний явно не хватает каких-то важных компонентов; в противном случае явления должны быть легко объяснимыми, но это не так.

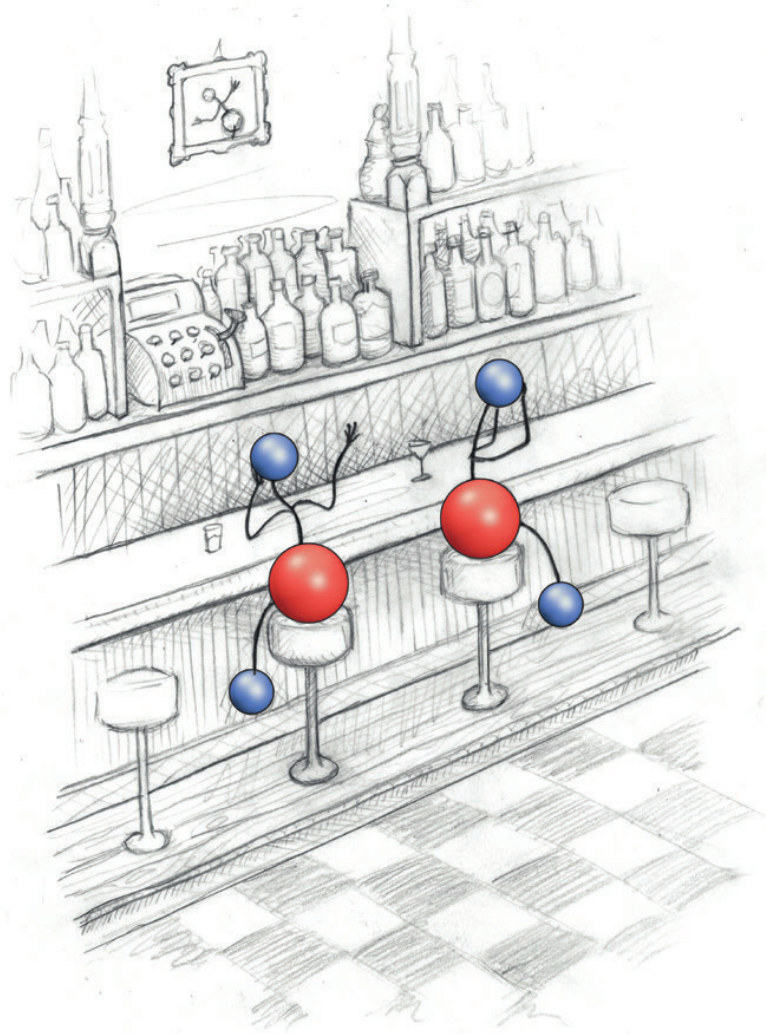
Я хочу еще раз подчеркнуть, что мы не имеем дело с водой на молекулярном уровне; мы имеем дело с толпами молекул воды. Мы все еще не понимаем взаимодействие молекул воды с другими молекулами воды – «социальное» поведение воды.

Социальное поведение является компетенцией социологов и врачей, у которых мы могли бы поучиться. Мой друг, психиатр, однажды сказал мне, что, чтобы понять поведение человека, вы должны сосредоточиться на чудаках и дураках. Их крайности в поведе-

нии, по мнению психиатра, дают ключ к пониманию более тонкого поведения остальной части населения. Те же самые аргументы применимы и здесь: в предыдущих случаях описываются некоторые ситуации, когда вода проявляет крайнее «социальное» поведение; эти ситуации дают подсказки для лучшего понимания более обычного поведения молекул воды.

Поэтому, вместо того чтобы отмахиваться от нашей неспособности объяснить описанные выше явления, мы используем их в качестве подсказок. Мы превращаем неведение в преимущество. Как только мы дойдем до середины книги, вы увидите много примеров этого подхода.

В следующей главе вы получите или освежите в памяти полезные базовые знания. В ней мы расскажем о том, что уже знаем о социальном поведении воды, а что нет, но уделим главное внимание удивительным причинам столь малых наших знаний о наиболее распространенном веществе Земли.



Глава 2

Социальное поведение воды

Вода – это главный компонент жизни, настолько важный, что отец современной биохимии Альберт Сент-Дьёрдьи однажды сказал: «Жизнь – это танец воды под мелодию твердых тел». Без этого танца не может быть жизни.

Учитывая значимость воды, вы можете предположить, что мы в XXI веке знаем почти все, что нужно знать о воде. В настоящее время у нас должны быть ответы на все вопросы. Тем не менее предыдущая глава доказала обратное и показала, как мало мы на самом деле знаем об этой знакомой и вездесущей субстанции.

Задумайтесь о словах Филиппа Болла (Philip Ball) по этому поводу. Болл является одним из ведущих популяризаторов науки нашего времени, автором книги «H₂O: Биография воды» и давним научным консультантом журнала Nature. Болл говорит так [1]: «Никто на самом деле не понимает воду. В этом стыдно признаться, но вещество, которое покрывает две трети нашей планеты, все еще остается загадкой. Хуже того, чем пристальнее мы смотрим на воду, тем больше накапливается вопросов: новые методы углубленного изучения молекулярного строения жидкой воды порождают все больше загадок».

Сама по себе молекула воды довольно хорошо изучена. Гей-Люссак и фон Гумбольдт определили ее состав чуть более двух веков назад; к настоящему времени известны тонкие детали ее строения. По сути, молекула воды состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода, расположенных в конфигурации, которую вы могли видеть в учебниках (рис. 2.1).

Мы все еще слишком мало знаем о том, как эта молекула взаимодействует с другими молекулами воды или молекулами других веществ. Ученые, далекие от тематики воды, редко поднимают вопросы такого рода. Большинству достаточно знать, что молекулы воды так или иначе связаны с другими молекулами воды. Только и всего. Например, биологи часто считают воду огромным молекулярным морем, которое

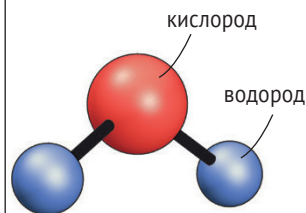


Рис. 2.1. Схематический рисунок молекулы воды

омывает важные молекулы жизни. Мы не задумываемся над тем, что молекулы воды всерьез взаимодействуют с чем-то еще.

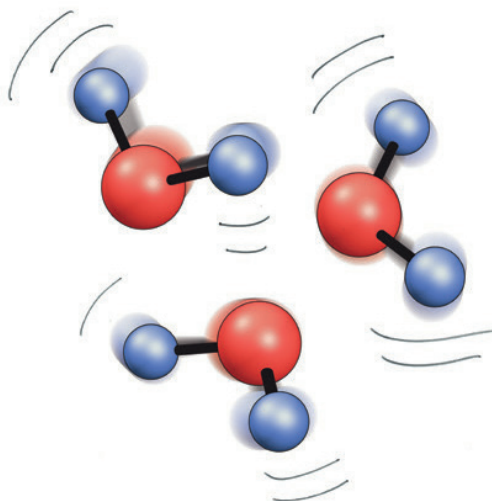
Но молекулы воды должны взаимодействовать. Подумайте о простой капле воды: по крайней мере, некоторые из миллиардов молекул воды, составляющих каплю, должны образовывать связи с другими молекулами, потому что без таких связей не может быть капли. Эти связи не могут быть статичными. Они должны изменяться, когда две капли объединяются или когда капля растекается по поверхности. Даже поведение маленькой капельки невозможно понять без понимания взаимодействия между молекулами воды.

Итак, вопрос в том, какова природа этих взаимодействий.

2.1. Что мы знаем о взаимодействии молекул воды?

Несмотря на то что в науке о воде присутствует мешанина идей, следующий список дает краткое описание недавних попыток объяснить поведение воды. Теории молекулярного взаимодействия вода-вода сложны, и даже учёные, изучающие воду, иногда с трудом понимают теории друг друга. Итак, я кратко изложу суть. Читателям, заинтересованным в более полном изложении, может быть полезно прочитать подробный обзор Филиппа Болла [2]. Здесь я просто обрисую, как семь видных научных групп представляют взаимодействие молекул воды друг с другом (рис. 2.2).

Рис. 2.2. Взаимодействие молекул воды. Природа взаимодействия не совсем понятна



Классический взгляд на взаимодействие вода–вода – модель «мерцающих кластеров», представленная Франком (Frank) и Веном (Wen) в 1957 году. В этой модели из соседних молекул воды образуются кластеры. Положительная обратная связь заставляет кластеры расти до критического размера и затем самопроизвольно рассеиваться. Все это происходит в цикле длительностью от 10^{-10} до 10^{-11} секунд; следовательно, кластеры «мерцают». Хотя эта модель устарела, она все еще встречается во многих учебниках.

Мартин Чаплин (Martin Chaplin) из Лондонского Саут Бэнк университета, Англия, предлагает модель с несколько более высоким уровнем организации. Чаплин предполагает, что жидкая вода состоит из двух типов сосуществующих друг с другом нанокластеров. Один тип является пустым, похожим на раковину и более или менее сжатым, в то время как другой более жесток и структурирован более регулярно. Молекулы воды быстро обмениваются между этими двумя фазами, но при заданном наборе условий среднее число молекул в каждой категории остается неизменным. Те, кто интересуется этой моделью, могут найти подробности и многое другое о воде на знаменитом информативном сайте Чаплина.

Совершенно иная картина складывается из работ Андерса Нильссона (Anders Nilsson) из Стэнфордского университета и Ларса Петтерсона (Lars Petterson) из Стокгольмского университета. Их модель также предусматривает два сосуществующих типа воды: льдоподобные сгустки или цепочки, содержащие до 100 молекул; и беспорядочные молекулы, окружающие эти скопления. Авторы предполагают существование своего рода неупорядоченного моря, в котором плавают кольца и цепочки атомов водорода и кислорода.

Модель Эмилио дель Джудиче (Emilio del Giudice) из Миланского университета характеризуется гораздо большим масштабом кластеризации. Основываясь на квантовой теории поля, дель Джудиче описывает субмикронные когерентные домены, каждый из которых может содержать много миллионов молекул воды. Связи между молекулами воды внутри этих доменов можно рассматривать как антенны, которые получают электромагнитную энергию извне. Обладая энергией, молекулы воды могут высвободить электроны, делая их доступными для химических реакций.

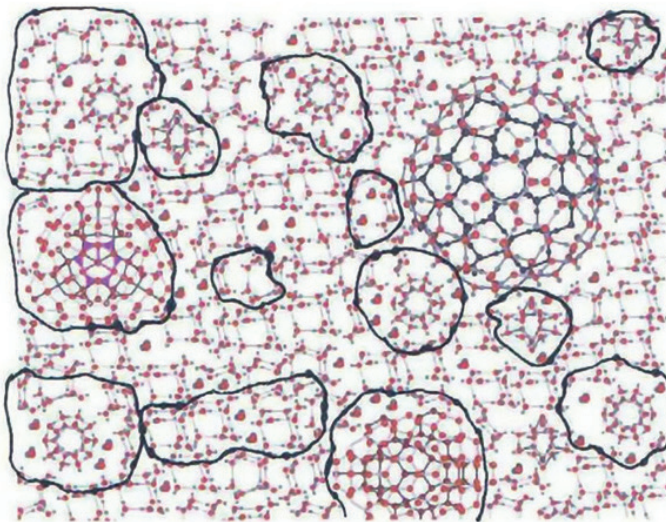
Популярная модель, основанная на ассоциациях, присутствующих во всем вышперечисленным моделям, пред-

ложена Юджином Стэнли (Eugene Stanley) из Бостонского университета. Стэнли предполагает, что вода имеет два различных состояния: с низкой плотностью и с высокой плотностью. Различие проявляется наиболее четко в переохлажденной воде. Вода с низкой плотностью имеет открытую тетраэдрическую структуру, а вода с высокой плотностью имеет более компактную структуру. Два состояния динамически переходят одно в другое.

Еще одна модель с двумя состояниями отмечает, что молекулы воды могут существовать в виде зеркальных изображений. То есть одна фракция молекул воды левосторонняя, а другая – правосторонняя. Основными приверженцами этой модели являются Сергей Першин из России, а также Меир Шиницкий (Meir Shinitzky) и Йоси Скольник (Yosi Scolnik) из Израиля. Они утверждают, что количественное соотношение этих двух видов влияет на различные особенности воды.

Наиболее сложная модель, предложенная покойным основоположником материаловедения Рустумом Роем (Rustum Roy), подчеркивает структурную неоднородность воды, а также простоту обмена молекулами воды между различными структурами [3]. На обмены расходуется очень мало энергии. На рис. 2.3 схематически показаны некоторые наиболее характерные структуры.

Рис. 2.3. Структура жидкой воды, предложенная Рустумом Роем и его коллегами. Кластеры выделены черным



Сейчас вы можете сказать, что и раньше достаточно много слышали о структурных моделях. Однако эта выборка лишь представляет большую группу моделей, которые постоянно обсуждаются и обновляются. Наше

понимание воды остается нерешенной проблемой, или, как говорит Болл, «загадкой».

С другой стороны, большинство из этих моделей имеют общую особенность: несколько состояний. Общепринятое мнение состоит в том, что жидкая вода имеет только одно состояние; но все эти модели теоретически предсказывают существование некоторого дополнительного состояния. Позже мы увидим конкретные доказательства устойчивого состояния воды, которое можно визуально обнаружить и наделить вполне определенными характеристиками.

2.2. ПОЧЕМУ МЫ ТАК ПЛОХО ЗНАЕМ ВОДУ

Вам может быть трудно поверить, но редкие ученые изучают воду. Большинство ученых, как и непрофессионалов, предполагают, что об этом вездесущем веществе уже давно все должно быть известно – так где же научная проблема? Лучше заниматься какой-нибудь модной областью, такой как молекулярная биология или нанотехнологии, а не погружаться в скучную воду.

Ученые избегают заниматься водой и по другой причине. Судя по всему, вода приобрела довольно мистический характер. Древние религиозные гуру были уверены, что вода наделена экзотической целительной силой. Вспомните, например, о «святой воде». Этот мистический оттенок делает исследование воды потенциально рискованным занятием: общество может воспринимать экзотические находки как мракобесие, а не достижение науки. Лучше избегать риска осуждения.

Несмотря на эти два препятствия, вода когда-то занимала центральное место в научных исследованиях. В первой половине XX века наука уделяла воде намного больше внимания, чем сейчас. Вместо того чтобы добавлять новые факты к узкой научной проблеме, ученые стремились раскрыть общие принципы, характеризующие природу. Целое казалось более важным, чем его молекулярные части. Это целое должно было включать воду, потому что вода была практически везде.

Это было также время, когда особое внимание ученых привлекали коллоиды, субмикроскопические частицы, взвешенные в жидкости. Полагая, что коллоидные растворы являются основой жизни, многие ученые ожидали, что знание механизмов взаимодействия коллоидов с водой поможет раскрыть основы химии жизни. Акцент на коллоиды в сочетании с це-

лостным подходом поставил воду в центр научных исследований.

Но к середине XX века два явления омрачили многообещающие перспективы изучения воды. Сначала наметился сдвиг в сторону специализации. Ученые увлеклись молекулярным подходом, который оттеснил воду на второй план. Молекулы вызывали горячий интерес. Казалось, чем больше вы понимаете молекулу, тем ближе подходите к научной истине. Исследования воды неизбежно стали старомодными и постепенно потеряли свое значение.

Второе, что заставило ученых отвернуться от воды, связано с двумя социально-политическими событиями, каждое из которых страшно затормозило прогресс в понимании воды.

Первый эпизод, так называемый «поливодный разгром», начался во время холодной войны, в конце 1960-х годов, с провокационного открытия советских ученых. Вода, заключенная в узкие капиллярные трубки, казалось бы, вела себя не так, как обычная вода: ее молекулы вибрировали по-другому; ее плотность была аномально высокой; и ее было трудно заморозить или заставить испариться. Понятно, что это была какая-то экзотическая разновидность воды. Подобные свойства подразумевали высокую стабильность, присущую многим полимерам, поэтому химики решили, что имеют дело с водой в полимерной форме, и придумали в конечном итоге роковой термин «поливода».

Открытие поливоды вызвало огромный интерес среди ученых – представьте, новая фаза воды! Но открытие также вызвало и скептицизм, и авторы открытия в конечном итоге сами опровергли результаты экспериментов, когда западные ученые нашли коварную проблему: примеси. Было показано, что предположительно чистая вода, расположенная внутри капилляров, на самом деле содержит соли и кремнезем, выщелоченные из стенок стеклянных трубок. Эти примеси, очевидно, и привели к появлению наблюдаемых экзотических свойств. Даже Борис Дерягин, легендарный физик-химик, выполнивший большинство основополагающих исследований, в конечном итоге публично признал наличие примесей. Поначалу скептицизм по отношению к поливоде оправдывали каламбуром, что научному сообществу «трудно проглотить» поливоду.

Спустя годы я хочу сказать о поливоде кое-что еще. Я хочу сказать, что «загрязняющие вещества» –

это проклятие, наложенное на все области науки. Ученый надеется на чистоту объекта исследования, но абсолютной чистоты очень трудно достичь. В случае воды достижение абсолютной чистоты практически невозможно, потому что вода имеет склонность поглощать все виды посторонних молекул; это природный растворитель практически для всего. В этом смысле наличие загрязнителей является естественным свойством воды, и их присутствие в ограниченных количествах не обязательно означает, что любое наблюдаемое явление необходимо безотчетно отбрасывать.

Однако ущерба для науки не удалось избежать. К началу 1970-х годов советских ученых обвинили в небрежно выполненных экспериментах. Шумиха вокруг этой проблемы вышла далеко за рамки научного спора, главным образом из-за сенсационных публикаций, когда средства массовой информации ухватились за эту историю. Только представьте, говорили журналисты: капля поливодды, попавшая в море, может сработать как обычный полимерный катализатор – эта единственная капля может полимеризовать весь запас воды на Земле в единую желеобразную массу, которая уничтожит жизнь. Опасная штука, что и говорить (рис. 2.4).

Поэтому общественность не обратила внимания на сообщения об ошибке, связанной с примесями. Другие, менее параноидально настроенные люди были разочарованы тем, что новое научное открытие оказалась не более чем болтовней о неудачных экспериментах. В любом случае, ученые, работающие в области воды, получили репутацию некомпетентных.

Последующее катастрофическое воздействие на все исследования воды не трудно представить. Если даже главный российский физикохимик так легко сбился с пути, как насчет обычных ученых? Риск утраты репутации оказался слишком высоким. Талантливые ученые, которые могли заниматься исследованиями воды, решили работать с более безопасными объектами, чтобы избежать любых проблем с примесями.

Таким образом – в основном из-за страха, – исследования воды фактически остановились. Лишь кучка несгибаемых храбрецов продолжала исследования, прежде всего в области биологической воды, но стимул к движению вперед был уничтожен. Неразгаданная тайна воды осталась дожидаться прихода других исследователей – когда-то в туманном будущем.



Рис. 2.4. Фантом поливодды

2.3. РАЗГРОМ «ПАМЯТИ ВОДЫ»

Два десятилетия спустя наука о воде показала первые признаки восстановления – пока не получила еще более сокрушительный удар: разгром так называемой «памяти воды». Здесь центральной фигурой был покойный французский ученый и известный иммунолог Жак Бенвенист (Jacques Benveniste). Почти случайно Бенвенист и его коллеги получили доказательства того, что вода может сохранять информацию, полученную от молекул, с которыми она взаимодействует. Вода, можно сказать, могла «запоминать».

Доказательства памяти воды были получены из экспериментов, включающих последовательные разведения биологически активных веществ. Возьмите такое вещество, растворенное в воде, и разбавьте раствор. Затем возьмите немного этого разбавленного раствора и снова разбавьте его; повторите этот процесс снова и снова. После того как вы разбавили раствор достаточно много раз, все, что у вас осталось, – это вода; по статистике, там не осталось ни одной молекулы исходного вещества. Бенвенист и его коллеги продолжили разбавлять раствор даже намного дальше той стадии, когда ничего не осталось, и все же обнаружили, что разбавленный раствор может оказать такое же биологическое воздействие, как и оригинал. Воздействие либо концентрированного исходного вещества, либо многократно разбавленного раствора на клетки может вызвать одинаковую молекулярную реакцию. Оказалось, что разбавленная вода сохранила «память» о молекулах, с которыми она контактировала, поскольку только эти молекулы были достаточно специфичны, чтобы инициировать наблюдаемый отклик.

Что за чушь, подумал редактор журнала Nature сэра Джон Мэддокс (John Maddox). Как вода может запоминать информацию? Но не все разделяли этот, казалось бы, очевидный скептицизм. Гомеопаты издавна используют аналогичную процедуру при подготовке своих лекарств, и некоторые члены гомеопатического сообщества обрадовались, что выдающийся ученый, наконец, подтвердил их метод. Бенвениста, с другой стороны, больше интересовала наука, чем гомеопатия. Реагируя на отказ журнала Nature опубликовать статью, Бенвенист попросил коллег в трех других лабораториях повторить его протоколы экспериментов, чтобы посмотреть, смогут ли они получить такие же результаты.

Примечательно, что им это удалось. И тогда Бенвенист повторно отправил отчет о результатах в Nature. Журнал снова ответил отказом. Очевидно, независимо от того, сколько лабораторий могло воспроизвести результат, результаты выглядели настолько невероятными, что в этой разбавленной воде явно скрывался какой-то экспериментальный подвох. Обжегшись в свое время на инциденте с поливодой, журнал Nature все еще испытывал опасения по поводу воды.

Во имя научной справедливости журнал, наконец, согласился опубликовать результаты, хотя и с одним условием: редактор оставил за собой право созвать комиссию для наблюдения за работой французских ученых во время проведения ими экспериментов; затем комиссия опубликует отчет для читателей Nature. Французская группа приняла условия. Вскоре статья французских ученых была опубликована в сопровождении редакторского примечания о скептическом отношении к результатам. Редактор подчеркнул, что он организует расследование: комиссия экспертов определит, чем действительно занимались эти французские ученые.

Комиссия экспертов была, по сути, комиссией сыщиков. Редактор Мэддокс возглавил ее и пригласил двух других членов. Первым был Уолтер Стюарт (Walter Stewart), который работал в Национальном институте здравоохранения США в специальном отделе, занятом борьбой с мошенничеством в науке. Стюарт был профессиональным сыщиком. Вторым был Джеймс Рэнди (James Randi), известный как «Удивительный Рэнди». Сценический маг мирового класса, Рэнди заработал свою славу, разоблачая уловки других магов, такие как утверждение Ури Геллера, что он может левитировать. Судя по составу этой комиссии «экспертов», было ясно, что Мэддокс подозревал не просто невинную ошибку.

Комиссия приехала в Париж, и ее члены внимательно следили за экспериментами. Первые эксперименты прошли почти так же, как и было заявлено, и французы, похоже, одержали победу в первых раундах. Но когда один из посетителей сам выполнил разведения, результаты оказались не настолько хорошими. Затем посетители посоветовались и быстро пришли к выводу, что, так как французы смогли добиться заявленного результата, а проверяющие – нет, значит, в этом деле замешан какой-то трюк. Природа трюка осталась неясной для профессиональных разо-

благителей. Тем не менее их доклад научному миру смело провозгласил, что память воды является «заблуждением».

Эта красочная история богата деталями, и для более глубокого ознакомления я рекомендую две книги. Первая – это вышеупомянутая книга Филиппа Болла [1], который в то время сотрудничал с Nature и был близок к Мэддоксу. Вторая книга под названием «Память воды» [4] была написана покойным физиком Мишелем Шиффом (Michel Schiff). Шифф работал во французской лаборатории во время этой истории. Как вы можете догадаться, у этих двух авторов весьма разные взгляды. Чтобы получить полную картину, вы должны прочитать обе книги.

В результате этого фиаско Бенвенист перенес глубочайшее унижение и крах научной карьеры, включая потерю грантовой поддержки, закрытие большой и продуктивной лаборатории, трудности с публикацией в дальнейшем каких-либо научных работ и в конечном итоге публичный позор – двукратное завоевание «Шнобелевской» премии, присуждаемой студентами Гарварда за самые нелепые исследования. Это было печальное время для французской науки (рис. 2.5).

Однако главное здесь не скандал и не мгновенная кончина выдающейся научной карьеры; главное – это влияние на исследования воды. Едва оправившись от скандала с поливодой, наука о воде получила этот второй, еще более сокрушительный удар. Память воды стала посмешищем всего научного сообщества. У вас проблема с запоминанием имен? Попробуйте пить больше воды. (Ха, ха!)

Зная эту бурную историю науки о воде, вы можете представить себе последствия. Сколько ученых в здравом уме осмелится войти в область, сначала дискредитированную поливодой, а затем ставшую мишенью для научных шуток? На самом деле очень немногие. И все же в этом есть некоторая ирония, поскольку одни ученые позже подтвердят результат Бенвениста [5], а другие, в том числе нобелевский лауреат Люк Монтанье, будут опираться на память воды, чтобы объяснить явление передачи информации, хранящейся в воде. Несмотря на все это, память воды остается скорее темой для шуток, чем предметом серьезных научных исследований.



Рис. 2.5. Позор французской науки?

2.4. ТАЙНА СОХРАНЯЕТСЯ

Я думаю, теперь вы можете разгадать парадокс, почему мы так мало знаем о чем-то столь знакомом. Два разгрома подряд превратили некогда динамичное поле в опасную область, в которую имеют смелость войти лишь немногие ученые.

Из пепла этих двух катастроф восстает сегодняшняя наука о воде. Состояние этой науки может быть лучше всего описано как раздвоение сознания. С одной стороны, ведущие ученые используют компьютерное моделирование и сложные технологии, чтобы больше узнать о молекулах воды и их ближайших соседях. Их результаты с большим или меньшим успехом формируют научный пейзаж в этой области. Применяя относительно безрисковые подходы, они постепенно совершенствуют и лакируют различные модели, представленные ранее в этой главе.

С другой стороны, есть ученые, которые исследуют более неоднозначные явления, такие как те, что описаны в предыдущей главе. Само упоминание об этих явлениях часто вызывает усмешку у признанных авторитетов, которые считают эти явления странными и недостаточно научными. Некоторые сторонники традиционных подходов предпочитают игнорировать эти явления как разновидность «сверхъестественной воды».

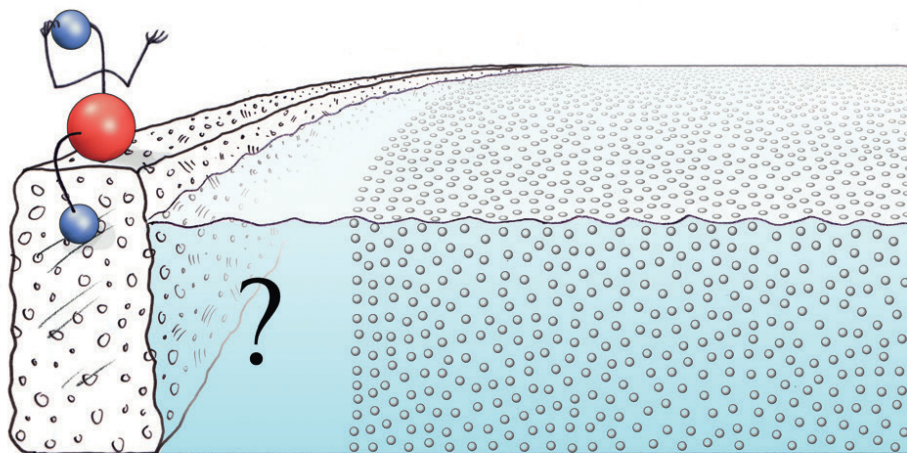
Эти две группировки редко соприкасаются. Любители странных свойств воды восхищаются научной изощренностью авторитетов, но часто находят их подходы запутанными и непроходимыми, как лесная чаща; следовательно, они держатся на расстоянии. Традиционисты, в свою очередь, избегают любителей водных странностей как чумы. Некоторые традиционисты нервно поеживаются от перспективы еще одного водного разгрома. Загадочные свойства воды, таким образом, остаются предметом маргинальной науки – относятся к той же категории, что и холодный ядерный синтез, НЛО и «тонкие энергии». Вам лучше держаться от них на расстоянии, если вы хотите сохранить свою научную респектабельность.

Учитывая эту атмосферу подозрения, нетрудно догадаться, почему понимание свойств воды стало проблемой. Проведение фундаментальных исследований воды – это что-то вроде поиска золотых самородков в грязи. Поиск может увенчаться успехом, но этот трудный процесс происходит в атмосфере недоверия, что лишает всякого смысла попытки заложить даже примитивный фундамент понимания.

* * *

Последующие главы обойдут стороной эту грязную, проторенную дорогу. Мы проложим совершенно новый путь, основанный на путеводных нитях, которые другие проигнорировали, и воспользуемся этим путем для достижения лучшего понимания природы воды. Мы придерживаемся мнения, что социальное поведение воды не должно быть настолько непостижимым, как мы это наблюдаем сейчас: если сама природа проста и интуитивна, как думают многие ученые, то мы надеемся, что ее самый вездесущий компонент может быть столь же простым и интуитивно понятным.

Именно это простое понимание мы стремимся раскрыть.



Глава 3

Загадка межфазной воды

В стакане вся вода выглядит одинаково. Пристальный взгляд сквозь стекло не дает намека на то, что молекулы в одной области могут располагаться иначе, чем молекулы в другой области. Ведь вода есть вода.

С другой стороны, внешность бывает обманчивой. Только за последнее десятилетие я узнал, что поверхность материала, из которого сделаны стенки сосуда, может оказывать настолько глубокое и сильное воздействие на близлежащие молекулы воды, что почти все свойства этой воды радикально меняются. Практически любая поверхность, которая соприкасается с водой, производит аналогичные эффекты, будь то емкость, взвешенные частицы или даже растворенные молекулы. Поверхности всех видов глубоко влияют на соседние молекулы воды.

Если бы я удосужился прочитать побольше статей, я бы намного раньше узнал про приповерхностные эффекты: в обзорной статье полувековой давности Хенникера (J.C. Henniker) [1] цитируется более ста опубликованных исследований, подтверждающих дальнodelствующее влияние поверхностей на многие жидкости, в том числе на воду. Доказательства были перед глазами.

Для меня, однако, это дальнodelствие стало открытием. Я знал, что поверхности влияют на воду, возможно, на десятки слоев молекул воды; я даже написал книгу о биологической значимости такой упорядоченной воды [2]. Тем не менее настолько дальнее воздействие, распространяющееся на тысячи или даже миллионы молекулярных слоев, выглядело потрясающе. Если это правда, столь сильное влияние неизбежно должно играть центральную роль во всех явлениях, связанных с водой.

Я расскажу, как мы впервые наткнулись на доказательства эффекта упорядочивания молекул воды на большом расстоянии от поверхности и что мы сделали, чтобы проверить обоснованность этих доказательств. Идея родилась во время случайной встречи на научной конференции.



Тошихиро Хираи,
Университет Синсю

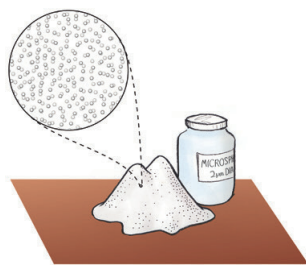


Рис. 3.1. Микросферы – обычные инструменты ученых

3.1. ОБЕД С ХИРАИ

В очень жаркий летний день в конце 1990-х, когда я шел из одного здания в другое, чтобы посетить семинар, мне посчастливилось встретиться с профессором Тошихиро Хираи (Toshihiro Hirai) из японского университета Синсю. Мы долго болтали. Я рассказал ему про книгу, которую я тогда писал, о роли воды в клеточных функциях («Клетки, гели и источники жизни»). Тема книги, очевидно, привлекла его внимание, поскольку, когда мы отправились на обед, чтобы спастись от жары, Хираи поведал мне о подходящем наблюдении, которое сделали его ученики, – которое в конечном итоге оказалось ключевым для понимания поведения воды.

Хираи и его ученики изучали кровотоки в сосудах. Вместо реальных сосудов они использовали цилиндрические туннели, проходящие через гели; вместо частиц крови они использовали суспензии микросфер (рис. 3.1). Иными словами, водные суспензии крошечных сфер, прокачиваемых через гелевые туннели, имитировали кровь, протекающую через сосуды. Исследователи могли отслеживать движение «крови», потому что гель был прозрачным; все, что им было нужно, – это простой микроскоп.

Хираи охотно поделился своими наблюдениями со мной. Меня впечатлили его модели кровотока, но что действительно привлекло мое внимание, так это его описание странного поведения микросфер. Он сказал мне, что подвижные микросферы избежали кольцевой зоны прямо внутри поверхности геля; они ограничивались центральным стволом туннеля (рис. 3.2). Хираи отметил, что он не обратил особого внимания на это явление, полагая, что это второстепенный эффект. Очевидно, он не подумал о возможном значении исключения частиц из приповерхностного слоя.

После этой встречи Хираи и я обменялись множеством электронных писем. Стараясь не выходить за границы вежливого японского общения, я пытался убедить Хираи опубликовать его выводы, так как надеялся процитировать их в своей следующей книге. Этому не суждено было случиться. Хираи справедливо потерял терпение из-за моих назойливых писем и, наконец, предложил включить меня в качестве соавтора любой предстоящей публикации, чтобы продолжать двигаться в своем собственном темпе.

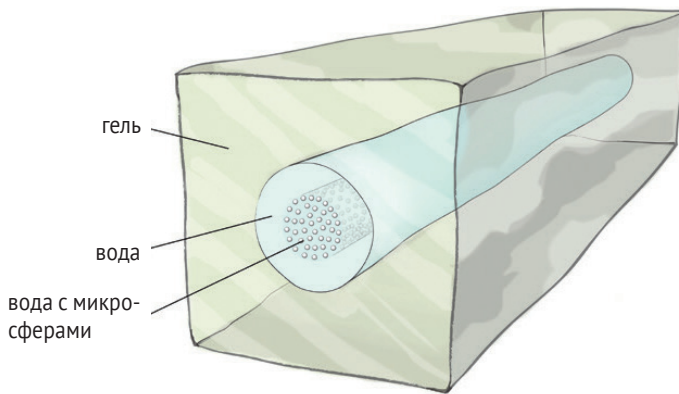


Рис. 3.2. Схематическое изображение зоны, свободной от микросфер, внутри гелевого туннеля

Насколько мне известно, наблюдения Хираи остаются неопубликованными. Однако по счастливой случайности его бывший научный сотрудник, работавший в докторантуре, переехал в Сиэтл и пришел в мою лабораторию в поисках работы. Я немедленно нанял Цзян-мин Чжэна (Jian-ming Zheng) (рис. 3.3), и мы приступили к изучению наблюдений Хираи.

У меня были основания подозревать, что склонность микросфер избегать зоны у поверхности геля может указывать на что-то важное. Я предположил, что поверхность геля могла бы упорядочить прилегающие молекулы воды; затем растущая упорядоченность будет выталкивать микросферы точно так же, как растущие кристаллы льда вытесняют взвешенные частицы. Эта гипотеза была нетрадиционной; тем не менее моя книга 2001 года содержала множество фактов, указывающих именно на это объяснение.

Однако самым удивительным аспектом наблюдений Хираи был масштаб. Зона, свободная от микросфер, простиралась примерно на одну десятую миллиметра от поверхности геля внутрь канала, подразумевая, что упорядоченная структура может включать сотни тысяч молекул воды. Это похоже на ряды мраморных плиток, простирающихся на несколько десятков футбольных полей. Даже будучи автором, отстаивающим идею упорядочения воды в клетке [2], я не мог поверить в эту колоссальную величину; расстояние казалось слишком большим.

Я был бы менее скептически настроен, если бы хорошо знал старую научную литературу. Опубликованная более шестидесяти лет назад и основанная на многочисленных публикациях обзорная статья, о которой я упоминал [1], содержит аналогичный вывод:



Рис. 3.3. Цзян-мин Чжэн

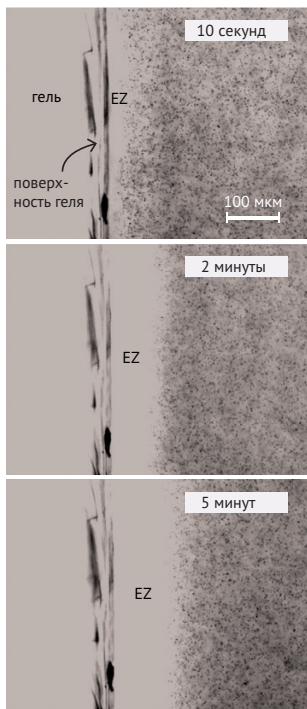


Рис. 3.4. Исключающая микросферы зона (EZ-зона) рядом с поверхностью геля. Зона увеличивается со временем и окончательно стабилизируется примерно через пять минут

поверхности оказывают далекодействующее влияние на прилегающие жидкости; они приводят к существенной реорганизации молекул. Не зная об этом, мы наивно продолжали изобретать велосипед.

Мы начали с более простых экспериментов, чем эксперименты Хираи. Мы поместили кусок геля того же типа в емкость и наполнили ее водной суспензией микросфер. Затем мы начали наблюдать за событиями в микроскоп. Как только жидкая суспензия встретилась с гелем, микросферы начали отходить от поверхности геля, оставляя зону без микросфер шириной чуть менее 100 мкм (0,1 мм). Вода оставалась в этой зоне, а микросферы – нет. После формирования зона оставалась устойчивой: даже после нескольких часов наблюдения микросферы отказывались в нее вторгаться. На рис. 3.4 показано развитие этой исключительной микросферы зоны.

Наши наблюдения показали, что зона, свободная от микросфер, которую обнаружил Хираи, возникла не из-за гидродинамики кровотока – в нашей установке не было потока, но мы получили аналогичную исключительную зону. Похоже, что-то на поверхности геля заставило микросферы поспешно отступить – как с потоком, так и без него. Оба сценария дали один и тот же результат: возникновение особой *исключающей зоны*, или EZ (exclusion zone), как мы ее назвали.

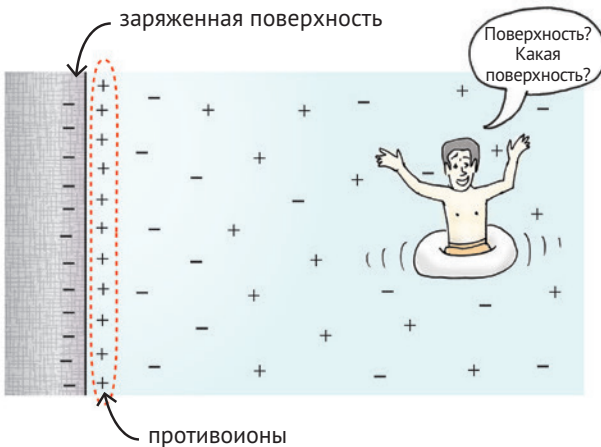
3.2. ПОИСК ОБЫЧНЫХ ПРИЧИН ИСКЛЮЧЕНИЯ

Явление исключения, кажется, идет вразрез с принципами современной химии. Феномен не должен существовать. Поверхности, безусловно, могут воздействовать на соседнюю жидкость, но широко распространено мнение, что воздействие не распространяется на жидкость за пределами нескольких молекулярных слоев (несмотря на доказательства, приведенные в обзорной статье Хенникера).

Почему же считается, что воздействие столь ограничено? Общепринятое мнение основано на теории «двойного слоя» электрических зарядов. Согласно ей, заряженная поверхность, помещенная в воду, будет притягивать противоположно заряженные ионы, растворенные в этой воде (рис. 3.5). За этим ионным слоем находится второй слой противоположной полярности, который диффузно распространяется в жидкость. А за этим двойным слоем должны лежать дополнительные

диффузные заряды и т. д. В конечном итоге все заряды нейтрализуют друг друга. Для наблюдателя, расположенного за этими нейтрализованными слоями, поверхность должна быть незаметной – как если бы она отсутствовала.

Это минимальное расстояние, на котором пропадает поверхностный эффект, называется *дебаевский радиус экранирования* – по имени голландского физика Питера Дебая (Peter Debye). Значение дебаевского радиуса отражает протяженность облаков из противоположных зарядов. Хотя точное значение зависит от многих факторов, типичные значения находятся в нанометровом (10^{-9} м) диапазоне. В соответствии с теорией за пределами этих нескольких нанометров любое растворенное вещество или частица, находящиеся в жидкости, должны быть нечувствительны к присутствию материальной поверхности.



Однако это не то, что мы наблюдали (рис. 3.4). Частицы были заметно восприимчивы к присутствию поверхности материала – они отталкивались от поверхности на расстояние примерно в 100 000 раз больше дебаевского радиуса.

Это наблюдение порождает проблему, потому что дебаевский радиус и теория двойного слоя являются фундаментальными понятиями химии поверхности. Чтобы бросить вызов этой теории, обладая опровергающим экспериментальным наблюдением, мы должны быть абсолютно уверены, что в его основе не лежит тривиальное объяснение и никакой артефакт («ошибка» на научном жаргоне) не мог исказить наши результаты.

Рис. 3.5. Стандартная теория двойного слоя. Считается, что заряженная поверхность (слева) притягивает ионы противоположной полярности, как показано на рисунке. Эти противоположные заряды затем притягивают диффузное облако противоположных зарядов и т. д. Наблюдатель, сидящий в воде на расстоянии, достаточно удаленном от границы раздела сред, не должен замечать нейтрализованную поверхность

3.3. СУЩЕСТВУЕТ ЛИ ТРИВИАЛЬНОЕ ОБЪЯСНЕНИЕ?

Мы с Чжэном потратили целый год на поиски каждой мыслимой ошибки [3, 4]. Мы услышали много предположений от коллег, которые не стеснялись предлагать артефакты, способные скрываться под маской очевидности. Из многих рассмотренных нами возможных тривиальных объяснений четыре казались особенно вероятными.

- Первое связано с конвекционным потоком, который может возникнуть из-за небольшой разности температур в разных регионах. Такие температурные градиенты могут создавать завихрения жидкости, способные оттягивать микросферы от поверхности. Во многих экспериментах мы наблюдали конвекционные потоки; в других экспериментах, однако, поток вообще отсутствовал, и все же исключающая зона сохранялась. Мы пришли к выводу, что конвекционные потоки не могут дать общего объяснения наблюдаемым зонам исключения.
- Вторым объяснением был возможный эффект полимерной кисти. Гели изготовлены из полимеров (длинные молекулы, состоящие из повторяющихся структурных единиц), чьи пряди могут выступать за пределы самого геля в окружающий раствор – как щетинки кисти. Редкие, тонкие щетинки могут отталкивать микросферы, оставаясь невидимыми в микроскоп. Тем не менее перемещение сверхчувствительного нанозонда параллельно поверхности геля не выявило никаких свидетельств наличия таких щетинок. Версия о невидимой щетине казалась несостоятельной.

Последующие эксперименты подтвердили этот вывод. В одном из этих экспериментов мы использовали самоорганизующиеся монослои, то есть одиночные молекулярные слои, с пришитыми к ним заряженными группами. У монослоев нет выступающих полимеров. Тем не менее они могут создавать исключающие зоны достаточных размеров [4]. Мы также обнаружили существенные исключающие зоны рядом с некоторыми кремниевыми пластинами *n*-типа, а также рядом с металлическими поверхностями [5], которые, опять же, не содержат выступа-

ющих щетинок. Пример такого исключения показан на рис. 3.6.

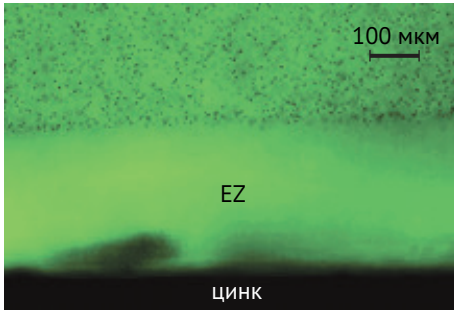


Рис. 3.6. Зона исключения рядом с цинком, фото из [5]. Зеленый цвет получается из-за использования зеленого фильтра в микроскопе

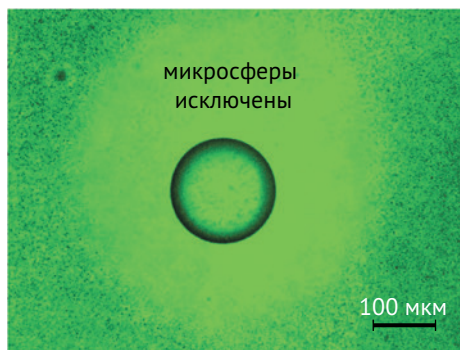
- Третье тривиальное объяснение исключения микросфер заключалось в электростатическом отталкивании на большие расстояния. Если и поверхность материала, и микросферы заряжены отрицательно, то эти два объекта должны отталкиваться. Достаточно сильное отталкивание должно отогнать микросферы, образуя исключаящую зону. Мы рассмотрели эту гипотезу, даже несмотря на то, что теория двойного слоя предсказывает, что любое такое отталкивание должно исчезать при расстояниях более нескольких нанометров, на расстоянии примерно в 100 000 раз меньше, чем мы регулярно наблюдаем.

Самой простой проверкой гипотезы отталкивания послужила замена отрицательных микросфер положительными. Согласно электростатической гипотезе, положительные микросферы должны притягиваться к отрицательно заряженной поверхности. Мы обнаружили, что положительно заряженные микросферы иногда преодолевали исключаящую зону; в других случаях исключаящая зона не только сохранялась, но и оставалась такой же, как при использовании отрицательных микросфер [3, 4].

Мы получили аналогичный результат, когда изменили заряд исключаящей поверхности. Для этих экспериментов мы использовали гелевые шарики – сферические тела, вокруг которых формируются оболочки из исключаящих зон, не содержащих отрицательно заряженные микросферы (рис. 3.7). Наличие на поверхности шариков положительно или отрицательно заряженных полимеров никак не влияло на ре-

Рис. 3.7. В оптический микроскоп видно, что микросферы покинули окрестности заряженного гелевого шарика. (Изображение окрашено из-за фильтра микроскопа.) Мы поместили шарик на стеклянную поверхность и добавили суспензию, содержащую микросферы. Постепенно исключая зона увеличилась до показанного на рисунке размера

зультат эксперимента [6]. Простое электростатическое отталкивание не может объяснить эти результаты.



- Четвертая версия связана с диффузией какого-то вещества из геля. Утечка загрязняющих веществ может, по-видимому, оттолкнуть микросферы, оставляя видимую исключаящую зону. Однако результаты эксперимента с монослоем противоречат этой гипотезе: одиночные молекулярные слои создали значительные зоны исключения [4], но они настолько тонкие, что из них практически ничего не может просочиться.

Мы также попробовали другой подход: смыть с поверхности любые возможные загрязняющие вещества, которые могут стекать с нее. Энергичный поток, параллельный отталкивающей поверхности, независимо от того, насколько он был быстр, не мог устранить исключаящую зону [7].

Наконец, мы смогли найти слишком обширные исключаящие зоны, чтобы их можно было объяснить утечкой материалов. Такие зоны были обнаружены в длинных, горизонтально ориентированных цилиндрических камерах. На одном конце цилиндрической камеры мы установили дискообразный гель, удерживаемый зажимами. Затем мы заполнили камеру суспензией микросфер и наблюдали за процессом роста исключаящей зоны. Как и ожидалось, возле поверхности геля возникла плоская исключаящая зона толщиной в несколько сотен микрометров. Но рост на этом не остановился (рис. 3.8); зона продолжала расти, образуя похожие на стержни выбросы. Иногда разветвляясь, эти стержневидные исключаящие зоны обычно простирались до самых концов метровых камер [8]. Очевидно, что рассеивание загрязнителя не могло объяснить эти сверхдлинные исключаящие зоны.

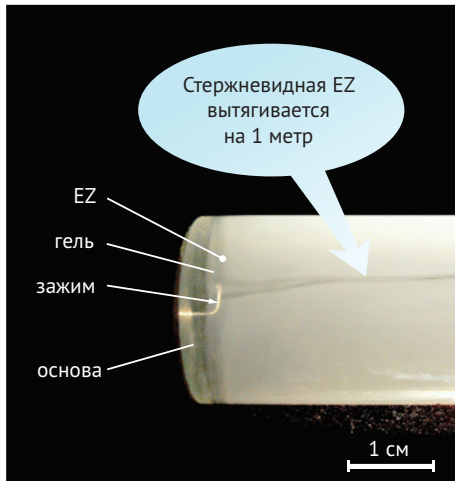


Рис. 3.8. Длинный выступ исключющей зоны. Дискообразный гель создает плоскую круглую зону, из которой вырастает длинный стержнеобразный выступ. Выступ может протянуться, как минимум, на один метр

Наши исследования, продолжавшиеся в течение целого года, вселили уверенность в том, что наблюдаемые зоны не возникают по тривиальным причинам. На момент написания этой книги несколько десятков лабораторий подтвердили существование исключющей зоны. Кроме того (и к нашей досаде), недавно найденная статья, опубликованная в 1970 году, описывает в основном те же результаты: зоны исключения микросфер толщиной в несколько сотен микрометров, расположенные рядом с поверхностями полимерного и биологического геля [9]. Следовательно, исключение микросфер не является случайностью. Происходит нечто неведомое, что отталкивает микросферы от поверхностей определенных материалов.

Хотя мы затратили немало энергии на эксперименты по поиску артефактов, они принесли неожиданную подсказку. Эти метровые исключющие зоны поразительно напоминали кристаллоподобные структуры, поскольку кристаллы легко растут до такой длины: вспомните о сосульке. Кристаллы также исключают частицы по мере своего роста. Возможность того, что исключаящая зона может быть каким-то кристаллоподобным материалом, заинтриговала нас.

Кристаллы обычно растут из центра кристаллизации, то есть с каких-либо поверхностей. Поэтому нам было важно определить, какие виды поверхностей образуют исключющие зоны.

3.4. НАСКОЛЬКО РАСПРОСТРАНЕННЫ ИСКЛЮЧАЮЩИЕ ЗОНЫ?

Сначала мы исследовали несколько гелей сверх упомянутых ранее. Все водосодержащие (гидро-) гели образовывали исключаяющие зоны, в том числе гели из биологических молекул и искусственных полимеров (рис. 3.9а). Мы также видели исключаяющие зоны рядом с естественными биологическими поверхностями; они включали сосудистый эндотелий (внутреннюю стенку кровеносных сосудов), отдельные участки корней растений и мышцы (рис. 3.9б). Я уже упоминал монослой (рис. 3.9в). Наблюдение за выраженными зонами исключения, прилегающими к одиночным молекулярным слоям, говорит нам, что толщина материала не имеет значения: можно было предположить, что создание исключаяющей зоны просто *требовало наличия молекулярной матрицы*.

Различные заряженные полимеры также создавали исключаяющие зоны. Особенно эффективным был нафийон (рис. 3.9г). Тefлоноподобная основа этого полимера содержит много отрицательно заряженных групп сульфоновой кислоты, что делает его одним из наиболее сильных продуцентов исключаяющей зоны. Благодаря устойчивости образуемой им исключаяющей зоны и простоте использования этот полимер часто упоминается на страницах книги.

Единственными экзотическими особенностями, с которыми мы столкнулись, были дефекты – локальные пятна на поверхности, лишенные исключаяющей зоны. Эти голые пятна были нетипичными. Однако мы регулярно находили их рядом с определенными металлами, а также рядом с полимерными мембранами, помещенными в разные растворы, как это было в наших экспериментах по осмосу (см. главу 11). Эти дефекты выглядели, скорее, как дыры, пронизывающие обычные исключаяющие зоны.

Упомянутые выше продуценты EZ относятся к категории гидрофильных, то есть любящих воду материалов. Их любовь к воде, похоже, настолько сильна, что исключает других поклонников; остается только вода. «Гидрофобные», или отталкивающие воду, поверхности, такие как тефлон, по контрасту не способны к этому и не образуют исключаяющей зоны. Судя по всему, явление исключения связано только с гидрофильными поверхностями.

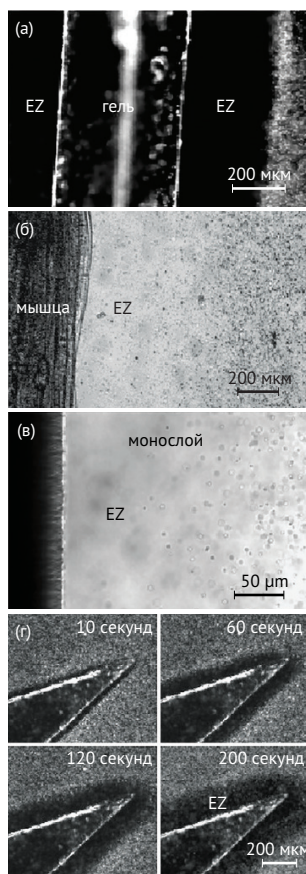


Рис. 3.9. Примеры зон, исключаяющих микросферу, в оптическом микроскопе: (а) гель полиакриловой кислоты; (б) мышцы; (в) самоорганизующийся монослой на золоте; (г) нафийон, последовательные моменты образования исключаяющей зоны

Установив распространенность исключаяющих зон, мы спросили: что вытесняют из себя исключаяющие зоны? Только микросферы? Или эффект исключения распространяется и на другие вещества?

Мы обнаружили множество исключаемых веществ, начиная от крупных взвешенных частиц и заканчивая небольшими частицами в растворе [3]. Исключению подвергались микросферы всех видов размером от 10 до 0,1 мкм, изготовленные из различных веществ. Исключались даже эритроциты, несколько штаммов бактерий и обычные частицы грязи, соскобленные за пределами нашей лаборатории. Исключению подвержен белок альбумин, равно как и различные красители с молекулярной массой до 100 дальтон – лишь немного больше, чем обычные молекулы соли. Диапазон размеров между самым большим и самым маленьким из исключенных веществ составил тысячу миллиардов раз (рис. 3.10).

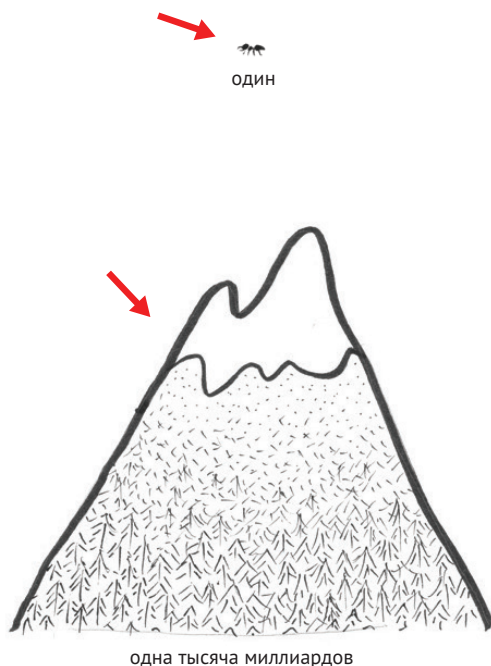


Рис. 3.10. Диапазон исключаемых веществ

Эти эксперименты показали, что исключаяющая зона выталкивает частицы разных размеров, от очень маленьких до очень больших.

Мы не могли полностью проверить воздействие на самые маленькие частицы в растворе – пришлось бы слишком долго ждать. Тем не менее мы можем сделать вывод, что исключение относится к явлениям обще-



Рис. 3.11. Альберт Сент-Дьёрдьи в его поздние годы



Рис. 3.12. Гилберт Линг в молодости

го порядка: почти любая гидрофильная поверхность может генерировать исключаящую зону, а та, в свою очередь, исключает почти все, что взвешено или растворено в воде.

3.5. ПОЧЕМУ ИСКЛЮЧАЮТСЯ РАСТВОРЕННЫЕ ВЕЩЕСТВА?

Наличие столь масштабной исключаящей силы еще раз указывало на то, что мы можем иметь дело с каким-то кристаллоподобным веществом, поскольку кристаллы массово исключают примеси. Ранее я упоминал о возможной кристаллической структуре исключаящей зоны: гидрофильная поверхность может побуждать соседние молекулы воды выстраиваться, как в жидком кристалле. По мере роста упорядоченной зоны она будет выталкивать растворенные вещества так же, как растущий ледник выталкивает камни.

Такое упорядочение молекул – отнюдь не новая идея. В ранее упомянутой статье Хенникера (1949) рассматриваются многие старые работы, описывающие массовое приповерхностное переупорядочение молекул. Статья Хенникера не была гласом одиночки в пустыне. Впоследствии идея упорядочения воды на больших расстояниях была выдвинута рядом выдающихся ученых, в том числе Уолтером Дрост-Хансеном (Walter Drost-Hansen), Джеймсом Клеггом (James Clegg) и особенно Альбертом Сент-Дьёрдьи и Гилбертом Лингом. Сент-Дьёрдьи (рис. 3.11) был плодотворным мыслителем, получившим Нобелевскую премию за открытие витамина С. Он придавал ключевое значение упорядочению воды на больших расстояниях, которое он считал главной опорой в здании жизни.

Так же думал и Гилберт Линг (рис. 3.12). Он подчеркнул центральную роль упорядочения воды в функции клеток, создавая тем самым основу для революционного подхода в биологии. Он написал пять книг на эту тему, последняя из которых – его монография² 2001 года *Life at the Cell and Below-Cell Level*. В этой книге утверждается, что заряженные поверхности клетки упорядочивают поблизости от себя молекулы воды,

² Русский перевод: *Гильберт Линг. Физическая теория живой клетки. Незамеченная революция.* СПб.: Наука, 2008. 375 с. – Прим. ред.

которая, в свою очередь, вытесняет большинство растворенных веществ. По словам Линга, именно это упорядочение является единственной причиной того, что большинство растворенных веществ встречаются внутри клетки в низких концентрациях: их исключает упорядоченная вода клетки.

На фоне принципов, провозглашенных этими выдающимися учеными, наша идея о том, что заряженные или гидрофильные поверхности могут упорядочивать молекулы воды на значительных расстояниях, казалась правдоподобной – мы нашли солидный экспериментальный прецедент. Было также ясно, что большинство современных химиков полагают, что такой порядок маловероятен, поскольку молекулы склонны к беспорядку. Тем не менее мы нуждались в объяснении исключаящего эффекта на больших расстояниях, и упорядочение воды казалось жизнеспособной версией. Поэтому наша лаборатория приступила к проверке этого предположения.

3.6. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВА ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТИ НА ПРИЛЕГАЮЩУЮ ВОДУ

Мы использовали различные методы, чтобы определить физическую природу исключаящей зоны. В каждом из экспериментов мы формировали исключаящую зону (всегда используя чистейшую воду); мы проверяли, отличается ли конкретное исследуемое свойство воды в исключаящей зоне от этого свойства воды за пределами зоны. Занимаясь этим, мы надеялись не только найти разницу, но и, если повезет, определить природу воды в исключаящей зоне. Дальше последуют довольно непростые технические выкладки, но я надеюсь, что вы пройдете вместе со мной через описание шести важных экспериментов.

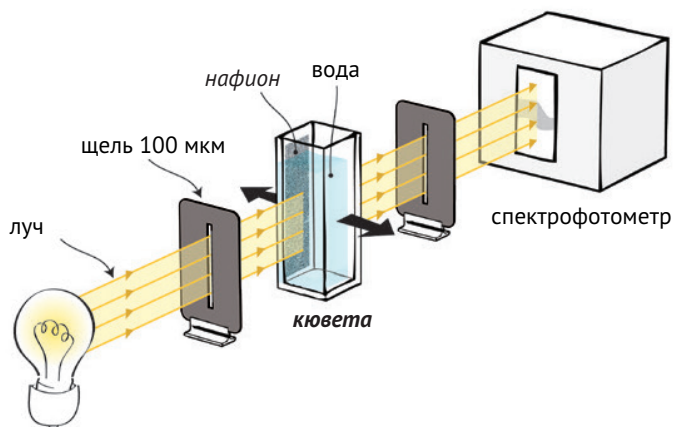
3.6.1. Поглощение света

Вещества отличаются друг от друга по особенностям поглощения света. Сравнивая поглощение веществом света разных длин волн («цветов»), мы узнаем, как вещество воспринимает электромагнитную энергию; это может сказать нам, как молекулы поступают с этой поглощенной энергией. По крайней мере, мы надея-

Рис. 3.13а. Измерение поглощения света. Перемещение кюветы поперек светового луча позволило нам исследовать воду на различных расстояниях от поверхности нафиона

лись увидеть, отличаются ли длины волн света, поглощаемого исключавшей зоной, от длин волн света, поглощаемого объемной водой за ее пределами.

Чтобы исследовать возможные различия, мы поставили эксперимент, показанный на рис. 3.13а.



Мы приклеили пластину нафиона к внутренней стенке стандартного оптического контейнера или кюветы, которую мы затем наполнили водой. Как

показано на рисунке, мы поместили кювету на пути щелевого источника света, луч которого проходит через воду и достигает спектрофотометра; перемещение кюветы с измеряемым шагом позволяет нам измерять интенсивность света, проходящего как сквозь исключавшую зону, так и за ее пределами.

На рис. 3.13б показаны результаты измерений. Вдали от границы раздела нафион–вода (за пределами 400 мкм) спектр был плоским – то есть здесь поглощение видимого и почти видимого света не отличалось от его поглощения чистым образцом воды без присутствия гидрофильной поверхности. Это было ожидаемо. Однако смещение кюветы в сторону гидрофильной поверхности так, чтобы луч света оказался ближе к границе раздела нафион–вода, вызвало появление сильного пика поглощения. Его длина волны составляла примерно 270 нм. Пик поглощения при 270 нм увеличивался с приближением

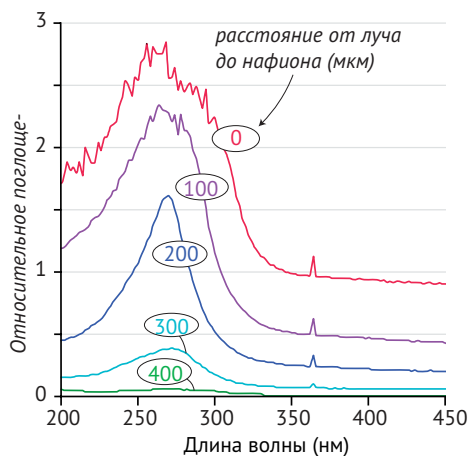
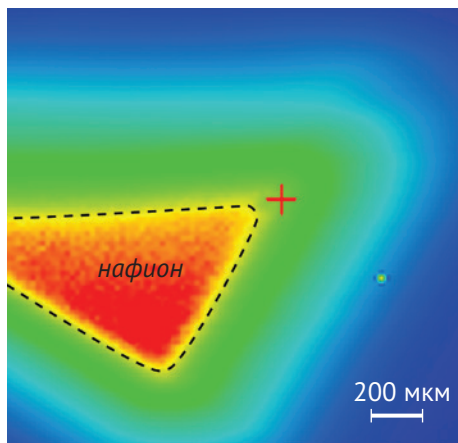


Рис. 3.13б. Измерение спектра поглощения на различных расстояниях от границы раздела нафион–вода. Уменьшающиеся расстояния варьируются от зеленого до красного. Числа у каждой кривой обозначают фактическое расстояние от луча до поверхности полимера

щелевого источника света к поверхности полимера и в конечном итоге доминировал в спектре поглощения. Поскольку в воде за пределами исключаяющей зоны такого пика не возникало, стало ясно, что спектральные характеристики исключаяющей зоны заметно отличаются от характеристик зоны объемной воды.

3.6.2. Поглощение инфракрасного излучения

Различия поглощающей способности также могут быть исследованы в инфракрасной области электромагнитного спектра. Эти более длинные волны говорят нам кое-что о молекулярной структуре. На рис. 3.14 показан один из результатов – карта поглощения инфракрасного излучения внутри и вокруг погруженного в воду треугольного куска нафiona. Разные цвета указывают на разные величины поглощения. Вдали от нафiona равномерный синий цвет указывает на равномерно низкий уровень поглощения. Изменение цвета при приближении к нафиону (зеленый) указывает на то, что поглощение исключаяющей зоны отличается от поглощения объемной воды.



Более детальная информация может быть получена при использовании более тонких образцов, но сначала эти образцы нужно как-то создать; следовательно, их применение может потребовать технических ухищрений. Тем не менее различия в поглощении, показанные на данном рисунке, указывают на то, что структура объемной воды отличается от структуры EZ-воды.

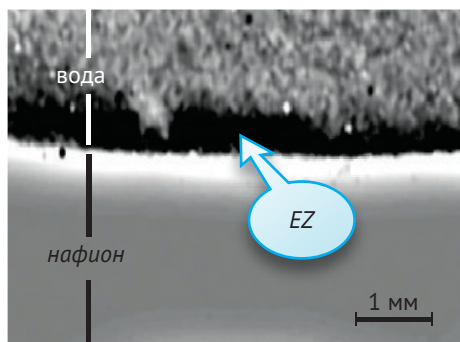
Рис. 3.14. Треугольный образец нафiona в воде исследуют с помощью измерения поглощения инфракрасного света. Разные цвета указывают на разное поглощение. Синий цвет соответствует самому низкому поглощению

3.6.3. Инфракрасное излучение

В нашем третьем эксперименте мы использовали инфракрасную камеру для измерения инфракрасного излучения («тепла»), испускаемого образцом. Если характер исключаяющей зоны отличается от характера объемной воды, то мы можем ожидать некоторую разницу в излучении.

Чтобы измерить излучение, мы поместили кусок нафiona в небольшую емкость с водой. Мы позволили образцу уравновесить температуру в течение одного часа. Затем мы измерили инфракрасное излучение от образца и усреднили излучение по нескольким кадрам изображения. На рис. 3.15 показан усредненный результат. Темная область, прилегающая к нафиону, является исключаяющей зоной; она темная, потому что очень мало излучает. Более отдаленные области воды излучают сильнее и выглядят ярче.

Рис. 3.15. Инфракрасное излучение на границе нафiona с водой. Образец уравнивали при комнатной температуре. Черная полоса, проходящая горизонтально по центру изображения, соответствует предполагаемому расположению исключаяющей зоны



Интерпретация результата требует некоторого понимания того, что определяет интенсивность инфракрасного излучения. Более горячие вещества испускают более сильное инфракрасное излучение – так сканеры тепловых изображений в аэропортах могут определить, есть ли у вас грипп и нужно ли вам находиться в карантине в течение недели, вместо того чтобы бездельничать на пляже. Температура, однако, не однозначно определяет интенсивность инфракрасного излучения: интенсивность вычисляется как произведение температуры и излучательной способности – второй параметр указывает на характер излучающей структуры. Упорядоченные кристаллоподобные структуры излучают меньше инфракрасной энергии, чем неупорядоченные структуры, потому что молекулярные компоненты кристалла движутся

менее энергично; эти компоненты более стабильны. Таким образом, испускание меньшего количества инфракрасной энергии может означать либо большую стабильность, либо более низкую температуру.

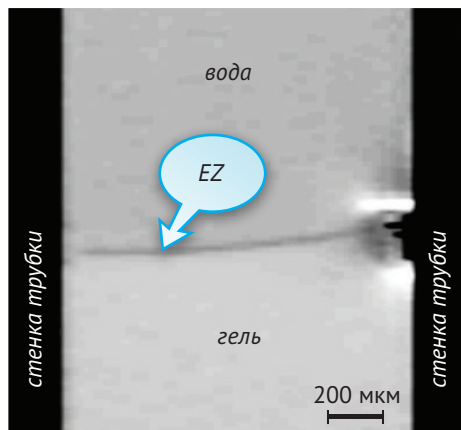
Более низкая температура не объясняет низкое инфракрасное излучение исключаемой зоны, показанное на рис. 3.15. Измерения были усреднены за длительные периоды времени в течение эксперимента, поэтому любая разница температур между исключаемой зоной и зоной объемной воды должна была исчезнуть. Более правдоподобным объяснением представляется различие в излучательной способности. Темная исключаемая зона подразумевает более низкую излучательную способность; то есть вода в исключаемой зоне является более упорядоченной и кристаллической, чем объемная вода.

3.6.4. Магнитно-резонансная томография

Магнитно-резонансная томография (МРТ) – это метод, используемый для визуализации опухолей. Реймонд Дамадьян (Raymond Damadian), автор изобретения, который запатентовал метод, основал свое изобретение на том принципе, что характер воды в разных средах различен; это позволяет выполнить пространственную визуализацию. В нашем эксперименте по МРТ мы поместили гель и прилегающую воду в тестируемую область. МРТ создает импульсное магнитное поле, которое возбуждает атомные ядра воды, чьи протоны затем релаксируют обратно в свои основные состояния. Время релаксации говорит о степени ограничения подвижности относительно соседних молекул. Затем на основе данных об ограничении подвижности компьютер МРТ воссоздает изображение.

На рис. 3.16 показана карта времен релаксации. Более темные области обозначают более короткое время релаксации, что означает большее ограничение подвижности. Карта показывает темную полосу посередине; эта полоса совпадает с шириной и расположением исключаемой зоны. По-видимому, подвижность молекул внутри EZ-зоны более ограничена, чем у молекул воды за пределами этой зоны.

Рис. 3.16. МРТ-карта времен релаксации. Нижняя половина капиллярной трубки была заполнена гелем из поливинилового спирта, а верхняя половина была заполнена водой. Темная полоса, соответствующая исключаяющей зоне геля, указывает на большее молекулярное ограничение



Этот вывод не уникален. Более раннее исследование об аналогичном ограничении подвижности, распространяющемся на еще большие расстояния от поверхностей материала [11], а затем и последующая публикация нашей лаборатории [12] указали, что вода вблизи поверхности демонстрирует «химический сдвиг», что является жаргоном для присутствия других химических форм. Метод магнитного резонанса выявляет существенные различия между EZ-водой и объемной водой.

3.6.5. Вязкость

Мы также измерили вязкость, которая отражает степень текучести. Мед, например, более вязкий, чем вода. Чтобы проверить, отличается ли вязкость исключаяющей зоны от вязкости объемной воды, мы использовали метод, называемый вискозиметрией с падающим шариком. Мы поместили на дно маленькой камеры пластинку нафiona и наполнили камеру водой. Затем мы бросали в воду шарики из полимерного материала. Шарики спускались с примерно постоянной скоростью, но постепенно замедлялись, когда входили в исключаящую зону (рис. 3.17). Снижение скорости подразумевает более высокую вязкость. Этот эксперимент продемонстрировал, что EZ-вода имеет более высокую вязкость, чем объемная вода.

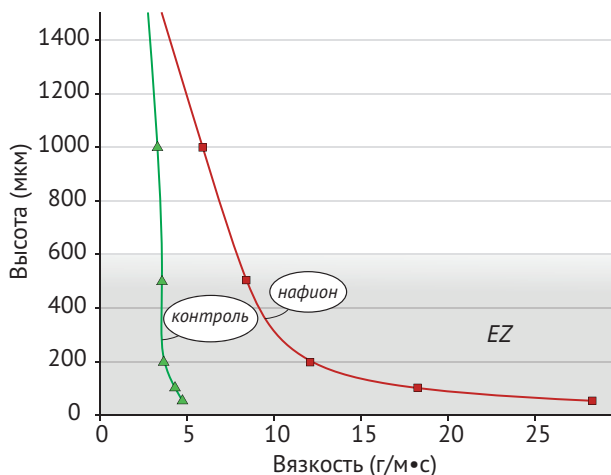


Рис. 3.17. Вязкий характер исключаяющей зоны (затемненная область). Мы измерили вязкость воды на различных высотах над поверхностью нафиеона (красная кривая). Контрольный результат (зеленая кривая) был получен с поверхностью, имеющей небольшую зону исключения или не имеющей ее

3.6.6. Оптические свойства

Две российские группы независимо друг от друга измеряли преломляющие (отклоняющие свет) свойства исключаяющей зоны [13, 14]. Обе группы обнаружили, что исключаяющая зона имеет показатель преломления примерно на 10 % выше, чем у объемной воды. Более высокий показатель преломления обычно подразумевает более высокую плотность; это говорит о том, что вода исключаяющей зоны более плотная, чем объемная вода.

Все шесть серий экспериментов – деталиные описания которых приведены в другом месте [4] – показывают, что *вода в исключаяющей зоне по своему характеру отличается от воды за ее пределами*. Различия очевидны. EZ-вода более вязкая и более стабильная, чем объемная вода; движения молекул в ней более ограничены; ее спектры поглощения света различаются в видимой и ультрафиолетовой областях, а также в инфракрасном диапазоне; и она имеет более высокий показатель преломления. Эти многочисленные различия подразумевают, что EZ-вода принципиально отличается от объемной воды. EZ-вода практически не похожа на жидкую воду.

3.7. УпорядочЕНИЕ ВОДЫ В ИСКЛЮЧАЮЩЕЙ ЗОНЕ

Нашей любимой гипотезой, объясняющей природу исключаяющей зоны, была упорядоченная вода. Результаты экспериментов, которые мы только что рассмотрели, не противоречат идее упорядоченной воды, но эти эксперименты не касались непосредственно вопроса ее структуры. Для этого нам нужны были другие виды доказательств.

У нас был хороший экспериментальный повод предполагать упорядоченность воды. Замечательная книга Мэй-ван Хо (Maе-wan Ho) «Радуга и червь» [15] уже предоставила доказательства существования дальней упорядоченности. Хо (рис. 3.18) использовала чувствительный поляризационный микроскоп. Поляризационная микроскопия является стандартным методом для выявления упорядоченных структур, особенно в минералах. Принцип прост: если молекулярные структуры выстраиваются в линию, то оптические свойства в направлении выстраивания будут отличаться от свойств в ортогональных направлениях, что приводит к так называемому двойному лучепреломлению. Хо демонстрирует вытянутые упорядоченные структуры, которые простираются на обширные области тела червя, и приходит к выводу, что в основе наблюдаемых структур прежде всего лежит упорядочение воды. На рис. 3.19 приведена иллюстрация из ее книги.

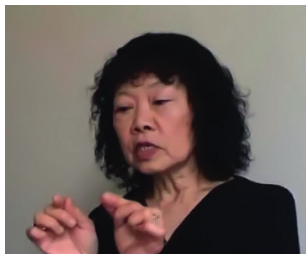
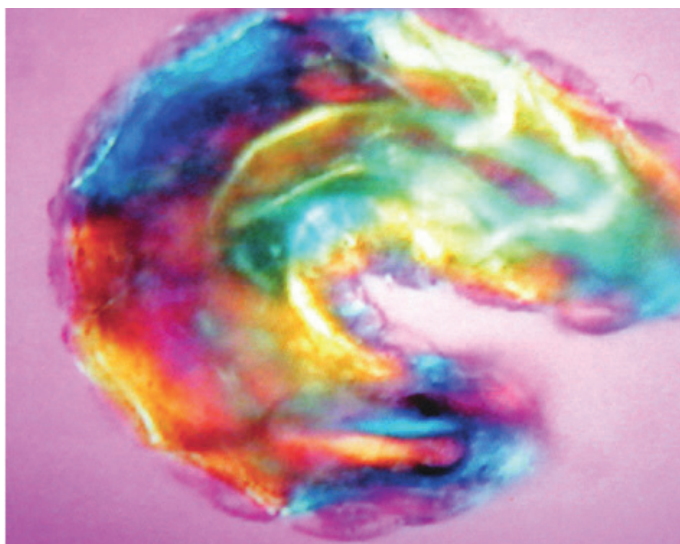
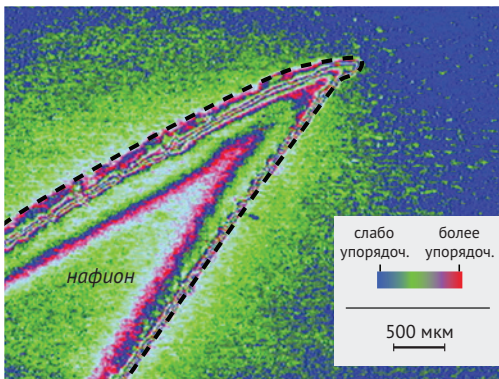


Рис. 3.18. Мэй-ван Хо

Рис. 3.19. Только что вылупившаяся личинка дрозофилы под поляризационным оптическим микроскопом идеально подходит для обнаружения жидкокристаллических фаз на основе интерференционной картины. Наличие областей одного цвета говорит о том, что по существу все молекулы, включая воду, упорядочены; конкретные цвета зависят от ориентации молекул упорядоченной структуры и степени их двойного лучепреломления. Для получения более подробной информации см. книгу Хо [15], стр. 219–221



Мотивированные работой Хо, мы создали нашу собственную систему поляризационной микроскопии, которую использовали для изучения упорядоченной воды вблизи нафиона. Некоторые эксперименты не показали явного наличия двойного лучепреломления, возможно, из-за недостаточной чувствительности; другие эксперименты дали положительные результаты, которые подтвердили наблюдения Хо. На рис. 3.20 вода вдали от границы раздела нафиона показана синим цветом, что указывает на отсутствие предпочтительной ориентации молекул. Ближе к границе сред зеленый цвет указывает на предпочтительную молекулярную ориентацию. Упорядоченная область соответствует исключаяющей зоне, непосредственно примыкающей к нафиону. Другими словами, вода в исключаяющей зоне более упорядочена, чем объемная вода, расположенная дальше.



Упорядоченная зона на рис. 3.20 огромна относительно размера молекулы воды. Вспомним размер молекулы воды – порядка от 0,25 до 0,3 нанометра (менее миллионной доли миллиметра). Упорядоченная зона на рис. 3.20 соответствует примерно миллиону таких молекул воды – как цепочка из мраморных плиток на десятках футбольных полей.

Теоретическая осуществимость такого дальнего упорядочивания рассматривается в двух работах. Первая статья написана покойным Рустумом Роем, пионером в области материаловедения. Рой и его коллеги [16] отметили, что определенные поверхности могут выступать в качестве шаблона, формируя из расплавленных материалов обширные кристаллические массивы. Обычно используемый с полупроводниковыми материалами, такими как кремний, этот процесс позволил создать современные интегральные схемы. Этот прием

Рис. 3.20. Кусок пластины нафиона в форме стрелки (очерченный пунктирной линией) в воде, исследованный с помощью поляризационной микроскопии. Синий цвет указывает на случайную ориентацию молекул; красный (см. шкалу справа) – на высшую степень молекулярного упорядочения

также используется при работе с расплавленным алюминием. Подобный процесс происходит при образовании обычного льда. Эти наблюдения заставили Роя и его коллег сделать вывод, что существует аналогичное упорядочение молекул воды на основе шаблонов. Они предположили, что это неизбежно.

Рассуждая с физико-химической точки зрения и по результатам многочисленных экспериментов, Линг [17] пришел к аналогичному выводу: дальнейшее упорядочение молекул воды зарождается на поверхности. В идеальных условиях такое упорядочение может распространяться на огромные расстояния. То есть склонность к порядку может легко перевесить естественную тенденцию к беспорядку.

Упомянутые статьи служат теоретическим объяснением упорядочения молекул, которое мы наблюдали. Они также опровергают общепринятое мнение о невозможности упорядочения молекул на больших расстояниях. С другой стороны, они оставляют без ответа некоторые вопросы. Ни экспериментальные данные, ни эти теоретические соображения не отвечают на вопросы: как именно упорядочиваются молекулы воды? Молекулы воды просто складываются в стопки? Или действует какой-то более сложный принцип реорганизации? Ответы на эти вопросы будут даны ниже.

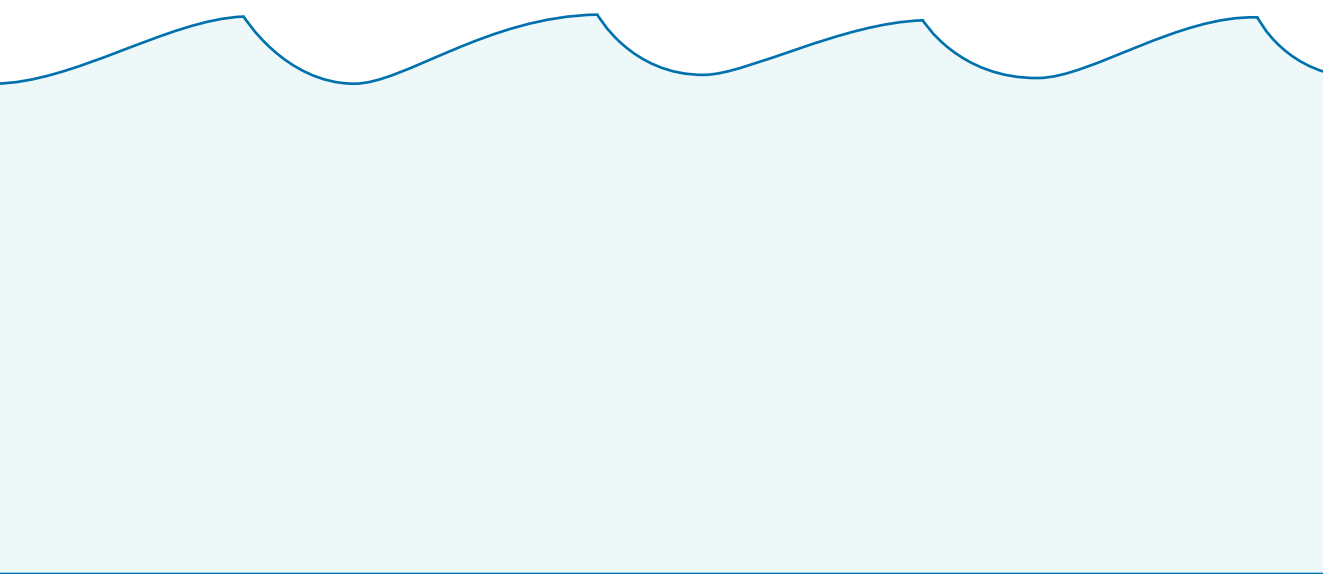
3.8. РАЗМЫШЛЕНИЯ

Я признаю, что люди, воспитанные на учебниках современной химии, найдут здесь не так уж много того, с чем они согласны. Учебники подразумевают нечто совершенно отличное от того, что мы обнаружили. Их акцент на теории двойного электрического слоя приводит к предположению, что рядом с заряженными поверхностями может быть упорядочено не более нескольких слоев молекул воды. Дальше этих нескольких слоев не должно происходить ничего, что заслуживает внимания.

С другой стороны, ученые начали признавать, что вода далеко не так проста, как принято думать. Многие связанные с водой явления – некоторые из них рассмотрены во вступлении к этой книге – не поддаются объяснению. Благодаря этим трудностям неожиданные особенности воды теперь рассматриваются более открыто; то есть начали появляться возможности для свежих и неожиданных открытий, одним из которых является упорядочение воды на больших расстояниях.

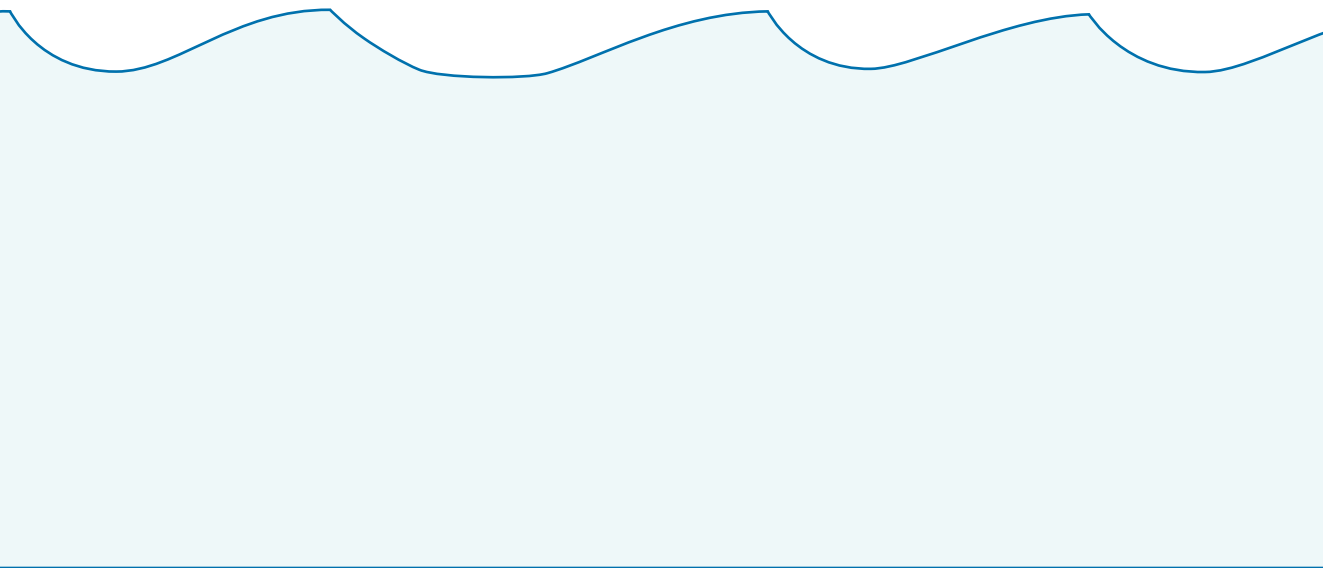
Основываясь на доказательствах дальнего порядка, в следующих главах мы раскроем структуру исключяющей зоны, удивительно похожей на лед. Однако это не лед. Сходное со льдом упорядочение оказывается лишь вершиной айсберга: что-то очень важное приводит к накоплению упорядоченной воды в исключяющей зоне. Эта движущая сила оказывается своего рода энергией, обычной для повседневной жизни и достаточно простой для понимания.

В предыдущих главах я говорил о том, что вода, которая соприкасается с различными поверхностями, отличается от объемной воды. Далее мы рассмотрим природу этого различия. Мы выясним структуру приповерхностной исключаяющей зоны и детально разберем ее свойства, которые могут рассказать нам много интересного.



РАЗДЕЛ II

Тайная жизнь воды





Глава 4 Четвертая фаза воды?

Будучи студентом-первокурсником, еще в незапамтном 1957 году, я стал свидетелем ажиотажа, вызванного запуском первого в мире космического спутника. Спутник был потрясающим достижением и выдающимся прорывом Советского Союза, который застал США врасплох – что выглядело весьма зловеще в напряженную эпоху холодной войны. Правительство Соединенных Штатов, вдохновленное советским подвигом, отреагировало на это огромным финансированием научных исследований и инженерных разработок. Спутник был конфузом, повторения которого правительство не могло допустить.

Но угроза нового конфуза вернулась буквально спустя десятилетие. На этот раз источник проблемы возник из предмета менее высокого, чем спутник: он пришел из науки о воде. Советские ученые снова нанесли удар, по-видимому, открыв новую фазу воды. Они поместили небольшое количество воды в тонкие капиллярные трубки и обнаружили, что свойства воды резко изменились. Вода больше не вела себя как жидкость; и при этом она не была твердой. В течение некоторого времени это выглядело как действительно новое фазовое состояние.

На уроках химии в начальной школе нас учили тому, что существует три фазовых состояния воды: твердое вещество, жидкость и газ. Советское открытие подразумевало наличие четвертой фазы – или, по крайней мере, нечто, явно отличающееся от трех других фаз. Вы помните результаты экспериментов, описанные в предыдущей главе: вода вблизи обычных гидрофильных поверхностей приобретает различные новые свойства – она становится более вязкой, стабильной и упорядоченной, чем объемная вода. Несмотря на то что это описание не полностью совпадает с тем, что заявили советские ученые, свойства EZ-воды выглядят достаточно похожими, чтобы предположить, что они нашли то же самое, что и мы.



Рис. 4.1. Борис Владимирович Дерягин, выдающийся советский и российский физикохимик

Мы начнем эту главу с обзора того, что на самом деле нашли русские, и международной интриги, которая окружала эту находку. Посмотрим, какие полезные истины можно извлечь из последующего разгрома. Затем мы сфокусируемся на исключаяющей зоне: является ли исключаяющая зона простой организованной стопкой молекул воды или она имеет какую-то другую кристаллическую структуру? И действительно ли эта структура представляет собой четвертую фазу воды?

4.1. Возвращаясь к спору о поливоде

Русская история началась, как упоминалось выше, когда малоизвестный ученый по имени Николай Федякин обнаружил, что при определенных условиях вода может стать неожиданно стабильной: ее трудно замораживать и не менее трудно испарять. Она также казалась более плотной и более вязкой, чем обычная вода. Воодушевленный этой необычной стабильностью, Федякин показал свои результаты самому выдающемуся физико-химику Советского Союза Борису Дерягину (рис. 4.1). Дерягин был настолько впечатлен, что немедленно сформировал исследовательскую группу для изучения нового явления.

Дерягин понимал, что капиллярные трубки – не единственные возможные материалы, взаимодействующие с водой. Все, что соприкасается с водой, создает границу сред – от стакана, в который налита питьевая вода, до белков, находящихся внутри клетки. Подобные граничные переходы создают «межфазную» воду со свойствами, потенциально такими же, как у воды, находящейся внутри капиллярных трубок. Иными словами, Дерягин понимал, насколько высоки ставки: разгадка причины этого явления может стать ключом к пониманию природы. Дерягин тщательно исследовал это явление. Чтобы гарантировать чистоту, используемой в его экспериментах воде сначала давали испариться, а затем конденсировали внутри тщательно очищенных стеклянных капилляров. Именно эта, казалось бы чистая, вода показала такую замечательную стабильность. Тем не менее сама проблема чистоты в конечном итоге привела Дерягина к неудаче.

Хотя работы Дерягина стали хорошо известны в советском научном сообществе к середине 1960-х годов, на Западе на них обратили внимание позже. Затем начались соответствующие исследования в США

и Великобритании. Вскоре весь научный мир заинтересовался этой особенной разновидностью воды.

Даже пресса обратила на это внимание. В связи с неизбежной тягой к сенсациям пресса напугала читателей, выдумав теорию, согласно которой порция этой необычной воды, добавленная в океан, может сработать как затравочный кристалл, полимеризуя всю воду Земли в сплошной массив и делая ее бесполезной для жизни. И поэтому мы все умрем.

На фоне такого рода писанины времен холодной войны общественность с облегчением узнала, что эта полимероподобная вода, или «поливода», оказалась следствием ошибочной трактовки экспериментов. Повторяя эксперименты, западные ученые обнаружили, что вода содержала следы силикатов, предположительно выщелоченных из стенок кварцевой капиллярной трубки. Следовательно, все дело в том, что вода была загрязнена. Хотя вряд ли можно утверждать, что вода в большом химическом стакане содержит значимые концентрации растворенного материала стенок, здесь ученые имели дело с чрезвычайно тонкими трубками с достаточно высоким отношением поверхности к объему, чтобы концентрация силикатов в воде могла превысить случайные значения; действительно, концентрация была выше порога обнаружения. Некоторое количество силиката, по-видимому, растворилось в воде, и, как только обнаружилось это загрязнение, лица советских ученых покрылись налетом уныния (или силиката?).

Позже другой западный ученый с радостью сообщил, что схожие явления можно наблюдать при добавлении соли в чистую воду. Иными словами, с равным успехом советские ученые могли исследовать пот, каплющий в воду в жаркий летний день. По всему миру прокатился гомерический хохот.

Сам Дерягин вбил последний гвоздь в гроб полимерной воды, наконец признав, что вода в его экспериментах действительно была загрязнена. Благодаря этому признанию общество могло успокоиться; мировым запасам воды не грозила опасность полимеризации. Дело закрыто. Разоблачение поливоды стало ответом Америки на запуск спутника. На этот раз объектом шуток оказались русские.

Хотя описание этого известного инцидента вошло в несколько книг, закулисная часть истории еще не раскрыта. Вот несколько важных моментов. Недавно, путешествуя по России, я имел удовольствие по-

беседовать с директором известного биофизического института, который дружил с Дерягиным. Они жили в соседних квартирах. Биофизик сказал мне, что они вдвоем наслаждались разговорами почти ежедневно, и заверил меня, что вплоть до момента своей смерти Дерягин был уверен, что загрязнение не имело решающего значения, несмотря на собственное опубликованное опровержение. Позже я услышал то же самое от другого выдающегося русского ученого, который был одним из последних протеже Дерягина. Публично Дерягин признал ошибку; в частной жизни он был уверен, что стоял на правильном пути.

Зачем ученому признавать грех, которого он не совершал? Гордое советское правительство, должно быть, испытало изрядное раздражение, когда одного из его ведущих ученых обвинили в научной небрежности. На Советский Союз легла тень позора. Вероятно, Дерягин, которого тоталитарный режим держал на коротком поводке, был просто вынужден отказаться от своих убеждений. Раскаяние перенесло вину с режима на человека. Виноват был Дерягин, а не Советы.

Совершенно очевидно, что политическое давление присутствовало и с другой стороны. Опасаясь советского господства после прорыва со спутником, западные ученые заняли оборону. Шутки о добавлении пота в воду, должно быть, утешили самолюбие ребят с Запада.

В своей книге *Polywater* [1] Феликс Фрэнкс (Felix Franks) рассказывает о событиях, связанных с этим знаменитым скандалом. Хотя Фрэнкс не ставит под сомнение подлинность опровержения Дерягина, между строк проглядывают закулисные махинации политических сил с обеих сторон, которые могли повлиять на ход событий. Этот политический подтекст оставляет у человека неприятное чувство неуверенности в том, что же было на самом деле (рис. 4.2).

Рис. 4.2. Призрак холодной войны



Мое собственное предположение заключается в том, что обе стороны были правы. За те годы, что я изучал воду, стало очевидно, что получить абсолютно чистую воду практически невозможно: независимо от принятых мер предосторожности неизбежно некоторое загрязнение, поскольку вода является универсальным растворителем, который растворяет практически все. Следовательно, вода Дерягина могла содержать следы силикатов и, возможно, также следы соли. Критики, возможно, были правы.

Но история становится интереснее, если взглянуть на нее с другой стороны. Что было поставлено под сомнение в экспериментах Дерягина, так это только вода, а не правильность наблюдений, сделанных с использованием этой воды. Давайте предположим, что вода Дерягина действительно была загрязнена. Тогда вопрос сводится к следующему: почему в присутствии загрязняющих веществ вода приобретает особенные свойства?

Дерягин, Федякин и даже многие западные ученые подробно описали эти особенные свойства во многих опубликованных работах. Почему бы не исследовать эти свойства? Хотя я не сторонник небрежных экспериментов, следовые загрязнения неизбежны и не означают автоматический отказ от дальнейших исследований. Зачем выплескивать ребенка с водой?

Исходя из этих соображений, давайте перейдем к изучению природы воды в исключаяющей зоне. EZ-вода располагается рядом с поверхностями, так же, как и поливода. Может быть, здесь кроется что-то большее, чем случайное сходство?

4.2. ВОЗМОЖНЫЕ СТРУКТУРЫ ВОДЫ У ПОВЕРХНОСТИ

Когда мы впервые обнаружили особую воду в исключаяющей зоне, многие подозревали, что это явление того же рода, что и поливода, – не в смысле структуры, а в том смысле, что она могла быть обнаружена в результате аналогичной экспериментальной погрешности. Один выдающийся физик-химик довольно прямо высказал мне свои сомнения, заявив, что все, к чему он действительно стремится, – это спасти нас от позорной участи участников скандала с поливодой.

В ответ мы добавили в воду примеси. Мы хотели посмотреть, способствуют ли загрязняющие вещества возникновению исключаяющей зоны так же, как это говорили про поливоду. Однако мы обнаружили об-

ратный эффект: практически все, что мы добавляли в воду, уменьшало размер зоны, а не увеличивало его. Самая большая исключаящая зона получалась при самой чистой воде.

Этот результат говорил о том, что мы имеем дело с одной из двух вещей: или вода в исключаяющей зоне не имеет ничего общего с поливодой, потому что она ведет себя противоположным образом, или EZ-вода не отличается от поливоды, и тогда нападки на поливоду объясняются исключительно неблагоприятными соображениями, выходящими за рамки науки. Во всяком случае, призрак поливоды не вызывал ни малейших сомнений в результатах нашей работы; мы чувствовали себя вправе исследовать воду исключаяющей зоны на своих собственных условиях.

Кстати, название «exclusion zone» (исключаяющая зона) придумал мой австралийский друг Джон Уоттерсон, который также предложил аббревиатуру «EZ». Теперь, когда мы знаем, что исключаяющая зона делает больше, чем просто исключает примеси, это название может показаться неидеальным. Тем не менее у него легкое и запоминающееся звучание, и термин, кажется, прижился. Поэтому сегодня мы продолжаем его использовать.

Центральным вопросом, с которым мы столкнулись, была молекулярная структура исключаяющей зоны. Мы предполагали, что она должна отличаться от объемной воды, поскольку EZ-вода была заметно более стабильной, вязкой и упорядоченной. Но что это за структура?

4.3. Многорядная укладка диполей воды

Сначала мы рассмотрели наиболее очевидный вариант: простой упорядоченный набор молекул воды, уложенных в стопку. Подобное укладывание возможно, потому что молекула воды представляет собой диполь: она содержит электроотрицательный атом кислорода на одном конце и два электроположительных атома водорода на другом конце (рис. 4.3). Из-за поляризации зарядов диполи, естественно, стремятся укладываться друг поверх друга; следовательно, нам казалась разумной версия, что упорядоченная структура EZ-воды представляет собой упакованные диполи. Эта модель показана на рис. 4.4.

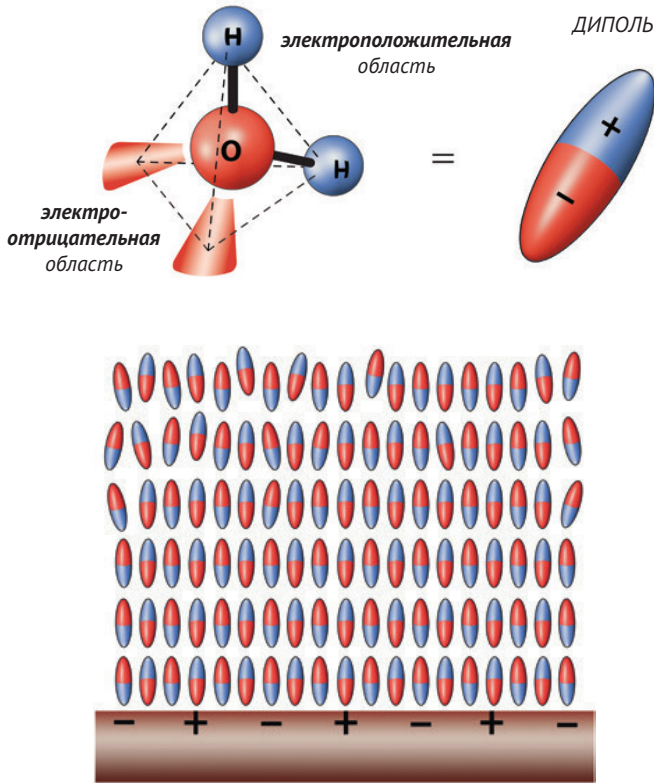


Рис. 4.3. Общепринятая модель строения молекулы воды (слева) с конусами электроотрицательности и областью положительного заряда, вместе образующими тетраэдр. Разделенные заряды обычно представляют в виде простого диполя (справа)

Рис. 4.4. Модель послойно упорядоченных диполей воды. С увеличением расстояния от поверхности может произойти некоторое нарушение порядка из-за теплового движения

Конфигурация в виде уложенных диполей может показаться очевидным решением нашей проблемы. Начиная с зародышевой поверхности, диполи воды будут укладываться один на другой, уходя все дальше и дальше от поверхности, пока разрушительные силы теплового (броуновского) движения не ограничат дальнейший упорядоченный рост. Существуют разные предположения о том, как далеко может расти такая упорядоченная кристаллическая структура. Большинство химиков утверждают, что на расстояние не более нескольких молекулярных слоев, в то время как другие считают, что их может быть практически неограниченное количество [2, 3].

Самым горячим сторонником модели упорядоченных послойно диполей был Гилберт Линг. Ученый мирового уровня Линг создал всеобъемлющую теорию клеточных процессов на основе модели упорядоченной воды, неявно подразумевая укладку диполей [4]. Его теория устройства клетки казалась мне и некоторым другим ученым настолько убедительной, что даже в сравнительно недавних работах [5] я не видел

причин ставить под сомнение ее основу – простую укладку молекул воды. Фактически это предположение представлялось мне единственно возможным.

Позже мы нашли повод для пересмотра своих взглядов. Хотя модель на основе упакованных диполей может быть справедливой при определенных обстоятельствах, более новые результаты говорят о том, что она представляет лишь частный случай. Эти результаты, которые мы подробно опишем ниже в данной главе, опираются на тот факт, что исключаящая зона обладает электрическим зарядом. Диполи являются в целом нейтральными; они не могут выстроиться таким образом, чтобы сформировать обширные зоны с зарядом, отличным от нейтрального.

Между тем, не зная о существовании заряда исключаящей зоны, мы приступили к оценке альтернативных вариантов структур, чтобы убедиться, что мы на правильном пути.

4.4. КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ ВОДА

Хороший способ сформировать предположения о структуре физического объекта – начать с поиска прецедента. Если примеси исключаются из упорядоченной воды, то было бы логично в первую очередь рассмотреть известные упорядоченные структуры. Возможно, подойдет какая-то одна из этих структур.

Наиболее очевидным кандидатом был лед. Он имеет хорошо упорядоченную структуру. Кроме того, лед исключает примеси: когда он растет, он выталкивает молекулы и частицы, создавая кристалл, в значительной степени свободный от примесей. Может ли структура льда дать подсказку о структуре исключаящей зоны?

Элементы структуры обычного льда представляют собой шестиугольники (рис. 4.5). Повторяющиеся элементы создают уже знакомый нам сотовый слой из кислорода и водорода. Протоны (рис. 4.5, внизу) связывают каждый слой с другими слоями, лежащими выше и ниже. Эти протоны связывают атомы кислорода, образуя жесткую структуру льда. В связях участвует только каждый второй атом кислорода; оставшиеся атомы кислорода, являющиеся электроотрицательными, отталкивают друг друга, создавая небольшие складки на каждом плоском слое.

Исключаящая зона, с другой стороны, не жесткая – она ведет себя как вязкая жидкость. Это означает, что структура льда не совсем точно моделирует структу-

ру исключаяющей зоны. Тем не менее внесение незначительных изменений в структуру льда позволяет получить возможную модель исключаяющей зоны. Правильная структура исключаяющей зоны должна обеспечивать определенную текучесть; жидкости обладают текучестью, когда составляющие структуру слои могут скользить друг относительно друга. Таким образом, структуру исключаяющей зоны может описывать модель, представляющая собой набор льдоподобных плоскостей, лишенных жестких межплоскостных протонных связей. Без связей слои могли бы скользить друг относительно друга, обеспечивая EZ-свойства вязкой жидкости. Такая модель выглядела многообещающе.

4.5. ПРОБЛЕМА С ЗАРЯДОМ

Затем у нас возникла проблема с зарядом. Лед электронеутрален. Переход от льда к льдоподобной модели со свободными протонами создал проблему: новая модель требовала, чтобы у исключаяющей зоны был отрицательный заряд.

В начале пути, еще не зная об отрицательном заряде исключаяющей зоны, мы решили отвергать любую модель, подразумевающую наличие заряда. В конце концов, исключаяющая зона может расширяться на расстояние до полумиллиметра от поверхности, и нам казалось невероятным найти столь обширную заряженную зону. Публикации о воде в подавляющем большинстве случаев придерживались мнения о ее нейтральном заряде, и упомянутая выше дипольная модель также подразумевала нулевой заряд; весь наш научный опыт уверенно говорил о том, что существование незаряженной области более вероятно, чем заряженной. Поэтому мы собирались опровергнуть льдоподобную модель или любую другую модель, обладающую ненулевым зарядом.

Для этого мы разработали простой эксперимент (рис. 4.6). Накопленный в нашей лаборатории опыт по измерению электрических потенциалов в живых клетках позволил уверенно провести аналогичный эксперимент с гелями и их окрестностями. Мы использовали микроэлектроды. Как следует из названия, у микроэлектродов очень тонкие кончики, что позволяет измерять разности потенциалов на микронных масштабах. Мы установили один микроэлектрод в отдалении в качестве опорного (эталонного) электрода. Механический привод постепенно смещал другой

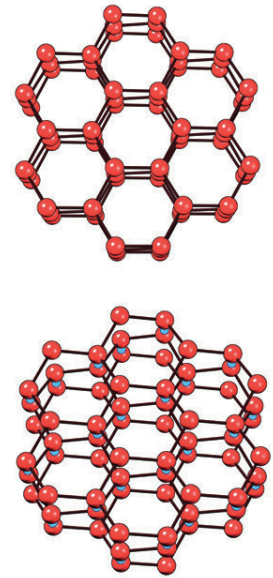
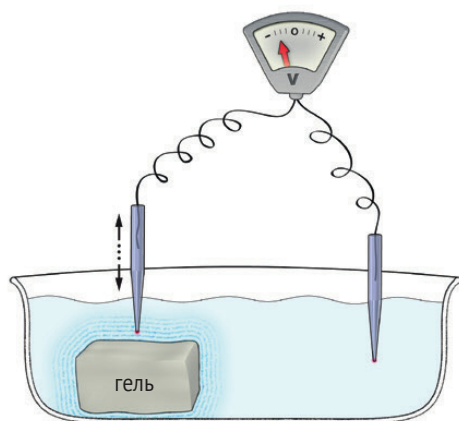


Рис. 4.5. Структурная модель обычного льда, показанная с двух разных точек зрения. Атомы кислорода красные. Атомы водорода (не показаны) лежат на полпути вдоль линий, соединяющих атомы кислорода. Межплоскостные протоны (синие, внизу) связывают каждый второй атом кислорода. Связи создают складки, благодаря которым пространственное расположение атомов больше похоже на тетраэдр, чем на плоскость

Рис. 4.6. Экспериментальная установка для измерения электрических свойств исключочающей зоны. Опорный электрод справа



микроэлектрод все ближе к поверхности геля, чтобы измерить приповерхностный электрический потенциал. Такой экспериментальный подход позволял определить, была ли заряжена исключочающая зона.

К нашему удивлению, мы обнаружили, что исключочающая зона на самом деле была заряжена – она имела отрицательный заряд.

На рис. 4.7а показан характерный результат. Когда подвижный электрод находился далеко за пределами исключочающей зоны (в объемной воде), мы обнаружили нулевую разность потенциалов. Это было ожидаемо. Когда электрод приблизился к границе раздела фаз, он начал сообщать о наличии отрицательного потенциала, величина которого возрастала с приближением к поверхности. Сразу за границей геля отрицательный потенциал 120 мВ оставался неизменным, даже когда электрод продолжал продвигаться внутрь геля. В следующем эксперименте мы заменили гель пластинкой нафiona. При использовании нафiona величина приповерхностного отрицательного потенциала возросла до 200 мВ (рис. 4.7б).

Для обоих образцов область отрицательных потенциалов простиралась довольно далеко от границы раздела сред: примерно до 200 мкм для геля и более 500 мкм для нафiona. Оказалось, что исключочающая зона несет отрицательные заряды.

Этот результат был совершенно не похож на ожидаемое нами отсутствие заряда. Вместо того чтобы отвергнуть льдоподобную модель, отрицательный заряд оказал ей поддержку. В то же время он опроверг дипольную модель; диполи не обладают собственным зарядом.

Казалось, мы добились успеха. Однако мои коллеги не побоялись выдвинуть альтернативное объяснение. Получив образование инженера-электрика, я должен был сразу подумать об этом; вместо этого моим ученикам пришлось напоминать мне, что отрицательный электрический потенциал может возникнуть из-за отрицательного поверхностного заряда: если бы поверхность материала имела заряд, то влияние этого заряда ощущалось бы на некотором расстоянии.

Следовательно, отрицательный потенциал внутри исключаяющей зоны не обязательно подразумевает наличие у нее собственного заряда. Ой!

Мне потребовалось несколько минут, чтобы вспомнить, что в воде все работает иначе. Поверхностные заряды не могут распространять свое влияние очень далеко, поскольку противоионы воды неизбежно будут притягиваться и нейтрализовать поверхностный заряд материала; на небольшом расстоянии вы обнаружите нулевой потенциал. Это явление не зависит от теории двойного слоя; неподвижные заряды поверхности *всегда* будут притягивать доступные противоположные заряды в жидкости. Таким образом, предположение моих коллег было бы применимо в вакууме, но не в жидкостях, таких как вода, где подвижные заряды быстро нейтрализуют любое влияние поверхностного заряда на больших расстояниях.

Тем не менее мы решили удостовериться в наличии отрицательного заряда внутри исключаяющей зоны. В одном из экспериментов мы попытались найти соответствующее скопление положительного заряда в другом месте. EZ-вода строится из нейтральной воды. Было бы глупо ожидать, что нейтральное вещество без последствий превратится в носитель отрицательного заряда; разумеется, если EZ-вода содержит отрицательный заряд, то где-то в другом месте должен находиться равный по величине положительный заряд.

Этот положительный заряд должен быть представлен в виде протонов, потому что они являются един-

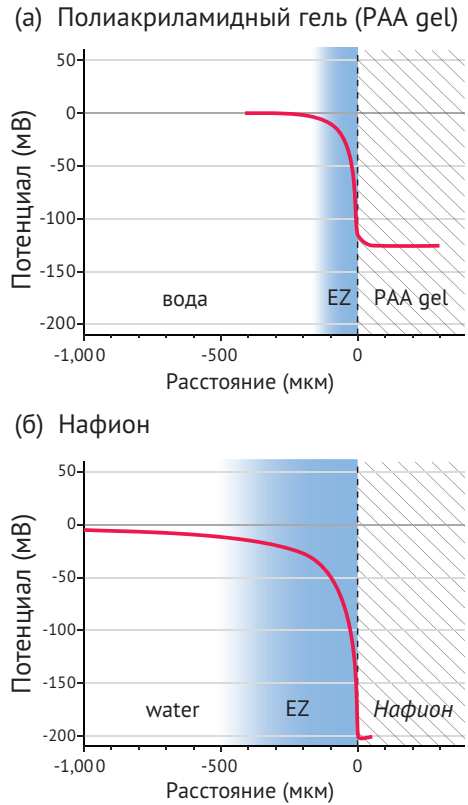


Рис. 4.7. Электрические потенциалы измеряли около геля на основе полиакриловой кислоты (а) и пластинки нафiona (б). Зона отрицательного заряда коррелирует с шириной исключаяющей зоны, которая зависит от материала

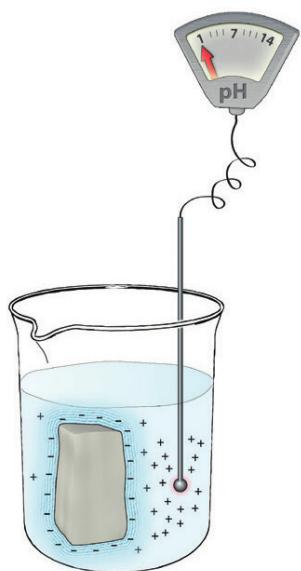


Рис. 4.8. Измерение pH воды рядом с погруженным гелем. Гель занимает заметную долю объема мензурки

ственными носителями положительного заряда воды. Если исключаящая зона несет суммарный отрицательный заряд, то мы должны найти зону, наполненную протонами, то есть зону с низким pH.

Как подробно описано в главе 5, мы обнаружили этот низкий pH, поместив большой кусок геля в мензурку с водой (рис. 4.8). Вокруг геля быстро возникла исключаящая зона. Датчик pH, помещенный в воду за пределами исключаяющей зоны, показал, что значения pH значительно упали, иногда до значений, равных 2 или даже 1. Величина падения была поразительной. Эти сверхнизкие значения pH указывали на то, что вода за пределами исключаяющей зоны содержала протоны в огромных концентрациях.

Обнаружение этих протонов подтвердило существование предполагаемой зоны положительного заряда; этот положительный заряд дополняет отрицательный заряд исключаяющей зоны. В целом масса воды казалась такой же нейтральной, как вода, изначально использованная для строительства исключаяющей зоны. По-видимому, по мере формирования исключаяющей зоны заряд воды разделяется на отрицательные и положительные составляющие. Нам удалось найти обе части.

Эта новость одновременно была и плохой, и хорошей. Это была плохая новость, потому что эксперимент показал, что слоистая дипольная модель Линга, которую я поддержал в моей книге 2001 года, была ошибочной; дипольные системы не обладают собственным зарядом. Я явно ошибся. С другой стороны, это была хорошая новость, потому что льдоподобная модель выглядела многообещающей: она описывала как отрицательный заряд исключаяющей зоны, так и ее полужидкую природу. Более того, модель имела предшественника – ее не вытащили из шляпы фокусника.

Вряд ли вы удивитесь, узнав, что кто-то другой предложил ту же модель десятилетиями раньше. В передовой статье 1969 года в авторитетном журнале Science Э. Р. Липпинкотт (E. R. Lippincott) и работающие с ним химики из Университета Мэриленда выдвинули гипотезу практически об аналогичной структуре – но для поливодоы. Предложенная ими структура изображена на рис. 4.9. Эта идея не получила дальнейшего развития. Из-за скандала с поливодоой, разразившегося всего через несколько месяцев после публикации статьи, никто не удосужился сколько-нибудь внимательно рассмотреть гипотезу. Любые попытки исследовать природу воды были вскоре прекращены.

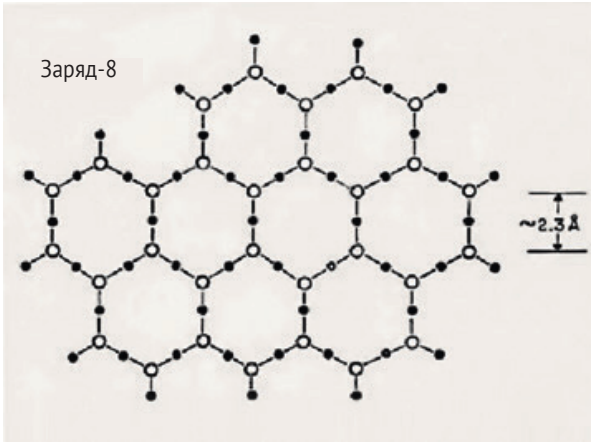


Рис. 4.9. Молекулярная структура поливоды, предложенная Липпинкоттом и его коллегами [6]. Молекулы кислорода обозначены открытыми кружками, водорода – сплошными. Слои укладываются один на другой, образуя объемную структуру

Теперь модель поливоды обрела новую жизнь, и мы хотели бы узнать о ней побольше. Что ученые успели выяснить до того, как скандал внезапно прекратил исследования в этой области?

4.6. ВОЗВРАЩЕНИЕ К ПОЛИВОДЕ

Аналогично рассмотренной ранее льдоподобной структуре, в модели поливоды фигурирует многослойная стопка сотовых слоев, состоящих из атомов водорода и кислорода. Авторы пророческой статьи в Science вывели эту структуру на основе широкого спектра накопленных физико-химических данных. Данные включали спектры комбинационного рассеяния, экстремальные точки замерзания и кипения и высокую плотность. Структура, изображенная на рис. 4.9, лучше всего соответствует экспериментальным данным.

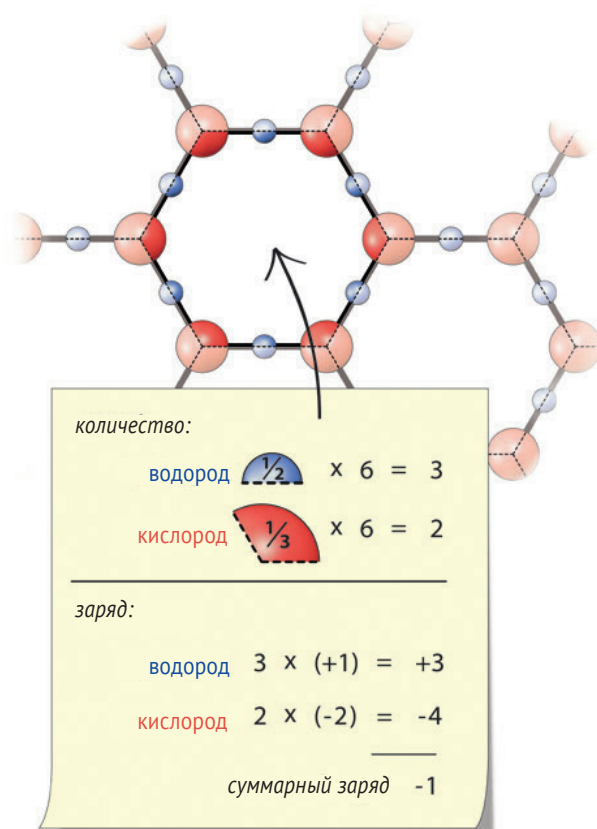
Я обратил особое внимание на несколько аспектов этой научной статьи. Во-первых, статья напомнила мне, что природа любит гексагональные структуры. В органической химии вы встретите их повсюду. Вы также найдете эту структуру в графите, где сотовые (графеновые) слои, из которых он состоит, могут легко скользить друг относительно друга, что обеспечивает низкое трение. Будучи столь распространенными, гексагональные слои кажутся естественным претендентом на построение модели.

Во-вторых, авторы вызывающе заявляют, что речь идет не о воде. Вещество, безусловно, состоит из кислорода и водорода, но их расположение в гексагональной решетке мало похоже на расположение в молекуле воды. Это новое вещество, утверждали они, «не должно рассматриваться как вода или даже называться водой,

так же как свойства полимера полиэтилена не могут быть напрямую связаны со свойствами газообразного этилена». Авторы считают очевидным, что этот объект химически отличается от воды.

Третьим свойством поливоды, которое заставило меня привстать на стуле от удивления, было соотношение атомов водорода и атомов кислорода. Как все знают, эти атомы в обычной воде присутствуют в соотношении 2:1. В слоистой структуре поливоды их соотношение составляет 3:2. Это свойство может показаться не очевидным, но на рис. 4.10 представлен упрощенный метод проверки соотношения.

Рис. 4.10. Расчет собственного заряда каждой гексагональной единицы. Чтобы подсчитать заряд, представьте каждый атом как разрезанный на куски пирога; затем подсчитайте все куски пирога, лежащие в данном шестиугольнике, помня, что заряд кислородного пирога – минус два, а водорода – плюс один. Результирующее отношение водорода к кислороду составляет 3:2, а собственный заряд шестиугольника равен -1



Эта нумерология имеет принципиальное значение, потому что знакомое соотношение 2:1 обеспечивает нейтральный заряд. Два электроположительных атома водорода нейтрализуют один электроотрицательный атом кислорода, поэтому молекула воды нейтральна. Сотовая структура, с другой стороны, имеет несбалансированное отношение, и в резуль-

тате получается отрицательный заряд -1 на каждый шестиугольник.

Авторы особо отметили это свойство в левом верхнем углу своей схемы (рис. 4.9), но они почти не обратили внимания на его потенциальное значение. Фактически они предполагали, что положительные заряды, оказавшиеся между отрицательно заряженными слоями, нейтрализуют большую часть заряда. Суть модели заключалась в том, что сами слои были заряжены отрицательно.

Модель воды Липпинкотта по сути не отличается от модели, представленной на страницах этой книги. Модель поливоды основана на строгих физико-химических выкладках, в то время как наша модель основана главным образом на предшественниках и логических выводах. Оба пути приводят к практически одинаковому результату: ячеистая структура с соотношением водорода и кислорода 3:2.

Это соотношение 3:2 нашло экспериментальное подтверждение. Сообщение в авторитетном физическом журнале вызвало переполох именно в связи с обнаружением этого соотношения: когда протоны и нейтроны отскакивали от молекул воды, характер рассеяния подразумевал формулу $H_{1,5}O$, а не H_2O [7], [W1]. Разумеется, соотношение 1,5:1 эквивалентно соотношению 3:2.

Ключевой особенностью обеих этих моделей является шестиугольное расположение атомов, что ставит вопрос о том, наблюдаются ли гексамерные (то есть шестиугольные) фигуры в экспериментах. Ответ – да. Исследователи обнаружили гексамеры воды рядом с различными поверхностями, включая металлы [8], белковые субъединицы [9], графен [10] и кварц [11]. Приповерхностные гексамеры также были обнаружены в переохлажденной воде [12]. А вода, адсорбированная на слюде, показала преобладание углов 120° , что было истолковано как свидетельство гексамерности [13]. Вода рядом со многими поверхностями, очевидно, образует гексамерные структуры, что согласуется с предложенной моделью.

Из доказательств, указывающих на гексамерность, заслуживают внимания результаты исследования капелек воды, заключенных в белковую оболочку [14]. Этим белком является субъединица АТФ-синтазы, древнего белка, повсеместно встречающегося в филогенезе. В сухих условиях этот белок образует инкапсулирующую оболочку вокруг воды, предотвращая испарение.

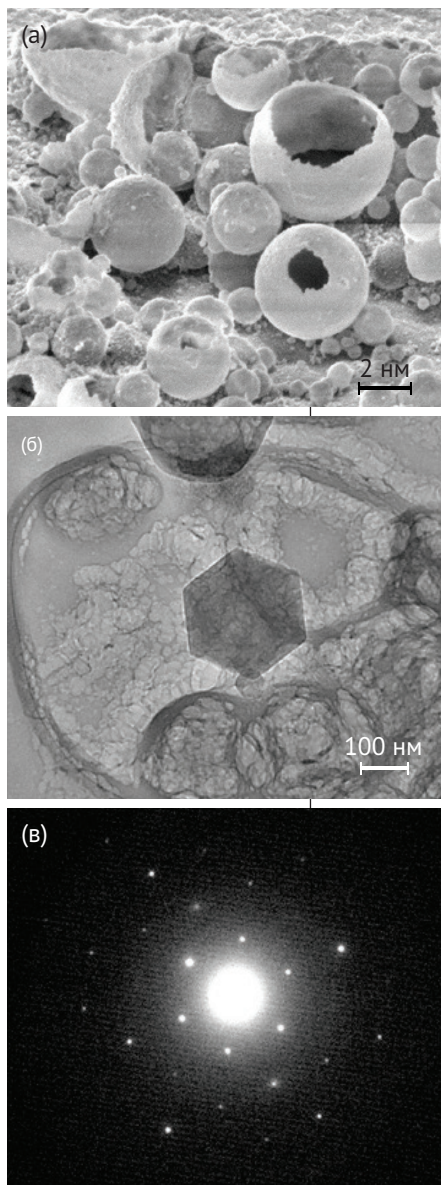


Рис. 4.11. Заключенная в белковые оболочки вода [14]. Инкапсуляция создает сферы (а), наблюдаемые в сканирующем электронном микроскопе, и геометрические фигуры (б), наблюдаемые в просвечивающем электронном микроскопе. Дифракционная картина (с), полученная из геометрической фигуры, показывает шестиугольную структуру

На рис. 4.11 показаны два примера таких заключенных в оболочки структур: сферические капсулы (а) и геометрические капсулы (б). Дифракционные картины, полученные из геометрических капсул, показывают, что замкнутая вода имеет шестиугольную структуру (с). Кроме того, расстояние между гексагональными единицами, равное 0,37 нм, близко к показанному на рис. 4.9. Таким образом, в значительных объемах воды вблизи поверхностей наблюдается гексагональная упорядоченность.

Еще одно ожидаемое свойство этих моделей – поглощение ультрафиолета. Когда электроны «делокализованы», то есть могут свободно перемещаться по структуре, можно ожидать характерное поглощение в районе длины волны 270 нм (УФ). Такая ситуация чаще всего возникает в ароматических (кольцевых) структурах, а также в так называемых краун-эфирах, кислородсодержащие гексагональные структуры которых аналогичны рассматриваемой структуре воды. Таким образом, экспериментально подтвержденное поглощение исключаяющей зоны при 270 нм (рис. 3.13) служит еще одним свидетельством в пользу гексагональной структуры.

Итак, ожидаемое поглощение ультрафиолета подтверждается, гексамеры обнаруживаются экспериментально, и два независимых набора соображений приводят по существу к одной и той же гексамерной модели. Эти факты побуждают нас к более обстоятельному исследованию модели. Давайте продолжим.

4.7. Укладка сотовых слоев

Чтобы удостовериться в объясняющей способности предлагаемой модели, мы должны сначала определить, как сотовые слои укладываются в исключаяющей зоне; в конце концов, EZ-зона – это трехмерный объект, а не один слой. Нам также необходимо понять, как возникает зародышевый слой. Давайте сначала разберемся, как укладываются слои.

Простейшая модель укладки помещает шестиугольники всех слоев в стопку. Вы можете посмотреть сверху вниз на стопку шестиугольников и увидеть их все до последнего.

Эта укладка привлекательна своей простотой – но невозможна. Чтобы понять, почему, посмотрите на верхнюю часть рис. 4.5, где показан пример слоев, уложенных в стопку. Предположим, вы удалите межплоскостные протоны (это показано на нижней части рисунка). Так получится рассматриваемая нами плоская стопка. Удаление протонного «клея» сопоставляет отрицательно заряженные атомы кислорода в одном слое с отрицательно заряженными атомами кислорода в соседнем слое. При этом возникнет огромное электростатическое отталкивание. Такая структура немедленно разлетится.

Более естественным способом сохранения структуры является планарный сдвиг слоев в пачке (рис. 4.12). Если отрицательные заряды одного слоя лежат напротив положительных зарядов другого слоя, то на эти слои может действовать электростатическое притяжение.

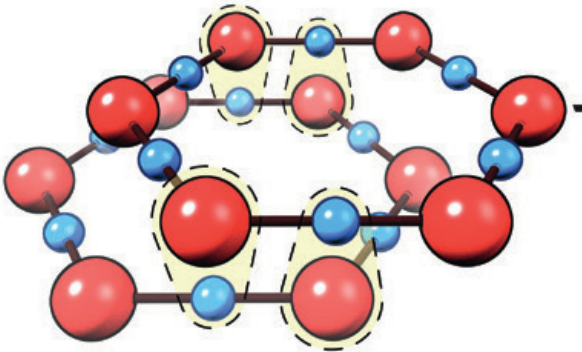
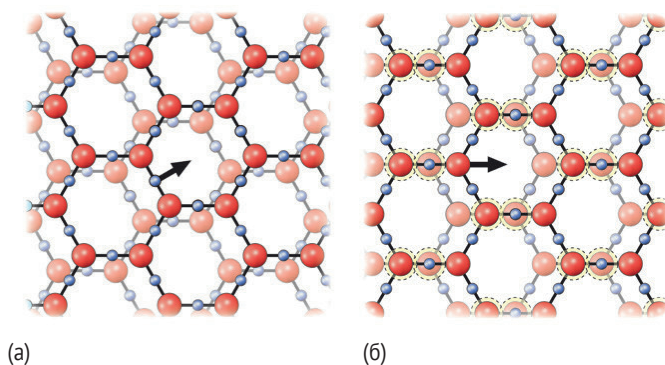


Рис. 4.12. Смещение одного слоя относительно другого помещает противоположные заряды друг напротив друга, создавая электростатическое притяжение

Такой планарный сдвиг теоретически можно реализовать двумя способами, но только один из них работает (рис. 4.13). Первый способ включает смещение в направлении, перпендикулярном ребру шестиугольника (а); второй включает смещение вдоль ребра (б). В первой модели сдвиг не приводит к совмещению противоположных зарядов и, следовательно, не создает заметного притяжения. Во второй модели сдвиг на половину расстояния между атомами кислорода приводит к появлению множества пар противоположных зарядов: притягивается треть всех зарядов слоя. Это распределенное притяжение обе-

Рис. 4.13. Возможные варианты размещения слоев с планарным сдвигом. Только сдвиг, показанный в правой части рисунка (б), дает стабильную структуру с совмещением противоположных зарядов

спечивает достаточную прочность структуры. А прочность, в свою очередь, означает высокую плотность (см. главу 3). Судя по всему, вторая модель вполне работоспособна.



При планарном сдвиге слоев, кроме притяжения, возникает некоторое отталкивание: соседние одинаково заряженные атомы соответствующих слоев отталкиваются друг от друга. Тем не менее мест, где происходит отталкивание, меньше, чем тех, где возникает притяжение; к тому же по мере отдаления атомов взаимное отталкивание ослабевает, уменьшая тем самым суммарную силу отталкивания. Наши расчеты показали, что притяжение легко побеждает отталкивание.

Таким образом, вторая модель дает нам стабильную структуру, слою которой естественным образом «слипаются». Эта модель дает предсказуемое механическое поведение исключаяющей зоны: она полутвердая, если оставить ее в покое, но в то же время способная течь в ответ на приложенное усилие сдвига. Ее поведение должно напоминать студенистый яичный белок.

Различные вариации на тему этой простой укладки дают нам интересные варианты структуры. На рис. 4.13б последовательные слои смещены вправо; но их можно так же легко сдвинуть влево. Используя эти два варианта, вы можете построить башню с наклоном влево или вправо. Эти варианты, возможно, могли бы объяснить зеркальные конструкции, упомянутые в главе 2.

На самом деле варианты сдвига не ограничиваются направлениями влево или вправо; планарное смещение может происходить в любом из шести направле-

ний, что приводит к бесконечному количеству вариантов укладки. Мы можем даже реализовать спиральное наложение (рис. 4.14): начнем с базовой плоскости, сместим плоскость над ней в направлении вдоль одной стороны, сместим следующую плоскость на 60° к этой стороне, следующую сместим еще на 60° и т. д. В этом случае шаг спирали будет состоять из шести слоев. Теоретически возможен и более крупный шаг, даже нерегулярный. Подобная спиральная структура может оказаться особенно важной в биологии, где EZ-вода должна взаимодействовать со свернутыми в спираль белками и нуклеиновыми кислотами.

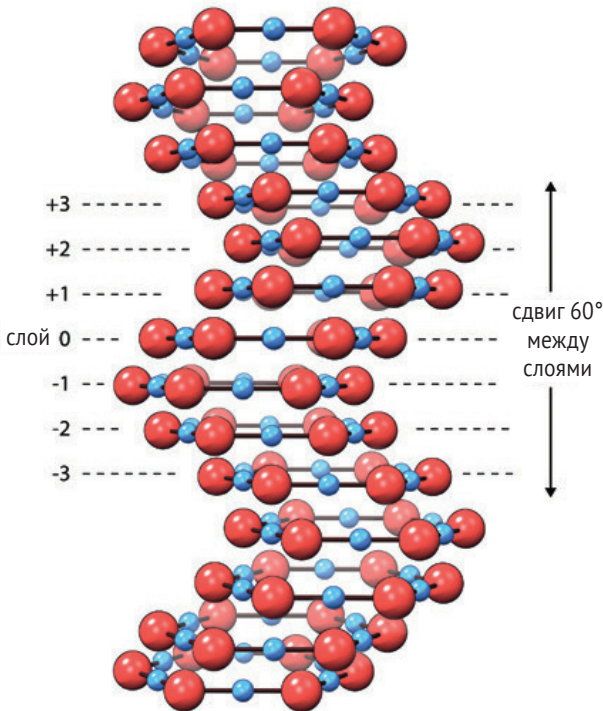
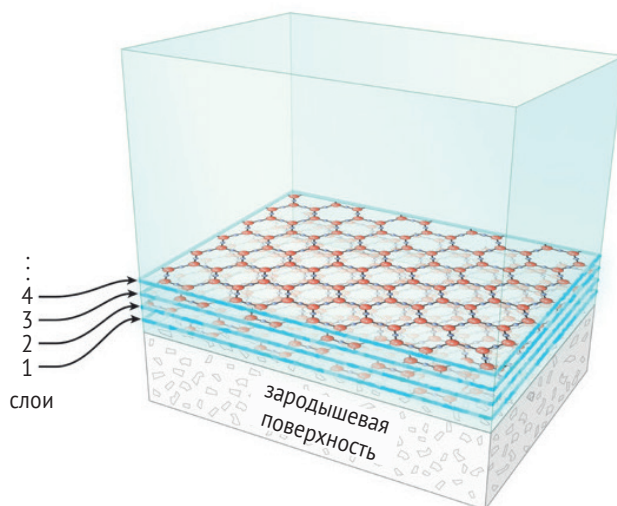


Рис. 4.14. Смещение последовательных плоскостей на 60° приводит к возникновению спиральной структуры

Итак, контакт воды с гидрофильной поверхностью вызывает рост исключаяющей зоны. Вода – это сырье. Из этого сырья строятся сотовые слои исключаяющей зоны. Эти слои могут скользить друг по другу, если приложено достаточное усилие сдвига; но обычно слои «прилипают» друг к другу, создавая то, что макроскопически рассматривается как исключаяющая зона (рис. 4.15).

Рис. 4.15. Накопление сотовых слоев, формируемых из объемной воды. Гидрофильная поверхность инициирует рост исключяющей зоны, которая увеличивается слой за слоем



4.8. ЗАРОДЫШЕВЫЙ СЛОЙ

Как начинается процесс строительства исключяющей зоны? Гидрофильные поверхности обычно содержат атомы кислорода, и одно из возможных объяснений состоит в том, что атомы поверхностного кислорода образуют матрицу. Если достаточное количество этих атомов по своему расположению соответствует положению атомов кислорода в шестиугольниках исключяющей зоны, то сама поверхность может рассматриваться как первый слой исключяющей зоны. На основании этого шаблона будут легко формироваться последующие слои.

Конечно, никакая поверхность материала не обеспечивает идеальное расположение атомов кислорода. Поверхности различаются по расположению атомов и могут иметь другие отрицательно заряженные атомы вместо кислорода. Поэтому некоторые поверхности могут оказаться менее успешными в формировании слоев исключяющей зоны; они считаются менее гидрофильными.

Дело в том, что зародышевый слой передает информацию слоям исключяющей зоны. Например, пятно отсутствующих атомов кислорода на шаблоне подразумевает соответствующий пропуск в первом слое исключяющей зоны и т. д.; этот пропуск может быть спроецирован через много слоев. Если это так, то исключяющая зона будет содержать информацию о при-

роде поверхности шаблона. Эта информация может быть сохранена в той степени, в которой исключаящая зона остается неизменной со временем.

Другой характерной особенностью является то, что для зарождения зоны требуется только матрица, то есть один молекулярный слой. Это объясняет, почему исключаящие зоны могут формироваться поверхностью даже монослоя (рис. 3.9).

С другой стороны, материалы, у которых отсутствуют поверхностные заряды, должны иметь ограниченную способность к формированию EZ-матрицы, как и поверхности, чьи заряды совершенно не соответствуют стандартной поверхности сотового шаблона. Все такие поверхности будут классифицироваться как гидрофобные – ненавидящие воду или боящиеся ее. Только заряженные гидрофильные поверхности могут инициировать рост исключаящей зоны.

Даже при наличии подходящих зарядов важным фактором, влияющим на рост исключаящей зоны, может быть шероховатость поверхности шаблона. Небольшая шероховатость не является проблемой: если поверхность является лишь слегка неровной в молекулярном масштабе, то первоначальный слой должен соответствовать неровностям, впадинам и гребням поверхности; плоский слой будет иметь слегка волнистую конфигурацию. Более заметная шероховатость может привести к разрывам: вместо одной обширной плоской стопки слоев от каждой наклонной поверхности будет начинать расти своя стопка. Если эти стопки мешают друг другу, то рост исключаящей зоны будет нарушен. Такой шаблон, скорее всего, будет неспособен породить столь же обширные исключаящие зоны, как более гладкие поверхности. Некоторые предварительные данные из нашей лаборатории подтверждают это предположение.

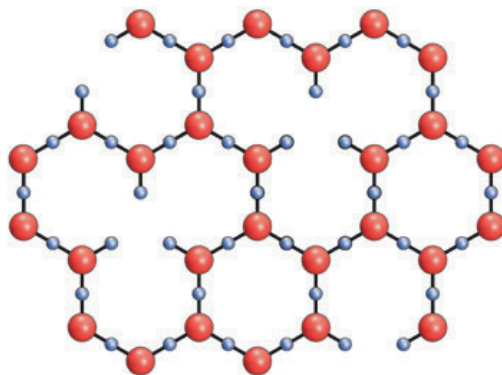
Следовательно, шаблон не является единственным фактором, от которого зависит размер исключаящей зоны. Шаблоны инициируют рост зоны, обеспечивая подходящее расположение атомов. Сильно гидрофильные шаблоны обеспечивают лучшее совпадение и, следовательно, создают более выраженные исключаяющие зоны; однако на конечный размер зоны влияет шероховатость поверхности и другие существенные факторы (см. ниже). Шаблон – только один из нескольких факторов, определяющих размер зоны.

4.9. ЭРОЗИЯ РЕШЕТКИ И РАЗМЕР ИСКЛЮЧАЮЩЕЙ ЗОНЫ

Пока все хорошо, но вот проблема. Идентичные слои исключавшей зоны должны вырабатывать идентичные электрические потенциалы. Но на деле электрический потенциал исключавшей зоны падает по мере удаления от зародышевой поверхности (рис. 4.7). Слои не идентичны. Спад потенциала можно объяснить уменьшением заряда слоя по мере удаления от зародышевой поверхности. Это уменьшение может происходить по двум причинам: за счет удаления отрицательного заряда или за счет добавления положительного заряда. Возможно, участвуют обе.

Удаление отрицательного заряда из сотовой структуры означает удаление атомов кислорода; чем больше атомов кислорода покинули слой, тем меньше собственный отрицательный заряд слоя. На рис. 4.16 показано, что ограниченное удаление атомов структурно допустимо: до тех пор, пока количество отсутствующих атомов кислорода не будет чрезмерным, плоская решетка не распадется. Даже потеря двух соседних атомов кислорода не должна ставить под угрозу существование решетки, потому что межплоскостные притяжения способствуют стабильности слоя. Если «дефекты» в области отсутствующих атомов разрастаются по мере удаления от зародышеобразующей поверхности, то более отдаленные слои будут иметь меньший отрицательный заряд.

Рис. 4.16. Уменьшение заряда слоя. Здесь показано, как удаление атомов кислорода из гексагональной решетки может происходить без нарушения структурной целостности



Одна из причин потери атомов кислорода заключается в эрозии решетки. Отрицательно заряженная решетка побуждает положительно заряженные протоны проникать обратно в исключавшую зону. На самом

деле протоны не свободны в своем поведении, потому что они недолговечны; протоны немедленно связываются с молекулами воды с образованием ионов гидроксония. Обычно эти ионы гидроксония не могут попасть в решетку исключаяющей зоны – герметичность решетки предотвращает проникновение.

Однако разрывы, подобные тем, которые схематично показаны на рис. 4.16, как и неоднородности решетки, возникающие из-за шероховатости поверхности, создают подходящие места для вторжения. Если проникающие ионы гидроксония соединяются с ближайшими атомами кислорода в решетке, в результате этой связи возникают молекулы воды и происходит разрушение решетки. Наиболее серьезная эрозия должна происходить там, где начинают проникать ионы гидроксония, наиболее сильно снижая отрицательность дистальной плоскости исключаяющей зоны, что соответствует экспериментальным наблюдениям.

Проникающие положительные заряды могут также застревать в пространстве между слоями, особенно когда протон, отделившийся от иона гидроксония, связывает близко расположенные атомы кислорода смежных слоев (рис. 4.13б). Опять же, это, скорее всего, произойдет там, где протонов больше, – вблизи дистальной плоскости решетки. Внося положительный заряд, эти протоны дают тот же эффект, что и потеря кислорода: уменьшение отрицательного заряда слоев, отдаленных от зародышеобразующей поверхности.

Степень эрозии решетки может влиять на размер исключаяющей зоны. Чрезвычайно гидрофильные поверхности с относительно небольшим количеством дефектов решетки должны образовывать исключаяющую зону с ограниченной эрозией. В случае менее гидрофильных поверхностей, имеющих больше дефектов, положительные ионы могут легче проникать вглубь, разрушая решетку и снижая размер исключаяющей зоны. Это может объяснить, почему менее гидрофильные материалы создают исключаяющие зоны меньшего размера.

Дефекты пространственной решетки напоминают полупроводники, где дефекты кристаллической решетки приводят к возникновению структур с избыточными электронами или избыточными «дырками», называемыми полупроводниками *n*-типа или *p*-типа соответственно. Структура исключаяющей зоны боль-

ше похожа на полупроводник n -типа с избыточными электронами, переносимыми атомами кислорода. Поэтому мы вправе ожидать, что исключая зона обладает свойствами полупроводника, а ниже мы покажем, что такие свойства действительно присутствуют. Пока достаточно отметить, что дефекты решетки влияют на размер исключаяющей зоны посредством эрозии слоев.

4.10. СУЩЕСТВУЮТ ЛИ ПОЛОЖИТЕЛЬНО ЗАРЯЖЕННЫЕ ЗОНЫ ИСКЛЮЧЕНИЯ?

Внимательный читатель, возможно, заметил в предыдущем разделе любопытный нюанс. Исключение нескольких атомов кислорода из решетки уменьшает отрицательный заряд: чем больше кислорода вы удаляете, тем менее отрицательной становится решетка. Это приводит к очевидному вопросу о том, что происходит в экстремальных условиях. Дальнейшее исключение атомов кислорода сместит собственный заряд до нуля и далее, вплоть до положительных чисел. Вы можете самостоятельно выполнить расчеты и убедиться, что собственный заряд гексагональной ячейки стандартной решетки может лежать в диапазоне от -1 до $+1$.

Это рассуждение заслуживает внимания, поскольку оно предполагает существование положительно заряженных исключаяющих зон; до сих пор мы рассматривали только отрицательно заряженные зоны. Тем не менее если предложенная модель исключаяющей зоны является справедливой, мы могли бы предположить существование положительно заряженных исключаяющих зон; их пространственная структура останется прежней, не считая того, что у них будет гораздо меньше атомов кислорода.

Такие положительно исключаяющие зоны действительно существуют, хотя они встречаются реже, чем отрицательные. Мы обнаружили их рядом с поверхностями некоторых полимеров и металлов [15]. Примером могут служить ионообменные гелевые шарики. Обычно применяемые для физического разделения веществ, эти шарики размером в полмиллиметра бывают двух типов: анионные и катионные. Оба типа образуют исключаяющие зоны (рис. 4.17), но зоны рядом с катионными шариками имеют положительный собственный заряд.

На рис. 4.18 приведены доказательства наличия этого положительного заряда. Из рисунков следует, что про-

странственные распределения электрического потенциала рядом с катионными и анионными шариками практически зеркальны. Одна исключаяющая зона относится к стандартному отрицательному типу, тогда как другая демонстрирует положительный потенциал. Области, контактирующие с положительно заряженными исключаяющими зонами, обладают более высоким значением pH вместо привычного более низкого pH, характерного для областей у отрицательно заряженных исключаяющих зон [15].

Таким образом, на практике осуществимы оба варианта распределения зарядов. Свойства положительно заряженных исключаяющих зон кажутся более или менее противоположными отрицательно заряженным зонам.

Если положительно заряженные исключаяющие зоны содержат намного меньше кислорода, то вы можете ожидать, что эти решетки будут менее прочными, так как дефекты ослабляют решетку. Мы подтвердили эту неустойчивость. Положительно заряженные исключаяющие зоны относятся к редким артефактам, которые относительно легко разрушаются от малейшего механического воздействия. Поэтому мои коллеги не решаются изучать их в лаборатории. Тем не менее эти положительно заряженные зоны существуют.

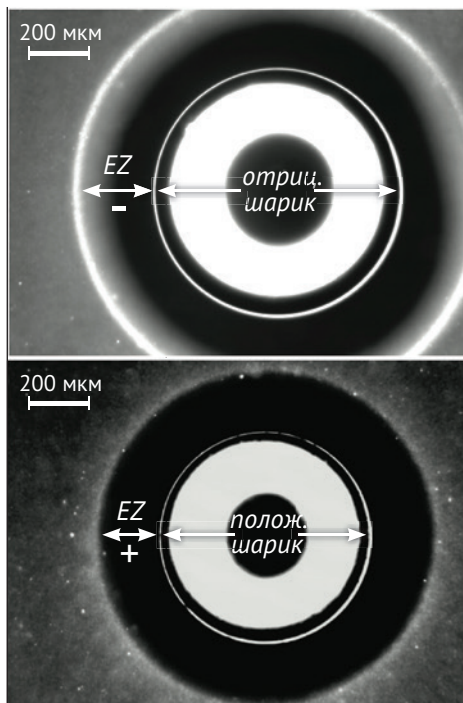


Рис. 4.17. Исключаяющие зоны окружают как отрицательно, так и положительно заряженные шарики

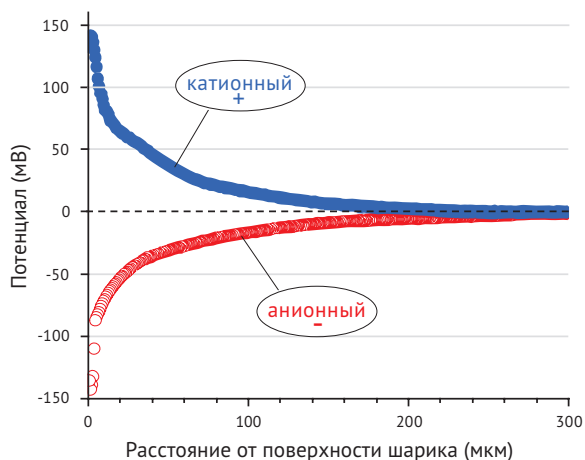


Рис. 4.18. Электрические потенциалы, зарегистрированные рядом с катионными и анионными шариками

Упомянутая структурная модель, очевидно, обладает достаточной универсальностью в описании обоих типов исключаящих зон, как отрицательных, так и положительных; отдельные модели не нужны. Это привлекательное качество модели, потому что мы полагаем, что природа благоволит простоте. Кроме того, если исключаящие зоны возникают достаточно часто, как мы покажем ниже, то неустойчивость положительных зон может объяснить их относительную редкость; они не часто выживают.

4.11. ЧЕТВЕРТАЯ ФАЗА ВОДЫ (И ПРИСТУПЫ ГНЕВА У НЕКОТОРЫХ ХИМИКОВ)

Важной особенностью предложенной выше модели исключаящей зоны является ее сходство со льдом. Это сходство не должно удивлять: мы построили нашу модель именно на основе структуры льда. С другой стороны, если лед считается одной из фаз воды, то исключаящая зона может рассматриваться аналогично – возможно, как долгожданная «четвертая фаза» воды, предложенная столетие назад выдающимся физикохимиком сэром Уильямом Харди.

Чтобы исключаящая зона квалифицировалась как отдельная фаза (иногда называемая «состоянием»), она должна удовлетворять определенным критериям: быть уникальной, пространственно выделенной и существовать в значительном количестве. Этим требованиям удовлетворяют три классических состояния воды (хотя в следующих главах мы отдельно поговорим о двух из них). Эти требования также справедливы для исключаящей зоны – ведь подобные зоны занимают конкретное пространство, имеют уникальную структуру и могут распространяться с поверхности на расстояние до одного метра (рис. 3.8). Мы полагаем, что исключаящая зона имеет право считаться отдельной фазой воды ничуть не меньше, чем лед.

С другой стороны, упоминание о размерах исключаящей зоны может вызвать приступ гнева у трезвомыслящих химиков. Как может структура, построенная из молекул воды, простирается на миллионы слоев от зародышеобразующей поверхности? Приученные к мысли, что разрушительные эффекты теплового движения ограничивают упорядочение несколькими молекулярными слоями, некоторые химики склонны рассматривать концепцию дальнего упорядочивания как недопустимую; этого просто не может быть.

Тем не менее мы предлагаем структуру, состоящую не из уложенных диполей, а из уложенных слоев. Это разные вещи. Химики могут рассматривать стопку диполей как стопку кирпичей, готовых разрушиться от малейшего воздействия теплового движения (рис. 4.19, слева); так как эти разрушительные эффекты являются аддитивными, стопка не успевает вырасти до заметных размеров. Хочу повторить, что мы располагаем не набором диполей, а набором слоев (рис. 4.19, справа). Каждый слой протяжен, и чем обширнее эта структура, тем меньше тепловое перемешивание. Иными словами, стопка слоев намного меньше подвержена внешним воздействиям, чем стопка диполей. Поэтому можно надеяться, что эта плоскостная модель с меньшей вероятностью вызовет у химиков рефлекторные приступы гнева.

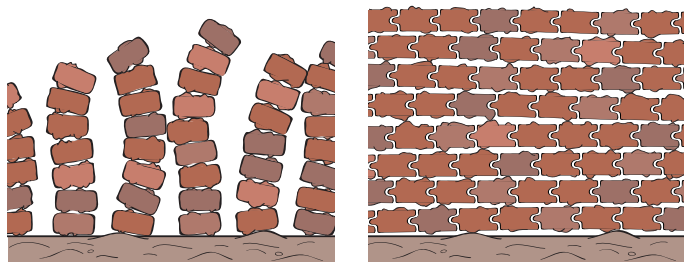


Рис. 4.19. Модель дипольных стопок склонна к колебаниям и разрушению (слева); однако беспорядок сводится к минимуму, когда элементы соединяются, образуя протяженные плоские структуры (справа)

С другой стороны, планарная модель помогает нам решить проблему, с которой не справились химики: почему гели сохраняют так много воды. Гели удерживают воду. Напомню, что обычные гели не отдадут воду, даже если относительное содержание воды превышает 99,9 % от их общей массы (рис. 1.1). Теперь мы можем рискнуть объяснить это явление. Матрица геля содержит множество гидрофильных нитей. Поверхности нитей преобразуют обычную воду в EZ-воду. Слои исключают зоны прилипают к этим зародышевым нитям, а также друг к другу; следовательно, ваш желатиновый десерт остается стабильно влажным. EZ-вода не вытекает наружу.

Наконец, предлагаемая структура проясняет, почему исключая зона выталкивает примеси. Им нет места, потому что растворенные вещества могут проникнуть в решетку исключая зоны только через гексагональные отверстия, но эти отверстия малы. Фактически препятствие еще более непроходимо: поскольку соседние слои исключая зоны взаимно смещены, реальные отверстия меньше, чем плоские шестиугольные отверстия (рис. 4.15). Решетка очень

плотная и поэтому не пускает растворенные вещества. Только протоны и более мелкие объекты достаточно малы и могут проникнуть внутрь.

С другой стороны, протоны обычно не существуют как отдельные объекты; они прилипают к молекулам воды, образуя ионы гидроксония, которые намного крупнее протонов и поэтому исключаются. В главе 17 вы узнаете, как протоны, освобожденные от этих родительских молекул воды, могут проникать в решетку исключаемой зоны, образуя лед.

Судя по всему, исключаются все растворенные частицы, кроме свободных протонов, – по крайней мере, из областей решетки, лишенных разрывов. Исключение даже ионов гидроксония с их положительным зарядом обеспечивает поддержание разности электрических потенциалов между исключаемой зоной и водой за ее пределами. Вот почему мы можем наблюдать неизменную разность потенциалов в течение длительных периодов времени.

Устойчивое разделение зарядов между исключаемой зоной и зоной объемной воды по большей части имеет следующие последствия. Такое разделение зарядов формирует «батарею». Характер батареи и природа энергии, которая поддерживает заряд батареи, будут иметь решающее значение для понимания практически всех явлений, связанных с водой.

4.12. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При разработке структурной модели исключаемой зоны мы сначала рассмотрели уложенные диполи. И хотя эта модель проста, логична и исторически обоснована, диполи упорно остаются нейтральными; они не объясняют наблюдаемый электрический заряд исключаемой зоны. Поэтому дипольная модель не подходит. Более перспективной оказалась модель со смещенными сотовыми слоями: гексамеры отдельного слоя не совпадают с гексамерами соседних слоев. Эта модель объясняет собственный заряд исключаемой зоны; кроме того, она опирается на очевидное сходство со льдом.

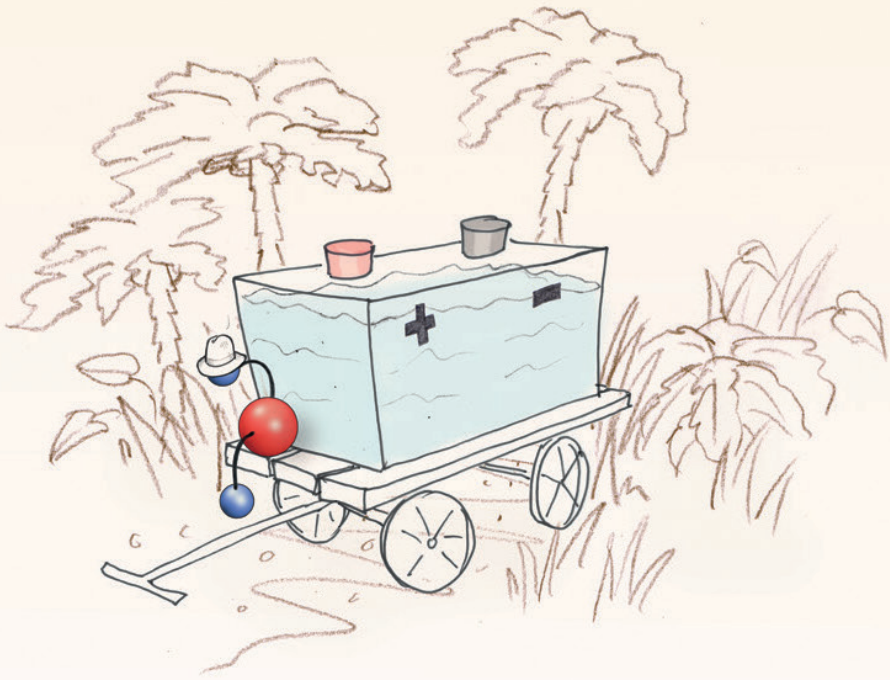
В этой модели с укладкой слоев локальный заряд зависит от плотности электроотрицательных атомов кислорода. Таким образом, локальный электрический

потенциал может варьироваться от крайне отрицательных значений до нуля и вплоть до положительных значений, характерных для некоторых исключаяющих зон. Модель, основанная на укладке слоев, обладает достаточной универсальностью, чтобы объяснить все типы исключаяющих зон.

Реальные исключаяющие зоны отличаются от идеальной структуры. Теоретически исключаяющие зоны состоят из замкнутых гексагональных ячеек. Реальные исключаяющие зоны не столь безупречны: у них могут отсутствовать атомы кислорода и атомы водорода в позициях, которые отражают распределение заряда на зародышеобразующей поверхности, и они могут подвергаться эрозии.

Исключаяющие зоны являются достаточно обширными и четко выраженными, чтобы их можно было рассматривать как отдельную фазу воды. Признание этой «четвертой фазы» только началось. Разгадка ее секретов обещает пролить свет на то, что происходит, когда вода соприкасается практически с любой поверхностью.





Глава 5

Электрическая батарея из воды

Небо озаряет вспышка молнии, обрушивающей на поверхность земли сотни тысяч вольт природной энергии. Эти удары молнии происходят по всему миру настолько часто, что, по мнению ученых, изучающих атмосферу, земная поверхность не успевает рассеять накапливающийся заряд, оставаясь электрически отрицательной. Когда вы стоите на земле, атмосферный потенциал на уровне вашего носа примерно на 200 вольт более положительный, чем на уровне пальцев ног [1].

Хотя разряды молний и их последствия не являются предметами данной главы, электрический заряд определенно относится к теме книги. Как и облака, исключаящие зоны содержат концентрированные электрические заряды. Подобные заряды обладают потенциальной электрической энергией, так же, как и заряды грозовых облаков. И последствия могут быть не менее впечатляющими.

Возьмем, к примеру, биологию. Все заряженные объекты, такие как мембраны, белки и ДНК, взаимодействуют с водой; вокруг них должны в изобилии появляться исключаящие зоны. Эти исключаящие зоны заряжены, и, следовательно, они хранят электрическую потенциальную энергию. Поскольку природа редко тратит впустую накопленную потенциальную энергию, заряд исключаящей зоны может служить источником энергии для различных клеточных процессов, начиная от химических реакций и заканчивая потоками жидкости. Вариантов очень много.

С другой стороны, изолированные заряженные тела встречаются редко. Заряженные тела обычно располагаются вплотную к телам с противоположным зарядом – например, на противоположных сторонах биологической мембраны. Поэтому мы ожидали обнаружить аналогичную пару, состоящую из концентрированного заряда в исключаящей зоне и эквивалентного противоположного заряда, лежащего за пределами исключаящей зоны.

Итак, давайте более обстоятельно поговорим о том, может ли исключаящая зона иметь парный заряд противоположного знака (глава 4), и рассмотрим некоторые последствия образования такой пары.

5.1. Заряды ЗА ПРЕДЕЛАМИ ИСКЛЮЧАЮЩЕЙ ЗОНЫ

При рассмотрении вопроса о том, содержит ли система исключаящей зоны два электрических полюса вместо одного, необходимо иметь в виду, что исключаящая зона строится из обычной воды, которая является электрически нейтральной. Если нейтральное вещество образует заряженную зону, то где-то в другом месте должен располагаться равный по величине и противоположный по знаку заряд; в противном случае нарушается закон сохранения заряда. Нарушение фундаментальных законов природы не сулит ничего хорошего.

Поэтому мы ожидали найти область с противоположным зарядом прямо за пределами исключаящей зоны. По мере формирования отрицательно заряженной исключаящей зоны соответствующая область положительного заряда должна возникать прямо за ее пределами. Значит, в этой области окажется много протонов. Поскольку высокая концентрация протонов соответствует низким значениям pH, уже на ранней стадии исследований мы предположили, что вблизи исключаящей зоны может существовать область с низким pH.

Чтобы проверить это предположение, мы поместили гель в мензурку с водой и расположили pH-зонд прямо за пределами исключаящей зоны (рис. 4.8). Мы были бы взволнованы, увидев падение pH на одну единицу, что говорило бы о десятикратном увеличении концентрации протонов; но (как упоминалось в главе 4) мы получили более впечатляющий результат. Рядом с исключаящей зоной геля полиакриловой кислоты мы часто обнаруживали снижение pH на три или четыре единицы, а иногда и больше. Поскольку шкала pH является логарифмической, это означало увеличение концентрации протонов в десять тысяч раз. Подобный результат нас поразил.

Мы обнаружили, что изменение условий эксперимента может повлиять на величину снижения pH. Например, мы изменили размер емкости по отношению

к гелю; при использовании мензурки намного большего размера, чем гель, мы увидели лишь небольшое изменение pH; но, используя мензурку, едва превышающую размер геля, так что протонам практически некуда было деваться, мы получили более впечатляющие изменения pH.

Классическая химия не могла полностью объяснить наблюдаемые явления. Результаты были настолько впечатляющими, что наши наиболее консервативные сотрудники лаборатории начали испытывать беспокойство. Один талантливый парень, хорошо разбирающийся в классической химии, просто не мог поверить в результат и перешел к другому проекту. Поначалу и я не был абсолютно уверен в собственных наблюдениях.

Мы продолжали думать о том, что, возможно, эти протоны на самом деле не накапливаются вследствие роста исключаяющей зоны. Их удивительное накопление потеряло бы значение, если бы мы обнаружили, что они просто перешли в воду из геля. Вскоре мы придумали, как проверить эту версию: если протоны переходят из геля, то их поступление не может превысить некоторое фиксированное значение – в конце концов, ни один гель не может обеспечить бесконечное количество протонов. Мы обнаружили, что предварительное погружение геля в несколько промывочных ванн для вымывания всех высвобождаемых протонов мало что меняет: в последующих экспериментах мы наблюдали похожее снижение pH. Судя по всему, накопление протонов действительно возникает в результате роста исключаяющей зоны, как мы и предполагали.

Этот вывод нас обрадовал – как прохладный напиток в жаркий летний день. Он также успокоил нас, потому что доказательство наличия высокого положительного заряда укрепляет доверие к доказательствам наличия высокого отрицательного заряда у исключаяющей зоны. Для некоторых физиков эта квазистабильная концентрация отрицательного заряда не вписывалась в картину привычного опыта, поэтому им было трудно ее принять. Обнаружение противоположных зарядов в другом месте убедило нас, что мы движемся по правильному пути.

5.2. НАКОПЛЕНИЕ ПРОТОНОВ

Чтобы отследить динамику накопления протонов, мы использовали миниатюрный pH-электрод. Зонд был

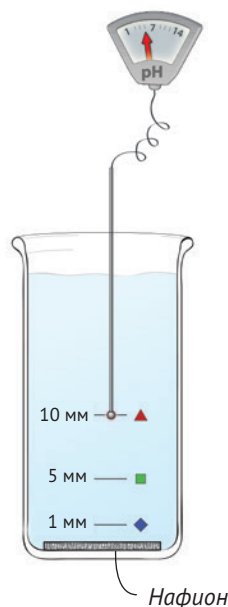
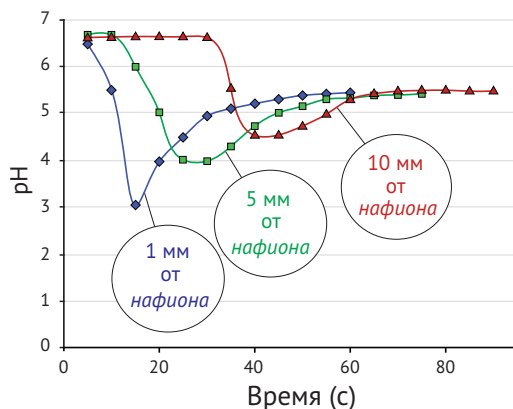


Рис. 5.1. Динамика изменения pH после погружения нафiona в воду. Мы измерили pH в трех точках, как указано на рисунке. Модель предполагает расходящуюся волну протонов

достаточно мал, чтобы можно было отслеживать локальное изменение pH на небольших расстояниях от зародышеобразующей поверхности (рис. 5.1, слева). Для эксперимента мы использовали лист нафiona, закрепленный на дне емкости. Мы наполнили емкость водой, а затем наблюдали накопление протонов.



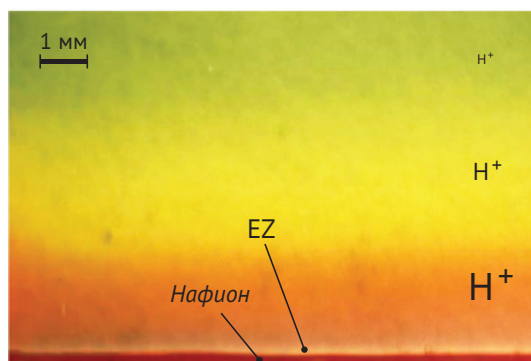
В правой части рис. 5.1 приведены графики изменений pH на нескольких расстояниях от поверхности образца. На расстоянии 1 мм pH начал падать уже через несколько секунд после заполнения сосуда водой, достигнув нижнего значения за 15 секунд, а затем частично восстановился, когда протоны распространились в более отдаленные области. На расстоянии 5 мм изменение pH началось позже; на 10 мм – еще позже. В конце концов, pH достиг примерно одинакового устоявшегося значения, меньшего, чем начальное значение pH в каждой точке измерения.

На рис. 5.1 показаны уровни pH, запаздывающие по мере удаления от поверхности нафiona. Запаздывание объясняется постепенным распространением волны протонов, зарождающейся у поверхности. Вероятно, волна зарождается у внешнего края исключаяющей зоны, поскольку именно там происходит строительство слоев (рис. 5.2). Мы можем ожидать, что со временем установится равновесие: протоны отталкиваются друг от друга и в конечном итоге должны более или менее равномерно распространиться по всей жидкости – по крайней мере, те протоны, которые находятся далеко за пределами отрицательной исключаяющей зоны. Время уравнивания не определено; оно зависит от физических параметров системы, в частности от того, сколько места остается у протонов для рассеивания.

5.3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОТОНОВ И pH-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ КРАСИТЕЛИ

Поскольку вопрос распределения протонов был для нас критически важным, мы использовали дополнительный инструмент обнаружения протонов: pH-чувствительные красители. Эти красители, как и те, что используются в лакмусовой бумаге, меняют цвет в зависимости от pH среды.

На рис. 5.3 показан типичный пример распределения цветов красителя за пределами исключяющей зоны. Красно-оранжевый цвет рядом с исключяющей зоной, согласно диаграмме калибровки цвета, указывает на значение pH, равное трем или ниже, то есть на многочисленные протоны. На больших расстояниях от исключяющей зоны также наблюдается снижение pH, но менее выраженное. Следовательно, применение pH-красителя уверенно подтвердило показания pH-зонда: большое количество протонов в воде вблизи исключяющей зоны. Еще один обнадеживающий результат.



Мы попытались с помощью красителей сделать шаг вперед и использовать их для измерения количества протонов, но нам удалось получить только приблизительные оценки. Мы были в тупике из-за нашей неспособности вычислить количество протонов, примыкающих к исключяющей зоне: отрицательный заряд зоны должен привлекать много положительных протонов, но краситель не может справиться с такими высокими концентрациями по причине ограниченного диапазона чувствительности.

Однако мы не отступили и создали камеру, подобную той, которая изображена на рис. 5.3, чтобы измерить хотя бы то, что сможем. Мы нашли приблизительно

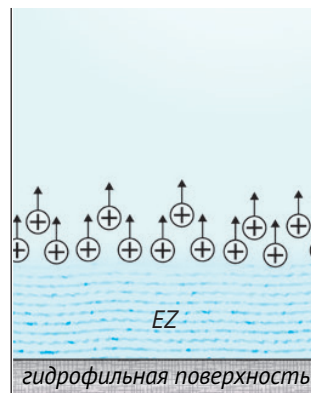


Рис. 5.2. Протоны, высвобождаемые на передней кромке растущей исключяющей зоны

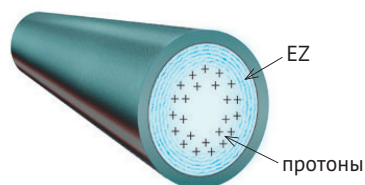
Рис. 5.3. Распределение протонов за пределами исключяющей зоны (вдоль широкой грани продолговатой емкости). Это изображение, полученное вскоре после добавления воды с раствором pH-чувствительного красителя в емкость, показывает, что приграничная зона исключает краситель. Значение pH непосредственно за исключяющей зоной составляет 3 или ниже (красно-оранжевый), что указывает на многочисленные протоны. Предполагаемая более высокая концентрация протонов вблизи исключяющей зоны выходит за пределы диапазона чувствительности красителя

от 10^{15} до 10^{16} протонов, распределенных по всему пространству за пределами исключаяющей зоны, а также для сравнения оценили количество электронов в исключаяющей зоне. Это количество было вычислено из структуры решетки и измеренного распределения потенциала. Расчетное значение, от 10^{18} до 10^{19} электронов, было значительно выше, чем измеренное количество протонов. Разницу можно объяснить влиянием двух неопределенных факторов: неучтенные протоны, примыкающие к исключаяющей зоне, и/или уменьшение отрицательного заряда исключаяющей зоны по причине неполного заполнения решетки кислородом. Следовательно, мы не смогли окончательно ответить на вопрос о точном совпадении положительного и отрицательного зарядов.

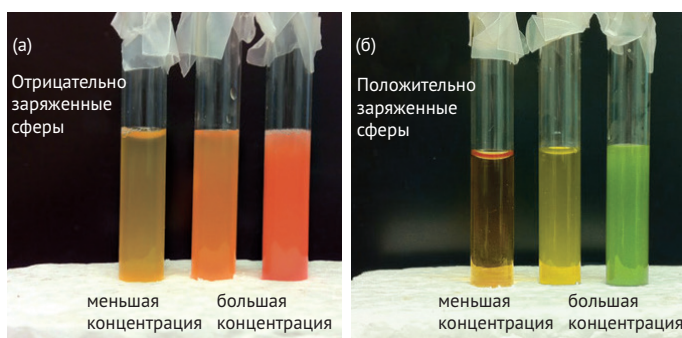
Позже мы отслеживали высвобожденные протоны с помощью другого метода – установки, которая постоянно обновляла воду, близкую к исключаяющей зоне (рис. 5.4). Мы использовали полую трубку из нафтона. Внутренняя поверхность трубки формирует кольцевую исключаяющую зону, которая выделяет протоны в центр трубки (а). Мы обновляли эти протоны, непрерывно пропуская свежую воду через трубку (б). Поскольку кольцевая исключаяющая зона склонна удерживаться материалом трубки, большая часть потока проходит по центру трубки. Мы обнаружили, что выходящая вода имела более низкое значение pH, чем входящая вода; разница pH превышала единицу и никогда не уменьшалась – даже после 30 минут непрерывного потока [2]. Хотя мы все еще не могли решить проблему определения количества протонов, мы установили, что проходящая вода продолжала получать протоны из кольцевой исключаяющей зоны даже в течение длительных периодов времени.

Мы даже нашли доказательства высвобождения протонов в суспензии микросфер. Эти гидрофильные микросферы должны быть окружены исключаяющими зонами, предположительно в форме раковин. Такие зоны могут быть слишком малы для наблюдения при помощи микроскопа, но мы в состоянии измерить соответствующее изменение pH в воде. Чем больше концентрация микросфер, тем больше должно быть изменение pH. Рисунок 5.5 подтверждает это предположение.

(a) Трубка из нафiona, заполненная водой



(б)



Совокупность результатов, описанных выше, подтверждает измерения, сделанные с использованием pH-метра, – рядом с отрицательными зарядами исключающей зоны всегда появлялись положительные заряды. Молекулы воды распались на отрицательные и положительные компоненты, создавая нечто, очень напоминающее батарею – химическое устройство, основанное на разделении зарядов.

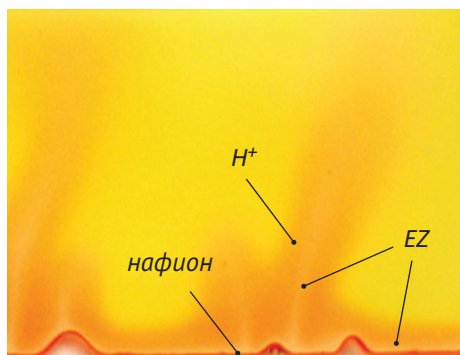
Похожее на батарею разделение зарядов остается заметным даже тогда, когда исключающая зона образует уникальные конфигурации. Один из примеров показан на рис. 5.6. Это изображение получено на той же экспериментальной установке, что и на рис. 5.3, но несколько позднее. («Бугорки» в нафione возникают, когда гидратация вызывает вспучивание полимера; они не влияют на результат.) К тому времени, когда мы получили это изображение, исключающая зона начала вырастать в форме стержней, как на рис. 3.7. Вы можете

Рис. 5.4. Результат работы установки: (а) кольцевая исключая зона выталкивает протоны в центр; (б) пропускание свежей воды через трубку вымывает высвобожденные протоны

Рис. 5.5. Добавление микросфер изменяет pH воды: (а) карбоксилатные микросферы диаметром 1 мкм. Повышение концентрации микросфер меняет цвет красителя на красный, что указывает на более низкий уровень pH; (б) положительно заряженные аминомикросферы меняют цвет красителя на зеленый, что указывает на более высокий pH

Рис. 5.6. Этот снимок аналогичен рис. 5.3, но сделан с меньшим увеличением и позже. Обратите внимание на области с низким рН (красные), окружающие каждый вертикальный выброс исключавшей зоны

видеть красный цвет вокруг каждой зоны. Этот цвет отражает плотность протонов рядом со стержнеподобными зонами. Таким образом, мы наблюдаем увеличение количества протонов рядом с исключавшей зоной не только в стандартных ситуациях (рис. 5.3), но и когда зона проникает глубоко в воду.



Другими словами, разделение зарядов происходит везде, где присутствует исключавшая зона. Свойственное электрическим батареям разделение зарядов является характерным признаком присутствия такой зоны.

Клеточные батареи: нервы, боль и анестезия

Ой! Плита неожиданно горячая. Вы рефлекторно отдергиваете руку, чтобы избежать неприятных последствий.

В этом движении принимают участие нервы: они сигнализируют вашему мозгу, что необходимо срочно отдернуть руку.

Этот сигнальный механизм основан на электричестве: нервные клетки несут отрицательный заряд, в то время как области вне этих клеток заряжены положительно. Опасные раздражители вызывают локальные разряды, которые распространяются по нерву в мозг. Таким образом, разделение зарядов является ключевой особенно-



стью передачи нервного сигнала; каждый нерв ведет себя как разряжаемая батарея.

Как возникает это разделение заряда? Согласно преобладающему мнению, мембрана нервных клеток содержит ионные насосы и каналы, которые выполняют данную функцию, оставляя внутри клетки отрицательные заряды, а снаружи положительные. Моя последняя книга оспаривает эту точку зрения [3].

Альтернативная концепция предполагает, что разделение заряда связано с водой. Как мы уже видели, любая вода, соприкасающаяся с заряженной или гидрофильной поверхностью, ста-

новится EZ-водой; поскольку содержимое клетки плотно окружено заряженными поверхностями, большая часть клеточной воды – это EZ-вода. По этой причине электроотрицательность клеток может быть просто следствием электроотрицательности исключающей зоны.

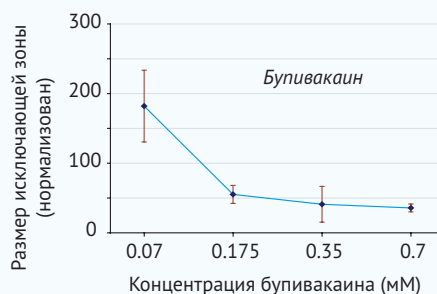
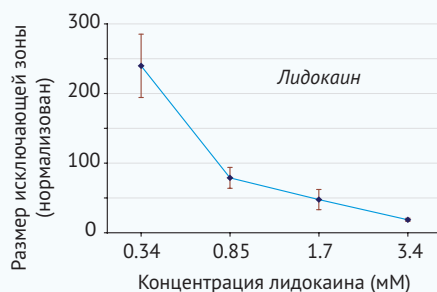
Помимо объяснения электроотрицательности клеток, гипотеза об исключающей зоне также объясняет электроотрицательность гелей: гели обычно демонстрируют большие отрицательные потенциалы, сходные с таковыми у клеток; но при этом у гелей нет мембраны, которая могла бы разделять ионы. С этой точки зрения мембраны кажутся почти ненужными. Если именно EZ-вода (а не предполагаемый мембранный механизм) обеспечивает электрическую активность клетки, наблюдение о том, что клетки, включая нервные, часто могут выживать, будучи разрезанными пополам, кажется менее парадоксальным.

Если в основе способности нервов передавать сигналы лежит EZ-батарея, то ликвидация батареи должна заблокировать сигналы, и тогда мозг не сможет получить сообщение. Местные анестетики делают именно это: болевые ощущения никогда не дохо-

дят до вашего мозга. Этот принцип работы является хорошим поводом для экспериментальной проверки: если в основе передачи сигналов лежит EZ-вода, анестетики должны уничтожать исключающую зону.

Чтобы проверить эту гипотезу, мы сформировали обычную исключающую зону и добавили анестетик местного действия. Клинические концентрации лидокаина или новокаина обратно уменьшали размер исключающей зоны в зависимости от концентрации (см. рисунок на врезке ниже). Местные анестетики действительно уничтожают исключающую зону, как мы и ожидали. Этот результат вряд ли удивит тех, кто читал старые публикации. В конце концов, Лайнус Полинг, легендарный химик XX века, предложил нечто подобное: тесную связь между действием анестетика и водой [4].

Помимо механизма анестезии, эти наблюдения предполагают наличие фундаментального механизма: электрические характеристики клетки определяются свойствами EZ-зоны. Будет интересно узнать, смогут ли дополнительные исследования подтвердить, что отрицательный потенциал клетки возникает из-за отрицательного заряда EZ-зоны.



5.4. ИЗВЛЕЧЕНИЕ НАКОПЛЕННОЙ ЭНЕРГИИ ИЗ EZ-БАТАРЕИ

Если разделенные заряды исключаяющей зоны действительно ведут себя как батарея, то мы можем извлекать из нее накопленную энергию. Разместив один электрод в исключаяющей зоне, а другой за ее пределами и соединив эти электроды через резистор, мы должны обнаружить электрический ток. Измерения показали, что накопленные заряды действительно создают ток (рис. 5.7).

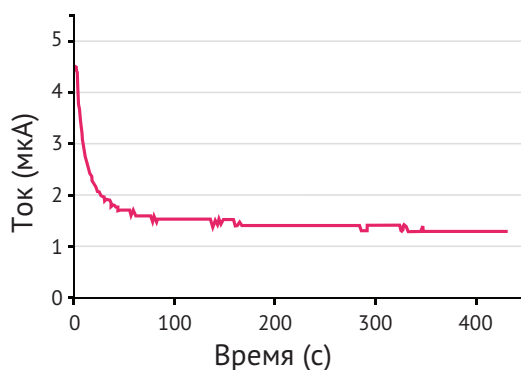
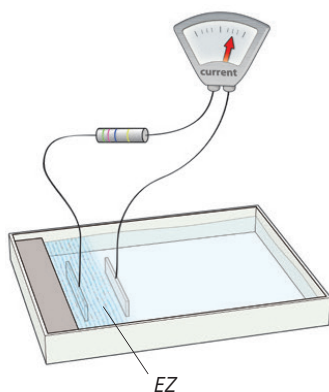


Рис. 5.7. Ток, вызываемый разделенными зарядами в исключаяющей зоне и за ее пределами. Ток начинает течь сразу после погружения электродов, сохраняя ненулевое значение плато в течение продолжительного времени

Следовательно, разделенные заряды – это не просто побочные продукты образования исключаяющей зоны; они могут питать нагрузку. Принцип работы похож на обычную батарею, но с более простой внутренней конструкцией: исключаяющая зона, имеющая отрицательный заряд, находится рядом с зоной объемной воды, содержащей положительный заряд.

Задумайтесь об этом. Вскоре после погружения гидрофильного материала в воду происходит образование исключаяющей зоны и разделение зарядов. (Разделение зарядов – это не бесплатный обед; вскоре мы разберемся с энергией, необходимой для разделения.) Разделенные заряды имеют сильную тенденцию к рекомбинации, однако остаются разделенными, потому что плотная решетка исключаяющей зоны удерживает свободные заряды от проникновения обратно в противоположно заряженную зону. Разделение формирует разность потенциалов, которая не превышает 100–200 мВ, но плотность зарядов в соответствующих зонах велика, поэтому батарея накапливает заметное количество энергии.

Водяные батареи такого типа существуют повсеместно, где гидрофильные поверхности взаимодействуют

с водой, – практически везде. Например, содержимое клетки окружено гидрофильной поверхностью, которая упорядочивает окружающую воду (см. врезку); следовательно, клетки содержат многочисленные нанобатареи. Водяные батареи также должны существовать в водных суспензиях и растворах, поскольку исключаящие зоны окружают взвешенные частицы или молекулы раствора (рис. 5.5). Даже емкости с водой могут вызвать разделение заряда на основе исключаящей зоны. В результате этих процессов образуются батареи, которые являются одним из проявлений четвертой фазы воды.

Эти батареи могут удивить тех, кто привык мыслить в стандартных рамках. Однако мы скоро увидим, что эта простая модель имеет огромную объясняющую способность. Ее потенциал раскроется, когда мы столкнемся с многочисленными явлениями, связанными с водой, от осмоса до образования льда.

5.5. НОСИТЕЛИ ЗАРЯДА И ВЫПОЛНЯЕМАЯ РАБОТА

Чтобы понять, как запасенная в таких батареях энергия может дойти до потребителя, необходимо понимать, какие типы носителей заряда участвуют в процессе. Тип носителя зависит от зоны. В исключаящей зоне носителями заряда являются электроны, которые принадлежат электроотрицательным атомам кислорода, распределенным по всей решетке зоны. Чем больше число атомов кислорода, тем больше число электронов.

Эти электроны способны легко перемещаться по всей решетке. Любое движение носителей заряда является электрическим током, и мы подтвердили существование тока. На рис. 5.7 показан ток, протекающий перпендикулярно слоям исключаящей зоны. Заряды могут также перемещаться параллельно исключаящей зоне. Проводимость, измеренная параллельно поверхностям, которые обычно образуют EZ-зону, в 100 000 раз выше, чем проводимость обычной воды [5]. Следовательно, электрические заряды решетки исключаящей зоны могут легко перемещаться во всех направлениях, точно так же, как, по мнению физиков, они движутся через кристаллические решетки полупроводников *n*-типа.

За пределами исключаящей зоны располагаются носители положительного заряда. Этими носителями номинально являются свободные протоны; однако фактическими носителями зарядов в объемной воде являются ионы гидроксония – положительно заряжен-

ные молекулы воды. Это происходит из-за того, что свободные протоны притягиваются к отрицательным зарядам, а электроотрицательные атомы кислорода воды обладают отрицательными зарядами. Вода изобилует ими, и поэтому протоны быстро связываются с ближайшими молекулами воды, образуя ионы гидроксония (H_3O^+). Ионы гидроксония отвечают за положительный заряд батареи, распределенный между обычными молекулами воды.

Положительно заряженная вода обладает потенциальной электрической энергией. Поскольку одинаково заряженные молекулы отталкиваются, ионы гидроксония рассеиваются в пространстве; это создает поток жидкости. Кроме того, любые отдаленно расположенные отрицательно заряженные области должны притягивать эти ионы гидроксония, способствующие дополнительному потоку жидкости. Позже мы увидим, как эти силы притяжения и отталкивания служат простейшим источником естественного движения воды.

Другими словами, и электроны исключавшей зоны, и распределенные по объему воды ионы гидроксония обладают значительным потенциалом для выполнения работы. Электроны могут двигаться через решетку исключавшей зоны в смежные области, испытывающие дефицит электронов. Ионы гидроксония могут приводить в движение потоки жидкости, а также инициировать реакции, требующие положительного заряда. Следовательно, оба этих вида заряженных частиц могут служить переносчиками значительного количества полезной энергии.

5.6. ИЗВЛЕЧЕНИЕ ПОЛЕЗНОЙ ЭНЕРГИИ

Как вы только что видели (рис. 5.7), электрическую энергию можно извлечь непосредственно из воды, поместив электроды в противоположно заряженные зоны водяной батареи. В связи с этим возникает вопрос, можем ли мы добывать полезную энергию.

Этот вопрос возник из разговора с российским коллегой Андреем Климовым, который впервые познакомил меня с электролизом воды. Андрей подозревал, что электролиз может привести к долговременному накоплению энергии в воде (аналогично тому, что мы позже обнаружили в системе с исключавшей зоной). Мы задумались над вопросом, насколько легко извлекать энергию, накопленную в результате электролиза.

В простом эксперименте с электролизом два платиновых электрода вставляют в заполненную водой камеру. На эти электроды подают постоянное напряжение величиной несколько вольт. Сначала ничего не происходит, но если поднять напряжение до достаточно высокого уровня, вы можете увидеть пузырьки газа на электродах. При меньшем напряжении пузырьки не появляются; тем не менее электрический ток все еще течет между электродами. Следовательно, заряды должны входить в воду и выходить из нее.

Чтобы определить, что происходит во время такого движения зарядов, мы добавили в воду pH-чувствительный краситель. Там явно что-то происходило (рис. 5.8). Вблизи катода изменение цвета указывало на высокий уровень pH; рядом с анодом цвет красителя указывал на низкий pH. Разница легко достигала шести единиц pH, что соответствует разнице в концентрации протонов в миллион раз. Постепенно соответствующие окрашенные зоны увеличивались, и вскоре значительные участки содержимого емкости были окрашены в тот или другой цвет. Вода в камере выглядела как цветная диаграмма: одна область с положительным зарядом и низким pH, другая с отрицательным зарядом и высоким pH (рис. 5.8).

Когда мы отсоединили источник питания, окрашенные участки оставались видимыми в течение нескольких десятков минут [6]. Мы могли бы ожидать немедленного исчезновения заряженных областей, если бы положительные и отрицательные заряды могли объединиться, но разделение сохранялось в течение значительного времени. Между тем через эти два электрода можно было извлечь электрическую энергию, ведь заряды оставались сосредоточенными в двух зонах.

Чтобы определить, какую часть накопленного заряда можно извлечь, мы разработали более точный количественный эксперимент (рис. 5.9). Мы разместили пластинчатые электроды на противоположных концах прямоугольной камеры и приложили к ним напряжение величиной несколько вольт. Цвет красителя изменился и разделился на две полукруглые области, как показано на рисунке. Затем мы отключили источник питания. Мы снова обнаружили, что через нагрузку, подключенную к электродам, может протекать ток. Мы могли бы извлечь его из тех же пар электродов, которые использовались для зарядки, или из новой пары электродов, расположенных в любых двух точках по

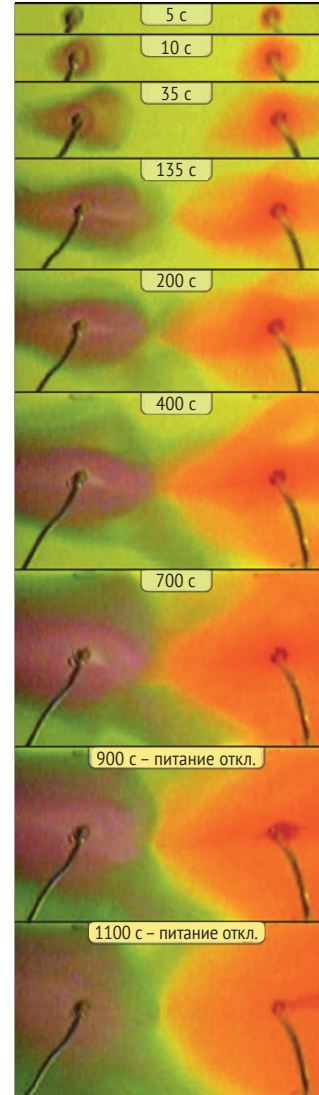


Рис. 5.8. Динамика распространения окрашенных областей при прохождении тока между проволочными электродами, которые погружены в воду, содержащую чувствительный к pH краситель. Оранжевый цвет соответствует низкому pH, пурпурный – высокому pH

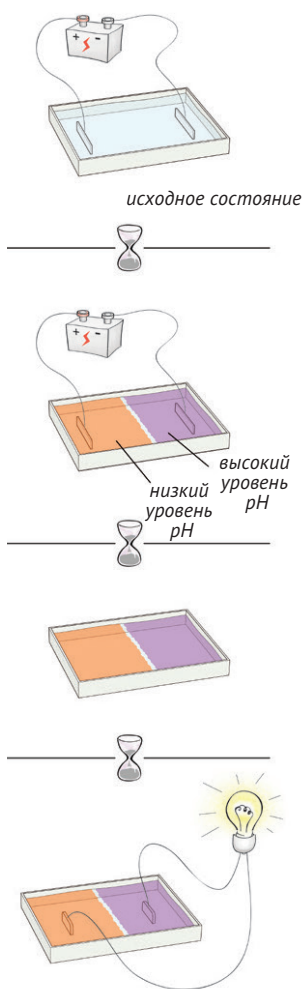


Рис. 5.9. Распространение окрашенных областей со временем при прохождении тока между проволочными электродами, которые погружены в воду, содержащую чувствительный к pH краситель. Оранжевый соответствует низкому pH, пурпурный – высокому pH

разные стороны от середины камеры. Нам удалось восстановить до 70 % входной энергии [7].

Разные цвета обычно сохранялись в течение десятков минут, что означает, что заряды не могут легко рекомбинировать. Вероятно, эти заряды находятся в EZ-подобных матрицах – в соответствующих зонах (рис. 5.8), которыми можно манипулировать при помощи постоянного магнита, перемещая или вращая их внутри камеры без существенного изменения их форм. Зоны вели себя как материальные объекты. Встраивание зарядов в структурированные матрицы, очевидно, удерживает заряды от рекомбинации.

Фактически мы подтвердили наличие структурированных матриц. Помните пик поглощения при 270 нм, который характерен для EZ-матриц (рис. 3.12)? Обе зоны показали пик поглощения волны 270 нм – отрицательная зона сильнее, а положительная зона слабее. Следовательно, сохраненные заряды находятся в структурных матрицах, и это объясняет их длительную устойчивость.

Мы показали, что EZ-батареи могут хранить заряд, причем делают это в течение длительного времени. Кроме того, они могут вернуть значительную часть этого заряда. В следующих главах мы увидим, как этот заряд может служить источником энергии для запуска различных процессов, от химических реакций до потоков жидкости. На самом деле EZ-батарея может быть универсальным поставщиком значительной части энергии для природных явлений.

5.7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Области воды рядом с гидрофильными поверхностями содержат исключаяющие зоны. Эти зоны разделяют заряды. Разделенные заряды образуют батарею (рис. 5.10).

Один полюс батареи – исключаяющая зона, обычно отрицательно заряженная вследствие избытка атомов кислорода. Другой полюс находится в зоне объемной воды, сразу за границей исключаяющей зоны; обычно он содержит положительные ионы гидроксония, которые могут свободно рассеиваться в соответствии с правилами электростатики. Притягиваясь к отрицательной области, многие ионы гидроксония накапливаются вблизи границы исключаяющей зоны.

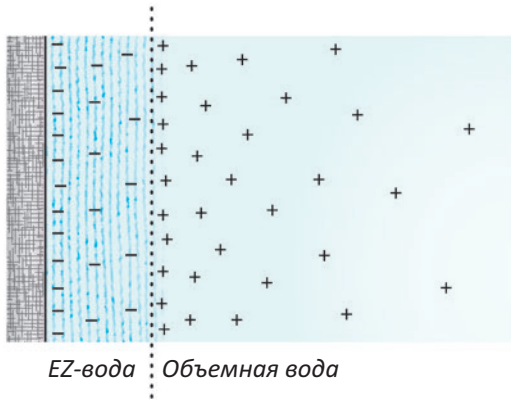
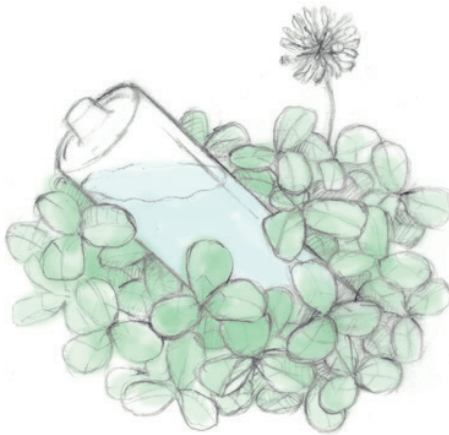


Рис. 5.10. Схематическое изображение водяной батареи на основе исключяющей зоны. Гидрофильная поверхность слева. Разделенные заряды могут перемещаться

Хотя механизм разделения зарядов теперь выглядит очевидным, этого нельзя сказать о механизме восполнения заряда. Как и батарея вашего мобильного телефона, водяная батарея будет постепенно разряжаться, так как противоположные заряды текут друг к другу и рекомбинируют. EZ-батарея тоже нуждается в подзарядке. Поскольку у природы нет настенных розеток, для выполнения этой работы необходим другой источник энергии.

Этот источник ускользал от нас в течение нескольких лет – пока случайное открытие не направило нас, наконец, по правильному пути. Поговорим об этом дальше.





Глава 6

Как заряжается водяная батарея

Именно размеренный, спокойный характер Джима помог нам напасть на золотую жилу – или, по крайней мере, найти ее эквивалент: практически бесplatный источник энергии.

Мы с моим докторантом Джимом Чжэном (Jim Zheng) ломали голову, пытаясь понять, какая энергия поддерживает заряд исключавющей зоны, и не могли найти ответ. Вы должны сначала построить и зарядить исключавшую зону; затем вы должны поддерживать ее отрицательный заряд вопреки стремлению положительных ионов проникнуть внутрь и нейтрализовать этот заряд. Таким образом, энергия нужна не только для первоначального разделения зарядов, но и для поддержания такого разделения перед лицом неизбежного саморазряда.

Что касается строительства зоны, у нас было предположение, что здесь работает «поверхностная энергия», присутствующая на границах раздела материалов. Тем не менее поверхностная энергия, похоже, не подходит: она может построить слой, ближайший к поверхности, но исключавшая зона простирается на сотни тысяч или даже миллионы и более слоев. Как может какой-то объект, расположенный на поверхности, действовать на таком огромном расстоянии? Очевидно, есть какой-то другой источник энергии.

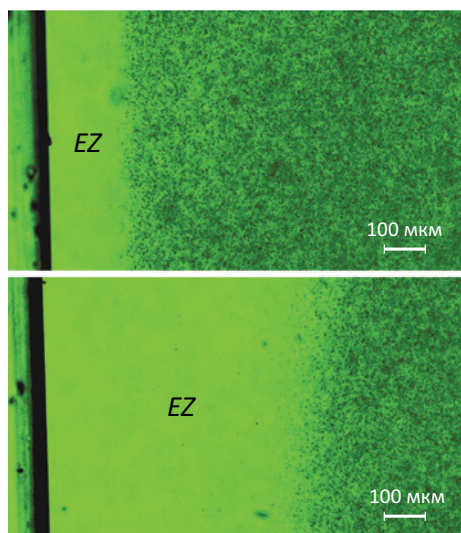
Что касается постоянной подзарядки, система нуждается в поступлении энергии для поддержания установившегося разделения зарядов. В отсутствие неисчерпаемого источника энергии механизм подзарядки, противостоящий естественному истощению батареи, казался необъяснимым. Источник этой энергии в то время оставался неясным – по крайней мере, для нас.

Первый намек на источник энергии мы получили совершенно случайно – от Джима, поддавшегося обычной человеческой слабости. Научная лаборатория похожа на любое другое рабочее место: по мере приближения вечера все чаще раздаются звуки голодного урчания в пустых желудках, люди спешат домой

и иногда пропускают стандартную процедуру завершения работы. Это случилось однажды вечером с Джимом. Он просто встал из-за рабочего стола, выключил лампу микроскопа и отправился домой на ужин.

Когда он вернулся на следующее утро и включил лампу микроскопа, чтобы продолжить работу, оказалось, что исключая зона уменьшилась до половины своего прежнего размера. В течение минуты или двух зона вернулась к своему первоначальному размеру, будто лампа микроскопа смогла ее оживить. Похоже, что освещенность имеет значение (рис. 6.1).

Рис. 6.1. Зона отчуждения, прилегающая к нафиону. Вверху: контрольный образец. Внизу: после нескольких минут воздействия света



Оглядываясь назад, мы понимаем, что роль света должна была быть очевидной. Когда я задал вопрос об источнике энергии во время лекции для старших курсов, тут же поднялась рука и, наполовину задавая вопрос, наполовину утверждая, один студент выпалил: «Свет?» Он попал в точку. У студента, талантам которого мы вскоре нашли применение в нашей лаборатории, вопрос не вызвал затруднений; но нам потребовалось несколько лет, чтобы найти ответ.

К тому времени, когда я читал эту лекцию, нам удалось с определенной уверенностью установить, что источником энергии был свет. Я должен уточнить: под «светом» я подразумеваю не только видимую часть электромагнитного спектра, но также ультрафиолетовую и инфракрасную части. Иными словами, вода поглощает электромагнитное излучение и использует полученную энергию для построения исключаяющей зоны и поддержания сопутствующего разделения заряда.

6.1. СВЕТ КАК ТОПЛИВО

Чтобы объяснить таинственный эффект расширения зоны под влиянием света, мы сначала рассмотрели потенциальную погрешность: вызванное светом повышение температуры. Падающий свет может нагревать камеру и, возможно, способствовать расширению исключочающей зоны. Мы быстро пришли к выводу, что это маловероятно: быстрый рост исключочающей зоны начался сразу после включения света – задолго до того, как вода в камере могла заметно нагреться. Последующие эксперименты подтвердили этот вывод: даже после пятиминутной экспозиции, которая привела к значительному расширению зоны, температура поднялась лишь на незначительную величину. По-видимому, влияние света было нетепловым: фотоны каким-то образом отдавали свою энергию для роста исключочающей зоны.

Это был захватывающий момент. Оказалось, что солнечный свет может снабжать воду энергией, необходимой для наведения порядка и разделения заряда; *всю необходимую работу могла делать окружающая среда*. Вы только представьте: солнечная энергия может заряжать водяную батарею почти так же, как солнечная энергия обеспечивает фотосинтез. Вот это да!

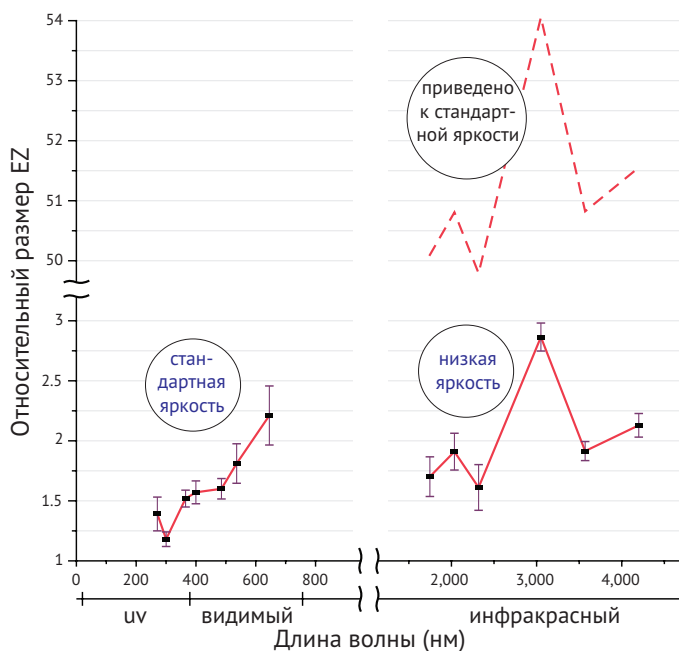
Справившись с первым волнением, мы задали очевидный вопрос: какие световые волны несут ответственность за рост исключочающей зоны? Некоторые лампы обычных микроскопов (и солнечного света) генерируют широкий диапазон длин волн; диапазон охватывает видимый свет, а также ультрафиолетовое и инфракрасное излучение. Мы задавались вопросом, могут ли определенные длины волн работать более эффективно, чем другие.

Чтобы ответить на этот вопрос, мы направляли на экспериментальную камеру свет с разными длинами волн. В качестве источника света использовались светодиоды. Светодиоды излучают свет с определенной длиной волны, от ультрафиолетового до видимого и инфракрасного. Используя эти светодиоды по одному, мы направляли свет на экспериментальную камеру, в которой находилась полоска нафiona, погруженная в воду. Вода содержала микросферы. Мы хотели увидеть, насколько сильно ширина исключочающей зоны зависит от длины волны.

Результаты подтвердили, что длина волны имеет значение [1]. На рис. 6.2 показано, что произошло с размером исключочающей зоны после пятиминутного воз-

Рис. 6.2. Влияние длины волны падающего света на рост исключаяющей зоны. Соотношение размеров EZ-зоны (ордината) относится к размеру зоны в конце пятиминутного воздействия света относительно ее размера перед воздействием света. По техническим причинам данные в правой части рисунка были получены с источниками света низкой интенсивности. Интенсивности, аналогичные тем, которые использовались для получения данных слева, привели бы к сдвигу графика вверх, как это показано пунктирной кривой выше

действия света на каждой из последовательных длин волн. Падающий свет был достаточно слабым, и к концу воздействия температура в камере никогда не поднималась более чем на 1 °С. На вертикальной оси показана степень увеличения зоны – отношение 2, например, указывает на то, что освещение привело к удвоению размера исключаяющей зоны.



На графике видно, что расширение зоны происходит на всех длинах волн, но некоторые длины волн были более эффективными, чем другие. Ультрафиолет (в том числе 270 нм) был наименее эффективным, видимый свет несколько более эффективен, а самым эффективным оказался инфракрасный свет, особенно с длиной волны 3000 нм, что сначала нас удивило. Позже мы поняли, что волны с длиной 3000 нм наиболее сильно поглощаются водой. Это означает, что свет с наиболее поглощаемой длиной волны более эффективно стимулирует рост исключаяющей зоны – достаточно хорошая корреляция.

Мы также обнаружили, что увеличение длительности экспозиции и интенсивности света приводит к дальнейшему расширению исключаяющей зоны. Рисунок 6.2 был получен с использованием пятиминутных экспозиций. При более длительных выдержках с одинаковой интенсивностью мы смогли увеличить зону в пять-де-

сять раз. Отключение этого дополнительного источника света привело к тому, что зона вернулась к своему обычному размеру за несколько десятков минут.

Я должен объяснить загадочную пунктирную кривую в верхней части рис. 6.2. Источники инфракрасного излучения, доступные в нашей лаборатории, были слабыми – в 600 раз менее интенсивными, чем источники видимого света и ультрафиолета. Поэтому правый график, безусловно, располагается намного ниже того уровня, на котором он оказался бы при использовании источников инфракрасного света, столь же мощных, как источники видимого света. Но насколько ниже – точно неизвестно. Пунктирная кривая пытается исправить это несоответствие; она представляет собой оценочную кривую из расчета использования эквивалентных источников инфракрасного света.

Очевидно, *инфракрасные волны играют доминирующую роль*. Ультрафиолет не играет почти никакой роли. (О последствиях поглощения ультрафиолетовой энергии исключаяющей зоной мы поговорим ниже.) Видимый свет играет умеренную роль. Таким образом, при строительстве исключаяющей зоны наиболее полезны инфракрасные (ИК) волны.

ИК-энергия была, вероятно, ключевым фактором в непреднамеренном ночном эксперименте Джима. Когда Джим случайно погасил лампу микроскопа в конце дня, он уменьшил падающее ИК-излучение, что, в свою очередь, уменьшило размер исключаяющей зоны. Когда он снова включил лампу на следующее утро, вернув ИК-излучение до уровня предыдущего дня, исключаяющая зона быстро вернулась к своему прежнему размеру.

Оплошность Джима побудила нас более углубленно исследовать влияние ИК-излучения (рис. 6.3) – поместив камеру с полностью построенной исключаяющей зоной в изолирующий контейнер (так называемый дьюар). Обычный термос может сохранять охлажденные напитки холодными, блокируя падающее ИК-излучение.

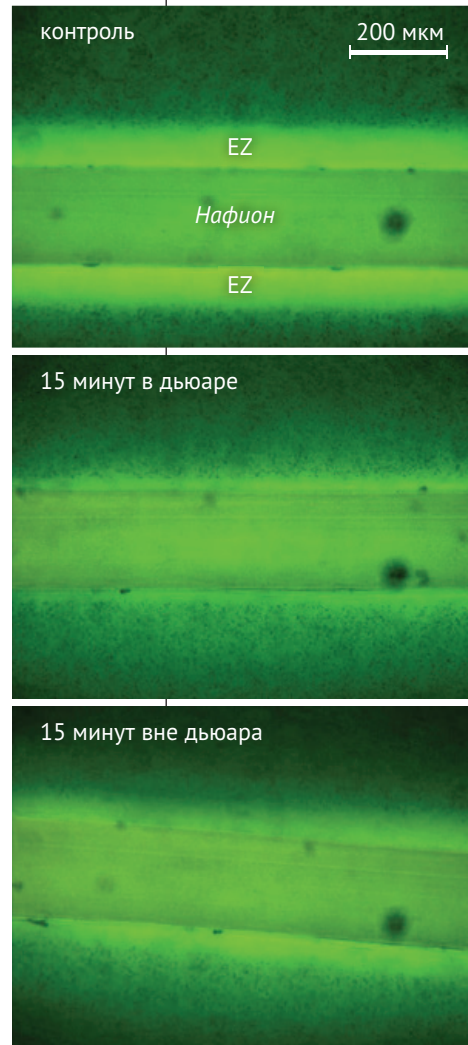


Рис. 6.3. Уменьшение интенсивности потока инфракрасной энергии приводит к уменьшению размера исключаяющей зоны. После извлечения камеры из дьюара зона возвращается к исходной величине.

Дьюар делает то же самое, но блокирует ИК-волны еще эффективнее. После 15 минут нахождения в дьюаре исключая зона уменьшилась примерно до половины своего прежнего размера. После извлечения камеры из дьюара зона вернулась к исходному размеру в течение нескольких минут. Таким образом, инфракрасный эффект работает в обоих направлениях: увеличение интенсивности инфракрасного излучения увеличивает зону, в то время как ослабление интенсивности приводит к уменьшению зоны.

Рис. 6.4. Инфракрасная энергия излучается даже в полной темноте



Задумайтесь о том, что это означает (рис. 6.4). Поскольку инфракрасная энергия наиболее полезна для исключаяющей зоны, а ИК-излучение присутствует повсюду, то для строительства EZ-зоны всегда есть бесплатное топливо.

Рис. 6.5. Инфракрасное изображение, полученное в темноте. Более яркие цвета обозначают относительно более высокие интенсивности



В отличие от видимого света, который может исчезнуть по щелчку выключателя, инфракрасный свет трудно отключить – ИК-камеры без проблем фиксируют изображения едущих танков или людей даже в полной темноте (рис. 6.5).

Даже ваша комната излучает инфракрасный свет. Наружные стены вашего дома поглощают лучистую энергию солнца и излучают эту энергию на разных длинах волн. В свою очередь, внутренние стены дома интенсивно испускают инфракрасное излучение независимо от того, включен свет или нет. Инфракрасное излучение присутствует всегда. Считайте, что это бесплатный дар природы.

6.2. ПАДАЮЩАЯ ЭНЕРГИЯ МОЖЕТ РАЗДЕЛЯТЬ МОЛЕКУЛЫ ВОДЫ

Как энергия света помогает построить исключаящую зону?

Свет универсален. Помимо создания изображений, свет делает много чудесных вещей, потому что энергия фотонов легко превращается в другие виды энергии, например:

- падающий свет одной длины волны преобразуется в свет другой длины волны, вызывая флуоресценцию;
- свет служит источником энергии для хаотичного броуновского движения (глава 9);
- свет высвобождает электроны в полупроводниках для производства фотоэлектрического эффекта;
- свет служит катализатором химических реакций;
- свет разделяет заряды при фотосинтезе.

Учитывая универсальность света при преобразовании энергии столь разными способами, обнаружение того факта, что свет приводит к формированию исключаящей зоны, не должно стать полной неожиданностью. Это нарастание упорядоченности и сопутствующее ему разделение заряда просто образуют еще одну последовательность вызванных светом преобразований – ничего особенно удивительного. На самом деле упорядочение под действием света уже было экспериментально продемонстрировано в других системах [2]. Следовательно, рост исключаящей зоны под действием света не является ни экзотическим, ни странным. Задача заключается в разгадке механизма, лежащего в основе этого явления.

Логическим ключом к этому механизму является тот факт, что рост исключаяющей зоны может происходить при воздействии не только света, но и других источников энергии. Например, мы обнаружили, что исключаяющая зона реагирует на воздействие ультразвука. Мы применили ультразвук с частотой 7,5 МГц, аналогичный тому, который используют для УЗ-исследования плода в акушерстве. В ответ на воздействие исключаяющая зона обычно сужается, возможно, в результате механического движения молекул, трущихся друг о друга. Однако стоит отключить ультразвук, как исключаяющая зона сразу же совершает удивительный рывок роста: она может увеличиться в пять или шесть раз по сравнению с первоначальным размером, прежде чем в конечном итоге вернуться к уровням до воздействия. Очевидно, что акустическая энергия как-то влияет на воду, что приводит к задержке роста исключаяющей зоны – точно так же, как воздействие света может вызвать рост зоны.

Поскольку обнаружилось, что исключаяющие зоны могут возникать под действием различных агентов, маловероятно, что свет строит исключаяющую зону путем непосредственного расщепления молекулы воды. Любое такое расщепление, вероятно, возникало бы в узко определенной полосе длин волн, энергия которых разрушала бы молекулу воды за счет резонанса. Вместо этого мы наблюдаем эффект в широком диапазоне длин волн как внутри оптического спектра, так и за его пределами. В дополнение к этому фотоны инфракрасного света имеют низкую энергию по сравнению, скажем, с фотонами ультрафиолета – настолько низкую, что физики считают ИК-свет совершенно неспособным расщепить молекулу воды. Тем не менее эти инфракрасные фотоны являются наиболее эффективными строителями исключаяющей зоны.

Похоже, что лучистая энергия действует тоньше, чем прямое разрушение молекулы воды; скорее всего, падающий свет просто делает возможным это разрушение. В таком случае разделение заряда будет происходить на более поздней стадии.

Хотя природа этого более тонкого механизма до конца не ясна, разумное предположение состоит в том, что внешняя энергия отделяет молекулы воды друг от друга (рис. 6.6). То есть поглощенная энергия ослабляет межмолекулярные связи. Более глубокие рассуждения на эту тему вряд ли имеют смысл, потому что структура объемной воды остается загадкой.

Мы знаем, что составляющие воду молекулы должны быть как-то связаны друг с другом, иначе вода была бы газом, а не жидкостью. Что касается того, как они связаны, некоторые ученые отстаивают временные межмолекулярные связи, в то время как другие выступают за упорядоченные кластеры, которые связаны друг с другом за счет квантово-механических эффектов (см. главу 2); эти упорядоченные кластеры могут быть реорганизованы для строительства исключаяющей зоны, как предполагают авторы недавней работы [3].

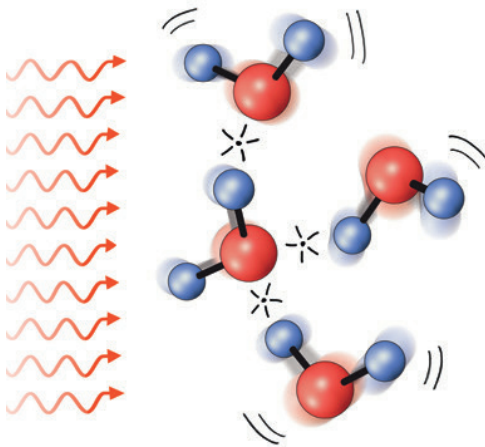


Рис. 6.6. Поступающая энергия может отделять молекулы воды друг от друга

Таким образом, поступающая энергия может ослабить связи между молекулами или кластерами воды, освобождая молекулы воды для участия в новых «социальных» связях. Это может быть первым шагом в процессе формирования исключаяющей зоны.

6.3. ФОРМИРОВАНИЕ ИСКЛЮЧАЮЩЕЙ ЗОНЫ

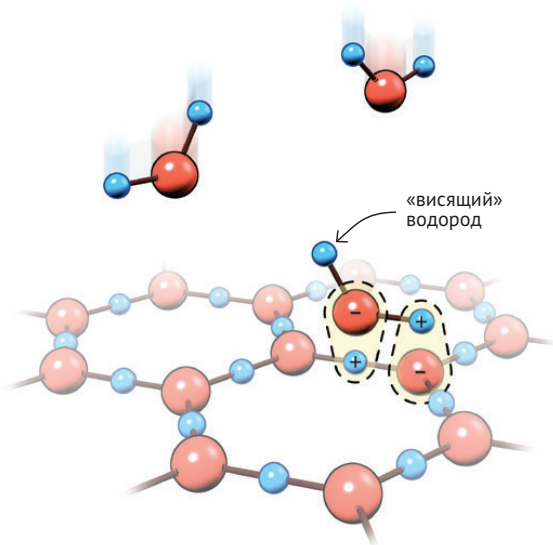
Второй шаг предполагает осуществление процесса сборки исключаяющей зоны. Отделенные друг от друга молекулы воды должны собираться на ее растущей решетке. Давайте предположим, что несколько ячеистых слоев уже сформировались, и подумаем, как недавно освобожденные молекулы воды могут собраться на наружном слое исключаяющей зоны, чтобы построить следующий слой.

Молекула воды содержит отрицательные и положительные заряды, разделенные небольшим промежутком. Каждый из этих обособленных зарядов должен притягиваться к противоположным зарядам, лежа-

щим на открытой поверхности решетки (рис. 6.7). Молекула притягивается к решетке. Молекулы оседают одна за другой, в результате чего растет очередной сотовый слой.

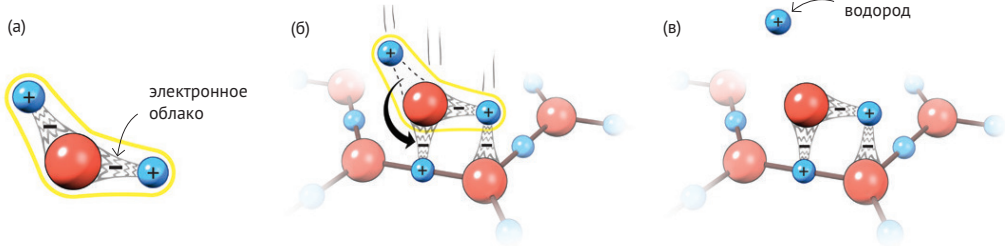
Хотя этот процесс кажется простым, возникает неудобное препятствие: атом водорода торчит из решетки. На рис. 6.7 показано, что как только молекула воды присоединяется к решетке, один из ее атомов водорода остается незакрепленным. Если этот водород остается на месте, то следующий слой не может быть построен. Следовательно, для продолжения формирования решетки необходимо убрать торчащие атомы водорода. Нужно как-то избавиться от этих раздражающих протонов.

Рис. 6.7. Строительство исключаяющей зоны. Молекулы объемной воды притягиваются к открытому слою исключаяющей зоны, поскольку поверхностные заряды слоя притягиваются к противоположным зарядам на молекуле воды. После притяжения молекулы остается торчащий атом водорода



Избавление от «лишних» протонов может происходить естественным путем. Чтобы понять этот механизм, рассмотрим электронные облака молекулы воды (рис. 6.8). Отрицательные электронные облака кислорода ориентированы в сторону положительного заряда (а). У одиночной молекулы эти облака ориентированы на ядра водорода; образующиеся ОН-связи сохраняют молекулу воды в целости. Эта аккуратная картина меняется, когда молекула воды оседает на решетке исключаяющей зоны (б): когда молекула притягивается, электронное облако кислорода поворачивается, по крайней мере, частично в сторону решетки; это облако – клей, помогающий связать молекулу с решеткой.

Однако для «лишнего» атома водорода этот сдвиг электронов имеет решающее значение. Клей, который раньше связывал этот водород с кислородом в молекулу воды, переключился на решетку. Можно сказать, что висящий водород отклеился от молекулы и превратился в одинокий протон (в).



Процесс отторжения протона также можно рассматривать с точки зрения изменения энергии. Когда каждая новая молекула воды занимает свое место на решетке, высвобождается энергия. Это высвобождение происходит потому, что противоположно заряженные объекты, лежащие на расстоянии друг от друга, обладают заметной потенциальной энергией, но по мере их сближения эта потенциальная энергия высвобождается в систему. Ситуация напоминает разноименные полюса магнитов, которые отдают потенциальную энергию, когда притягиваются друг к другу. Здесь эта свободная энергия не пропадает зря: она отсекает лишний атом водорода.

Таким образом, как с точки зрения структуры, так и с точки зрения энергетики получается одинаковый результат: высвобождение протона. Свободный протон несет положительный заряд, который теперь отделен от отрицательной решетки исключаяющей зоны. Фактически молекула воды разделилась, чтобы обеспечить рост решетки.

Благодаря этому механизму сразу за растущим фронтом исключаяющей зоны накапливаются свободные заряды протонов (рис. 5.3). Некоторые из этих зарядов, отталкивая другие, будут быстро диффундировать в свободную воду. Эта диффузия имеет практическое значение: если каждый из положительно заряженных объектов будет оставаться на границе исключаяющей зоны, они засорят границу, молекулы воды из зоны объемной воды больше не смогут получить к ней доступ и исключаяющая зона быстро перестанет расти.

Рис. 6.8. Когда молекула воды связывается с решеткой, происходит сдвиг электронного облака. Этот сдвиг освобождает висящий протон

Но это еще не вся история. Как я упоминал ранее, свободные протоны на самом деле недолговечны. Будучи свободными частицами с положительным зарядом, эти протоны будут стремиться к чему-нибудь электроотрицательному поблизости, почти так же, как многие парни-подростки стремятся к оказавшейся поблизости девушке – подойдет почти любой кандидат. Для положительно заряженного протона обычно ближайшим аттрактором является электроотрицательный кислород молекулы воды. Протон вступит в связь с этим кислородом, образовав H_3O^+ . Этот так называемый ион гидроксония является не чем иным, как положительно заряженной молекулой воды – особой молекулярной сущностью, помогающей объяснить все виды движения воды, как я расскажу ниже.

Итак, когда мы говорим о динамике свободных протонов, мы на самом деле обсуждаем динамику свободных ионов гидроксония. Ионы гидроксония являются долгоживущими заряженными частицами. Это те частицы, которые диффундируют в окружающей воде.

Однако главная тонкость заключается в том, что отделение протона от молекулы воды является *вторичным* явлением; оно происходит, когда молекула воды оседает на растущей решетке исключаяющей зоны. Поглощенная лучистая энергия, которая управляет всем процессом, напрямую не отделяет протон от воды. Эта лучистая энергия может просто ослабить основную структуру воды, освобождая отдельные молекулы воды для строительства. Затем прилипание молекулы воды к решетке приводит к высвобождению свисающего протона в окружающую воду, где он стремится образовать ион гидроксония. Благодаря этим процессам исключаяющая зона продолжает расти, а водяная батарея продолжает заряжаться.

Стоит задуматься над тем, каким образом отрицательно заряженная решетка продолжает накапливать отрицательный заряд. Притяжение отрицательного к отрицательному кажется нелогичным. Однако это не совсем то, что происходит на деле. К отрицательно заряженной решетке прикрепляется нейтральная молекула воды. Она притягивается к ячеистой структуре исключаяющей зоны, потому что ее отрицательные и положительные заряды приближаются соответственно к положительным и отрицательным зарядам решетки. Эти противоположные заряды сильно притягиваются из-за их непосредственной близости, поэтому молекула воды прилипает к решетке. И только

потом положительно заряженный протон отбрасывается энергетически выгодным способом, увеличивая отрицательный заряд решетки. Этот поэтапный процесс позволяет накапливать высокие концентрации отрицательного заряда.

Процесс строительства не продолжается вечно; в конце концов он заканчивается. Иногда возникают стержневые выбросы исключющей зоны, которые продолжают рост, но основная часть в конечном итоге достигает относительно стабильного размера. Возникают вопросы: почему прекращается рост исключющей зоны? Как и почему уменьшается исключая зона при уменьшении освещенности?

6.4. РАЗРУШЕНИЕ ИСКЛЮЧАЮЩЕЙ ЗОНЫ

Здесь, как и везде, мы находим силы природы в действии. Упорядоченные структуры, оставленные в покое, в конечном итоге разрушаются. Рост энтропии является фундаментальным законом термодинамики. Это похоже на вашу комнату: она может стать захламленной бесчисленным количеством способов и лишь в нескольких случаях будет выглядеть чистой и аккуратной. Чтобы добиться порядка в комнате, требуется энергия (рис. 6.9). Если вы не будете вкладывать эту энергию постоянно, ваша комната неизбежно станет такой же грязной, как, ну ... моя.



Рис. 6.9. Поддержание порядка требует значительных затрат энергии. Возврат к исходному беспорядку требует гораздо меньше энергии

Сказанное относится и к исключаяющей зоне. Порядок не может существовать без постоянного поступления энергии. Разделенные заряды будут медленно рекомбинировать, и порядок уступит место беспорядку. Внешние области исключаяющей зоны будут разрушаться, как пляж под набегающими волнами. Вот что произошло в случайном ночном эксперименте: исключаяющая зона уменьшилась, потому что был отключен основной источник энергии. Когда утром поступление энергии возобновилось, исключаяющая зона вернулась к своему прежнему размеру.

Чтобы понять, от чего зависит размер исключаяющей зоны, нам нужно рассмотреть баланс между энергозависимым ростом и естественной тенденцией к разрушению. Когда эти два процесса сбалансированы, исключаяющая зона достигает постоянного размера. Мы только что рассмотрели процесс роста, а факторы, ограничивающие рост, такие как шероховатость поверхности и степень гидрофильности, рассматривались ранее. С другой стороны, мы едва затронули процесс разрушения. Как именно разрушается исключаяющая зона?

Чтобы ответить на этот вопрос, нам нужно рассмотреть внешние границы исключаяющей зоны, наиболее подверженные разрушению. Там электрический потенциал уменьшается почти до нуля, что, вероятно, означает, что некоторые висащие протоны остаются встроенными в решетку и/или решетка является относительно более открытой (глава 4 и рис. 6.10).

Открытая решетка подразумевает легкое проникновение молекул. Наиболее вероятными кандидатами на проникновение являются ионы гидроксония, поскольку их положительные заряды неизбежно притягиваются к высокому отрицательному заряду внутренностей исключаяющей зоны. Таким образом, ионы гидроксония проникают в долины между пиками исключаяющей зоны.

Это вторжение не обходится без последствий. Проникнув, эти положительные ионы будут быстро пойманы с флангов отрицательно заряженными молекулами исключаяющей зоны. Результатом является слияние, о котором я упоминал ранее: H_3O^+ , объединяясь со структурным элементом решетки (OH^-), дает две молекулы воды (рис. 6.11). Это слияние ослабляет гексамерную структуру исключаяющей зоны.

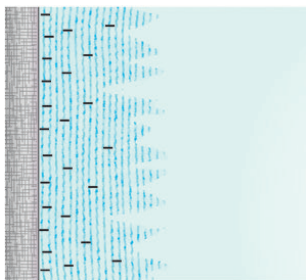


Рис. 6.10. Зубчатые внешние границы исключаяющей зоны. Ионы гидроксония проникают в долины между горными вершинами из-за притяжения к отрицательным зарядам

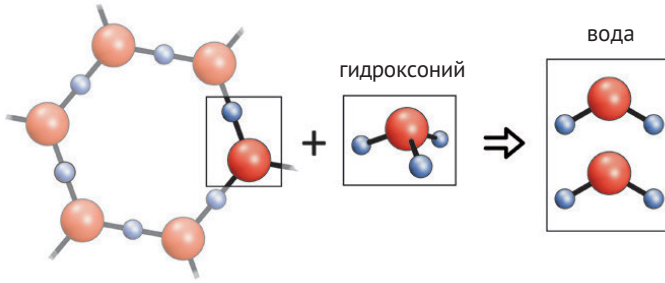


Рис. 6.11. Естественная эрозия исключаяющей зоны. Объединение иона гидроксония со структурным элементом зоны извлекает этот элемент из решетки, в результате чего образуется две молекулы воды

Итак, мы вернулись к тому, с чего начали: элемент пространственной решетки вернулся в воду, и система сделала шаг назад. Система достигает стабильного размера при достижении баланса между строительством и разрушением, то есть когда строительство исключаяющей зоны под воздействием энергии извне уравнивает естественное разрушение.

Этот баланс может измениться при изменении условий окружающей среды. В кислой среде находящиеся в избытке в окружающей воде ионы гидроксония должны постоянно разрушать внешний слой исключаяющей зоны, смещая баланс в сторону уменьшения зоны. Мы подтвердили это экспериментально: в достаточно кислой среде исключаяющая зона уменьшается. Точно так же исключаяющую зону разрушают соли. Возьмем NaCl: в то время как компонент Cl^- может объединяться с ионами гидроксония H_3O^+ в окружающей воде, образуя $\text{HCl} + \text{H}_2\text{O}$, положительный Na^+ может вторгаться в отрицательно заряженную решетку и создавать там NaOH, отрывая элемент решетки OH⁻. При этом из решетки исключаяющей зоны высвобождается молекула воды. Везде, где решетка частично открыта, положительные ионы любого вида могут проникать внутрь и вызывать эрозию исключаяющей зоны.

В целом исключаяющая зона уменьшается в результате процесса, который в значительной степени является обратным процессу построения. Зона строится из притягивающихся молекул воды, прилипающих к решетке и отбрасывающих протоны, многие из которых сразу становятся ионами гидроксония. Зона разрушается, когда ионы гидроксония проникают в отверстия решетки и извлекают элементы решетки, образуя воду. Точка равновесия будет зависеть от того, сколько энергии поступает в систему: чем больше поступление энергии, тем больше исключаяющая зона, и наоборот.

6.5. СВОБОДНЫЕ РАДИКАЛЫ

Ни один процесс не идеален, включая динамику разрушения исключаяющей зоны. Центральным элементом этой динамики является элемент структуры OH^- . Исключаяющая зона строится путем фиксации этих элементов OH^- в решетке по одному за раз, в то время как при разрушении эти элементы так же по одному высвобождаются в окружающую воду. Процесс, таким образом, обратим – более или менее. Он полностью обратим при условии, что ионы гидроксония всегда оказываются под рукой, чтобы поглотить каждый освобожденный OH^- с образованием воды; тогда система вернется к исходному состоянию.

Предположим, однако, что где-то образовался дефицит ионов гидроксония и поэтому они не могут выполнять свою работу. Это может произойти, например, если отрицательно заряженный объект, расположенный на заметном расстоянии от исключаяющей зоны, притянет ионы гидроксония. Тогда не окажется партнера для нейтрализации элемента OH^- , поэтому цикл не может быть завершен. Аналогичное нарушение цикла может возникнуть из-за возмущения самой исключаяющей зоны: предположим, что какой-то испытывающий недостаток электронов процесс отнимает часть отрицательного заряда исключаяющей зоны, лишая освобожденные элементы решетки своего обычного отрицательного заряда. И снова цикл не сможет продолжаться. Проблемы такого рода могут нарушить обычный ход вещей.

В подобных случаях схема обратимых циклов, описанная выше, не будет такой точной и аккуратной. Вместо того чтобы возвращать молекулы воды, при распаде исключаяющей зоны начнут появляться различные альтернативные формы кислорода, которые затем будут попадать в окружающую воду. Природа этих форм кислорода будет зависеть от характера нарушения нормального процесса.

Альтернативные формы кислорода обычно известны как свободные радикалы; иногда, из-за их высокой реакционной способности, их называют активными формами кислорода (АФК). Наиболее распространенный супероксидный радикал содержит два атома кислорода с одним отрицательным зарядом. Другой, радикал OH , не несет заряда. Еще одной АФК является H_2O_2 , или перекись водорода. Все они содержат кислород, и теоретически все они могут возникнуть в результате разрушения исключаяющей зоны.

Высокая реакционная способность этих радикалов может вызвать проблемы. Она подразумевает мгновенное связывание со многими веществами и возможное влияние на эти вещества. В живых системах эти реакции могут вызывать отравление: например, супероксидный радикал является мощным убийцей микроорганизмов.

Неудивительно, что природа прилагает все усилия, чтобы устранить эти радикалы и предотвратить нежелательные последствия. Поэтому каждая клетка в вашем организме содержит фермент, называемый супероксиддисмутазой, или СОД. СОД нейтрализует возникающие супероксидные радикалы почти так же быстро, как они образуются. Вездесущность этого фермента оставалась загадкой. С другой стороны, если свободные радикалы встречаются в качестве естественных побочных продуктов динамики исключаяющей зоны, тогда повсеместное распространение фермента становится понятным: поскольку исключаяющие зоны образуются практически везде, СОД также должен быть практически везде.

6.6. ЖИЗНЬ В МОРСКИХ ГЛУБИНАХ

Понимание характера этих энергетических процессов может помочь разгадать некоторые из тайн природы, и я не могу не упомянуть здесь об одной из них: почему в морской глубине проживает так много живых существ? На этих глубинах отсутствует не только растворенный кислород, но и свет. Организмы не могут ни дышать, ни фотосинтезировать. Это должно сделать жизнь невозможной, но, как это ни парадоксально, она процветает (рис. 6.12). Каждый раз, когда берется глубоководная проба, ученые находят все больше и больше новых видов. Даже те бактерии, которые должны обязательно фотосинтезировать, не испытывают трудностей в такой темной среде [4].

Описанные ранее энергетические процессы могут объяснить эту загадку. Хотя предельные глубины, конечно, не получают видимого света, они не испытывают недостатка в инфракрасном свете. Инфракрасная энергия исходит от самой Земли, и особенно от теплых провалов, которые испещряют дно океана. Инфракрасные волны способствуют созданию исключаяющих зон и разделению зарядов. Процесс разделения зарядов имеет много общего с начальными этапами фотосинтеза, когда расщепляются молекулы воды;



Рис. 6.12. Жизнь в глубоководье. Глубоководный морской угорь, существо с морского дна, добытое в Калифорнийском заливе. Предоставлено NOAA (Wikipedia Commons)

следовательно, бактерии и другие глубоководные существа могут использовать этот механизм для получения энергии.

Кроме того, вблизи океанского дна вообще отсутствует кислород. Построенные за счет ИК-излучения исключаяющие зоны содержат много кислорода; следовательно, кислород может поступать из исключаяющих зон. Мой коллега Владимир Воейков называет этот процесс «сжиганием» воды. В воде может отсутствовать растворенный кислород, но пока существуют исключаяющие зоны, достаточное количество кислорода остается доступным для подпитки жизненных процессов.

Таким образом, несмотря на унылость глубоководной среды, мы можем понять изобилие жизни на этих крайних глубинах – энергии и кислорода там достаточно. В любом случае, эта дискуссия о глубоководной жизни была открыта только для того, чтобы пробудить у вас интерес к биоэнергетике: лежащие в ее основе энергетические процессы имеют основополагающее значение не только для глубоководной жизни, но и для большей части природы. Мы рассмотрим более широкие последствия этих энергетических процессов в следующей главе.

6.7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исключаяющая зона строится за счет энергии света, особенно инфракрасного. Инфракрасная энергия доступна даже при выключенном освещении. Аналогичную работу способна выполнять акустическая энергия. Судя по всему, подобная энергия отделяет молекулы воды в объемной фазе воды друг от друга, освобождая их для построения исключаяющей зоны. Привлеченные к растущей зоне электростатическими силами, освобожденные молекулы воды собираются на решетке. Это приводит к росту исключаяющей зоны и сопутствующему разделению заряда. Как следствие увеличивается заряд водяной батареи.

Процесс строительства исключаяющей зоны отвечает на вопрос предыдущей главы о том, каким образом слои могут быть упакованы так плотно. Отрицательные заряды отталкиваются; следовательно, исключаяющая зона должна разлететься на части. Однако электронные облака приклеивают каждый новый элемент к растущей решетке, поддерживая целостность этой решетки. Эти электронные облака можно сравнить с выступами, которые удерживают кусочки

пазла вместе (рис. 6.13). Несмотря на взаимное отталкивание, кусочки остаются прочно сцепленными.

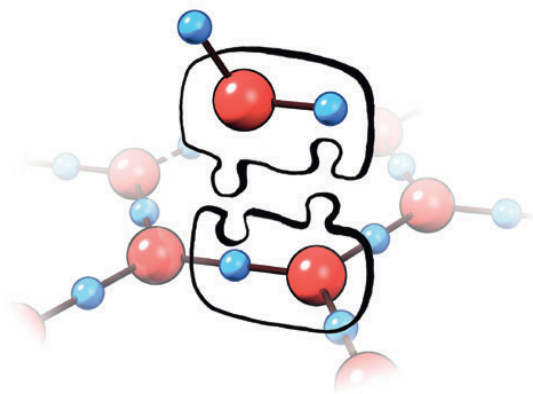
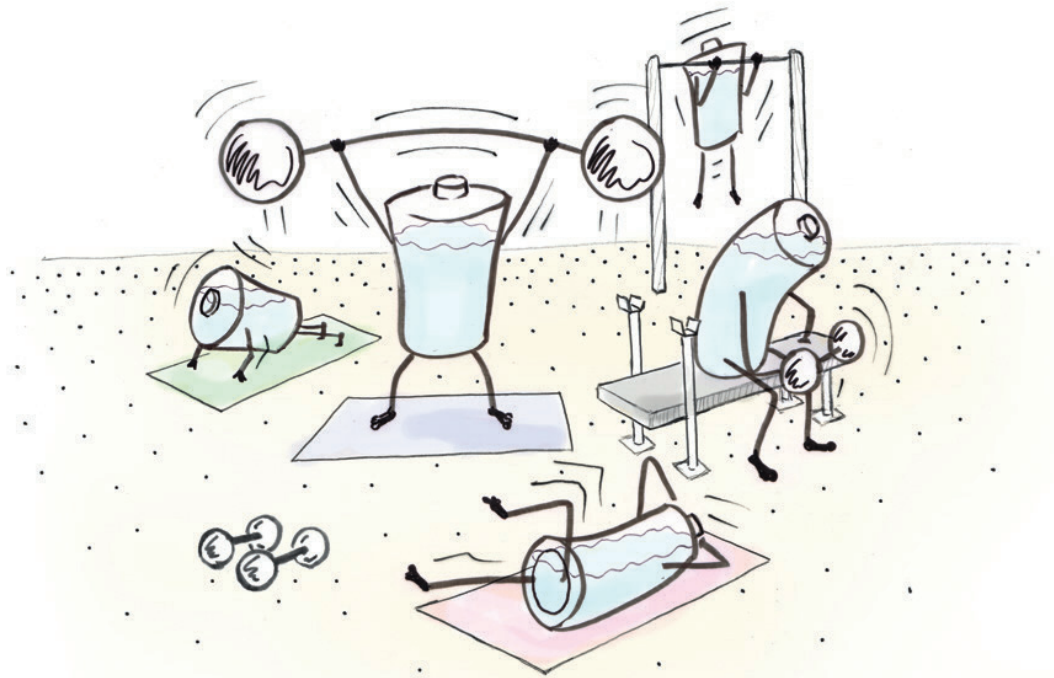


Рис. 6.13. Добавление элементов в решетку. Несмотря на отталкивание, «кусочки пазла» остаются связанными друг с другом замковыми соединениями

Если исключаящей зоне не хватает поступающей извне энергии, она начинает разрушаться. Отделенные заряды неизбежно стекают обратно в решетку. Когда это происходит, элементы решетки исключаящей зоны разлагаются обратно до молекул воды, из которых эта решетка была построена. Если поступающей извне энергии не хватает, чтобы противостоять этой эрозии, процесс роста меняется на противоположный, и водяная батарея разряжается.

Когда условия обратного процесса не соответствуют идеальным, вместо воды могут образовываться кислородные радикалы. Эти радикалы, как правило, очень вредны. Чтобы подавить их разрушительную силу, биологические системы принимают особые меры – они обеспечивают изобилие ферментов, которые немедленно связывают образующиеся радикалы. Самосохранение является одним из выдающихся свойств живой природы.

Возможно, вы задавались вопросом, что происходит с энергией, которая затрачена на строительство исключаящей зоны. Она бесследно улетучивается? Или происходит что-то более полезное? Следующая глава посвящена этому вопросу. Вы узнаете, может ли скромный стакан воды использовать накопленную энергию, чтобы выполнить работу.



Глава 7

Вода как движущая сила и источник жизни

У моего коллеги Владимира Воейкова страсть к экспериментам. Во время моего недавнего посещения его дачи на выходных за пределами Москвы Владимир с гордостью указал на подоконник, где под солнечным светом стоял целый ряд мензурок, наполненных водой. Затем он указал на сад внизу, где проводился еще один эксперимент, на этот раз руками жены и дочери, облаченных в традиционную дачную одежду.

Садоводство – относительно новое занятие для Воейковых. Свою первую дачу они приобрели лишь недавно. У русских, похоже, есть генетическая тяга к выращиванию овощей, и Воейковы стремились попробовать свои силы. Их ближайшие соседи занимались садоводством в течение нескольких поколений, но растения Владимира были на треть выше. Это слегка неловкое достижение возникло не из-за какого-то особого таланта или необычной самоотдачи, ведь пальцы Владимира не были заметно зеленее, чем у соседей. Причиной их успеха послужило что-то другое.

Владимир утверждал, что это была вода. Его профессиональная биография включает время, проведенное на расстоянии 200 км от Московского университета в поисках и изучении природных источников «заряженной» воды. Этот термин звучит как дань моде; но такая заряженная вода стала центральным компонентом лечебной методики, ныне прославившейся в Подмосковье. Неудивительно, что Владимир использует ту же воду для выращивания своих растений.

Может ли вода на самом деле содержать энергию? Первые исследователи, включая Виктора Шаубергера (Viktor Schauberger) и Рудольфа Штайнера (Rudolph Steiner), предоставили достаточно доказательств того, что вода может накапливать и переносить энергию; современные ученые начинают возвращаться к рассмотрению этой возможности. С другой стороны, общепринятый здравый смысл говорит об обратном: считается, что вода в закрытой бутылке на вашем столе находится в равновесии с окружающей средой;



Рис. 7.1. Владимир Воейков обдумывает новый эксперимент в своем рабочем кабинете

окружающая среда может нагреваться и передавать энергию воде, но, кроме этого медленного теплового процесса, никакой очевидный механизм не должен позволять воде получать и накапливать энергию, не говоря уже о ее переносе. Вода – это вода – скучная как дверная ручка и вряд ли способная хранить какой-либо вид энергии, кроме тепловой.

Или это не так?

7.1. ВОДА КАК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЭНЕРГИИ

Поглощенная водой лучистая энергия создает упорядоченную структуру и приводит к разделению зарядов. Накопленную энергию можно использовать: разделенные заряды могут продуцировать электрический ток (глава 5), а структурная упорядоченность может способствовать выполнению клетками их работы [1]. Эти преобразования подтверждают способность воды накапливать и переносить потенциальную энергию.

С другой стороны, можем ли мы быть уверены в широкой применимости наших выводов? Даже если в предыдущих главах были приведены безупречные аргументы в пользу накопления и высвобождения энергии в воде, они опираются на единственный цикл экспериментов в одной лаборатории. Этого недостаточно для обобщений. Следовательно, мы должны найти и другие доказательства того, что вода поглощает энергию извне и превращает ее в полезную работу. Позвольте мне начать с работы легендарного итальянского ученого.

7.1.1. Марафон Пиккарди

Во время перелета из Сиэтла во Франкфурт, который в основном прошел без происшествий, я погрузился в нечто запоминающееся: книгу, написанную выдающимся химиком Джорджио Пиккарди (Giorgio Piccardi) (рис. 7.2). Эту классическую работу мне рекомендовал коллега, но я не мог представить себе, каким образом книга, озаглавленная «Химическая основа медицинской климатологии», связана с темой воды и энергии. Однако как только я начал читать, я перестал слышать гул двигателей реактивного самолета.

Пиккарди был заинтригован статистической изменчивостью результатов его экспериментов. В один день реакция может осуществиться за две секунды, на следующий день – за 2,5 секунды, еще через день – за 1,8 секунды и т. д. Чтобы выяснить источник этой



Рис. 7.2. Итальянский ученый Джорджио Пиккарди

изменчивости, Пиккарди и его коллеги начали серию ежедневных экспериментов, продолжавшихся около двенадцати лет (за исключением краткого перерыва во время Второй мировой войны). Они провели почти четверть миллиона экспериментов. Главный вопрос: почему скорость реакции меняется от одного эксперимента к другому? Каждый экспериментатор знает, что это происходит, но мало кто понимает, почему.

Чтобы найти ответ, Пиккарди параллельно исследовал различные реакции. Все они были связаны с водой. Реакции включали простое химическое осаждение, образование полимера и фазовые переходы, в том числе замораживание переохлажденной воды. Конечные точки этих реакций были выражены достаточно отчетливо, чтобы можно было точно измерить время реакции. Каждый день, практически с религиозной фанатичностью, Пиккарди и его коллеги тщательно смешивали реагенты и записывали время реакции. Другие параметры, такие как температура и давление, оставались постоянными.

Все эксперименты проводились парами. Один образец помещали внутри металлического экрана в виде клетки Фарадея или под горизонтальным экраном; другой образец был подготовлен идентично, но оставался без защиты. Защита от электромагнитных волн была критической особенностью экспериментов. Затем ученые измеряли время реакции в соответствующих ситуациях для различных реагентов.

Как и ожидалось, время реакции менялось изо дня в день. Пиккарди заметил, однако, что средние значения времени реакции зависят от того, экранируется ли образец. Разница наблюдалась всегда. Это подтолкнуло Пиккарди к выводу, что, помимо локальных и известных переменных, на скорость реакции должны влиять некоторые особенности среды. И поскольку эти различия наблюдались в реакциях разного типа, ученые пришли к выводу, что и источник влияния в окружающей среде должен быть одним и тем же.

Пиккарди пришел к выводу, что в этом как-то замешана вода. Поскольку вода была единственным общим компонентом среди различных реагентов, Пиккарди предположил, что вода, должно быть, поглощает какую-то энергию окружающей среды, которая затем влияет на время реакции.

Хотя природа этой энергии окружающей среды осталась невыясненной, исследователи нашли дразнящие подсказки о ее происхождении. Они наблюда-

ли повторяющиеся циклы. С декабря по январь каждого года разброс времени реакции резко снижался, но затем начинал увеличиваться в марте, достигая максимума в июне и июле. Один и тот же цикл повторялся каждый год. Они также отметили другие повторяющиеся явления. Например, время реакции менялось в зависимости от естественной периодичности солнечной активности, особенно от солнечных пятен и солнечных вспышек, что явно означало зависимость от солнечной энергии.

После систематического анализа и масштабных проверок Пиккарди пришел к выводу, что единственное правдоподобное объяснение состоит в том, что на время реакции влияет количество поглощенной лучистой энергии. Время реакции менялось в такт с изменением количества поступающей энергии. Периоды цикла имели ключевое значение: они подразумевали, что энергия может исходить от Солнца и, возможно, также от фонового излучения космоса.

Работа Пиккарди породила значительное число последователей. В их число входит особая «Группа Пиккарди», созданная в рамках международного научного общества. Хотя члены группы в конечном итоге разошлись, один выдающийся российский исследователь более четырех десятилетий проводил эксперименты, дополняющие работу Пиккарди.

7.1.2. Более загадочные колебания

Симон Шноль (Simon Shnoll) и его коллеги несколько отклонились от подхода Пиккарди. Как и Пиккарди, они изучали продолжительность биохимических реакций; однако они также изучили продолжительность, казалось бы, не связанных явлений, включая количество радиоактивных распадов и некоторые гравитационные эффекты.

Исходя из данных о продолжительности, они построили гистограммы – графики, показывающие вероятность возможных продолжительностей. Шноль сосредоточился на «тонкой структуре» гистограмм, то есть на изгибах кривых. Как правило, эти изгибы показывали только небольшое сходство между кривыми. Однако пары данных, полученные с интервалами в 24 часа, 27 дней и 365 дней, показали удивительное сходство. Это было не просто визуальное сходство;

анализ проводился с использованием объективных методов, которые оставляли мало шансов на ошибку. Исходя из наблюдаемой периодичности, Шноль пришел к выводу, что на все изучаемые явления должны влиять геофизические или космофизические источники энергии – почти такой же вывод, как у Пиккарди.

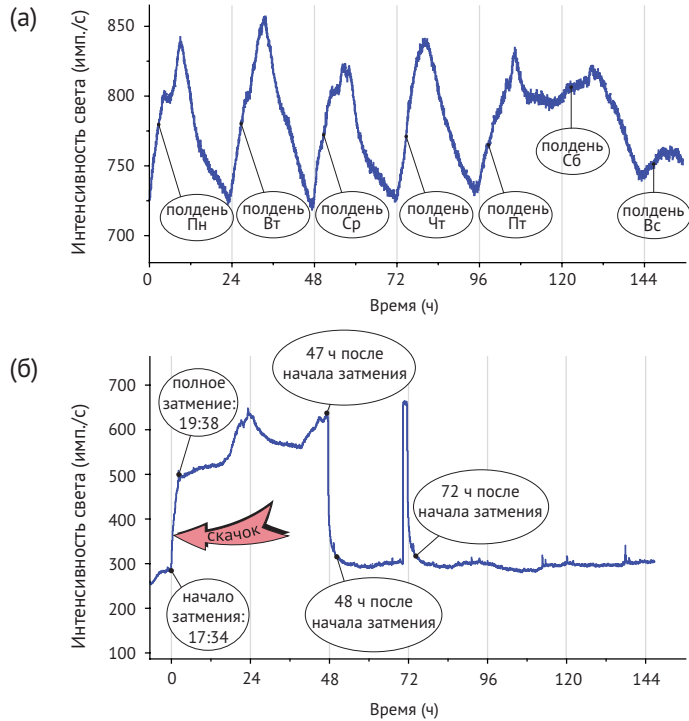
Результаты как Шноля, так и Пиккарди подчеркивают роль источников энергии, на которые обычно не обращают внимания. Чтобы такие «экзотические» источники энергии оказывали влияние, сначала энергию нужно поглотить; и поскольку эксперименты обоих исследователей связаны с водой, то, вероятнее всего, энергию поглощала вода. В своих выводах Шноль идет еще дальше, смело утверждая, что эту энергию могли поглощать и неводные физические системы.

7.1.3. Еще больше колебаний

Еще одно доказательство поглощения лучистой энергии водой предоставил Владимир Воейков, о котором я упоминал ранее. Профессор Воейков изучает свет, испускаемый водными растворами. Интенсивность света колеблется с суточным циклом (рис. 7.3а). Эксперимент, результаты которого представлены на рисунке, проводился в светонепроницаемой камере со стабильной температурой; следовательно, колебания превышают любое возможное изменение, возникающее в результате колебаний внешней температуры. Колебания интенсивности испускаемого света, очевидно, зависели от какого-то внешнего излучения, выходящего за пределы спектра заблокированного видимого света. Энергия этого излучения, судя по графику, менялась в зависимости от суточного цикла. Это заставляет предположить влияние солнечной энергии.

Результаты следующего эксперимента рассказали еще больше. На рис. 7.3б обратите внимание на резко нарастающий фронт в начале кривой. Подозревая какую-то погрешность эксперимента, Владимир Воейков проверил данные и обнаружил, что фронт точно совпал с началом местного лунного затмения; вероятно, космическая энергия может влиять на испускаемый водой свет. Очевидно, что воздействие космического излучения было достаточно сильным, чтобы перекрыть суточные колебания.

Рис. 7.3. Излучение света из воды, которая содержит бикарбонат-ионы и люминол – усилитель излучения. Обратите внимание на периодическое изменение интенсивности (а). Условия эксперимента (б) аналогичны (а), но данные записаны во время лунного затмения



Корреляция между лунным затмением и резким отклонением кривой на графике могла быть случайной; однако некоторые особенности кривой подразумевают иное. Через 24 часа после затмения началось слабое движение вниз; через 48 часов произошел более резкий спад; и через 72 часа отчет демонстрирует еще один пик интенсивности с последующим спадом. Хотя эти переходные процессы не так уж легко объяснить, их склонность к появлению с кратностью 24 часа после затмения вряд ли является случайной. Следовательно, здесь можно сделать тот же вывод, что и у Пиккарди и Шноля: излучение, поступающее от какого-то космического источника, похоже, влияет на воду.

Мы пришли к выводу, что вода поглощает энергию из окружающей среды. Периодичность, наблюдаемую во всех этих исследованиях, невозможно истолковать как-то иначе. Таким образом, доказательства предыдущей главы, демонстрирующие влияние падающего света, не одиноки; другие экспериментальные исследования подтверждают, что внешняя лучистая энергия влияет на воду. Энергия внешнего источника, очевидно, влияет на многие свойства воды, начиная

от увеличения скорости реакций и вплоть до испускания света.

Результаты экспериментов ясно показывают, что герметичная колба с водой, лежащая на столе, не является закрытой системой – она открыта для окружающей среды. Вода ведет себя как растение, расположенное рядом с колбой. Растение представляет собой открытую систему: оно использует лучистую энергию, падающую на его поверхность. То же самое относится и к колбе с водой. Это сходство не должно нас удивлять, поскольку растительные клетки, в конце концов, состоят в основном из воды.

7.2. ТРАНСФОРМАЦИЯ ЭНЕРГИИ

КАК ДВИЖУЩАЯ СИЛА ПРИРОДЫ

Если вода поглощает лучистую энергию, то что происходит со всей этой энергией? Может ли вода продолжать поглощать энергию в бесконечном количестве? Или вода должна каким-то образом перерабатывать эту энергию?

Полезная аналогия – надувание воздушного шарика. Повышение внутреннего давления увеличивает потенциальную энергию шарика. Если вы отпустите шарик, он полетит, превращая эту потенциальную энергию в кинетическую. Энергия, которую вы внесли в систему, меняет свою форму. С другой стороны, если вы продолжите надувать шарик, не высвобождая энергию, он лопнет: вся энергия высвободится разом, в слабом месте.

Вода постоянно поглощает лучистую энергию из окружающей среды; однако вода не взрывается как воздушный шарик. Следовательно, в системе должно присутствовать какое-то непрерывное выделение энергии. Продолжая аналогию с шариком, вы можете сказать, что он должен выпускать непрерывный поток воздуха (рис. 7.4) – сброс давления, подобный длительному приступу метеоризма.

Как и в каких формах энергия покидает воду?

Вы уже знакомы с несколькими примерами. Я покажу вам, что эти примеры относятся к намного более обширному набору ситуаций. Энергия может высвобождаться из воды в разных формах: оптической, физико-химической, электрической и механической. Другими словами, вода действует как машина, которая преобразует входную лучистую энергию в другие формы выходной энергии.

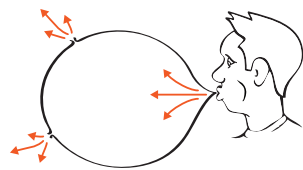


Рис. 7.4. Предохранительный клапан. Постоянное высвобождение энергии гарантирует, что система никогда не переполнится и не взорвется



Рис. 7.5. Водные растворы могут практически вечно испускать свет



Рис. 7.6. Соленая вода под воздействием электромагнитной энергии. Раствор загорается [3]

7.2.1. Оптическая энергия

Я уже говорил про эксперименты Владимира Воейкова с испускающими свет жидкостями. Недавно он расширил эти эксперименты, чтобы продемонстрировать эмиссию света, происходящую в течение длительных периодов времени. Воейков наполнил емкости водой, добавив умеренное количество бикарбоната, пероксида и немного люминола для усиления света. Затем он закупорил емкости и использовал фотоумножитель для измерения светоотдачи в течение длительного времени.

Результаты были неожиданными. После первоначального измерения светоотдачи Воейков убрал емкости в темный шкаф, проверяя их лишь изредка. Спустя более чем год хранения в темноте те же самые закупоренные колбы с водой продолжали испускать свет. Интенсивность немного уменьшилась, но колбы продолжали излучать свет в течение непостижимо долгого времени. Свет не угасал (рис. 7.5).

Вы можете ожидать от некоторых химических реакций светового излучения – но длящегося больше года? Либо здесь действует какая-то магия, либо водные растворы должны непрерывно поглощать падающую энергию и преобразовывать эту энергию в практически бесконечный поток фотонов, который мы и наблюдаем. Мы не будем вдаваться в подробности: водный раствор действует как лампочка, практически бесконечно излучающая энергию в виде фотонов, и при этом нет никакого очевидного источника энергии, кроме энергии, запасенной в воде.

Более наглядной демонстрацией оптического излучения воды является эксперимент со вспыхивающей водой. Установка для проведения эксперимента показана на рис. 7.6. Это пробирка с соленой водой, закрепленная в держателе. Соленая вода подвергается воздействию микроволновой или радиочастотной энергии, и вуаля! – мы видим свет и ощущаем тепло [3]. Вы можете посмотреть видеозапись эксперимента [w1], который представляет собой яркий пример того, что вода может преобразовывать входную энергию в свет.

7.2.2 Физико-химическая работа

Оставим в стороне свет и рассмотрим другую форму энергии – физико-химическую. Представьте себе стакан, наполненный водой, содержащей взвешенные частицы, такие как микросферы. Сначала суспензия номинально однородна, но через несколько часов про-

исходит что-то загадочное: микросферы устремляются к периферии стакана, оставляя в центре свободный от микросфер вертикально ориентированный цилиндр (рис. 1.3). Говорят, что микросферы «распределяются между двумя фазами», в результате чего одна область богата микросферами, а другая лишена их.

Системы, оставленные в покое, обычно склонны к нарастанию беспорядка, но не к упорядочиванию. В конце концов, энтропия – это стрела времени. Но вышеупомянутая система, похоже, движется от беспорядка к порядку: микросферы, первоначально хаотично распределенные по всему объему суспензии, постепенно концентрируются у стенок стакана. Такая скученность похожа на группу людей, которые изначально смешивались в непринужденной беседе, а затем решили столпиться на половине пространства. Подобное событие не произойдет спонтанно – оно требует решимости и энергии.

То же самое относится к наблюдаемому скоплению микросфер: перемещением должна управлять какая-то энергия. Очевидным движущим агентом является лучистая энергия, и глава 9 это подтвердит. Здесь, однако, движущая сила имеет меньшее значение, чем результат – почти упорядоченная реорганизация в сторону более плотного размещения. Чтобы реорганизоваться, микросферы должны двигаться через вязкую среду, а это требует выполнения работы. Разделение фаз связано с работой.

Подобное разделение на фазы происходит в различных видах суспензий, и в каждом случае выполняется работа. Такая работа могла бы более естественно вписаться в следующий раздел о механической работе, но фазовое разделение обычно классифицируется как физико-химическое явление и заслуживает отдельного упоминания. В любом случае, наблюдаемые перемещения частиц свидетельствуют о том, что кроме излучения света система расходует энергию и другими способами.

7.2.3. Электрическая энергия

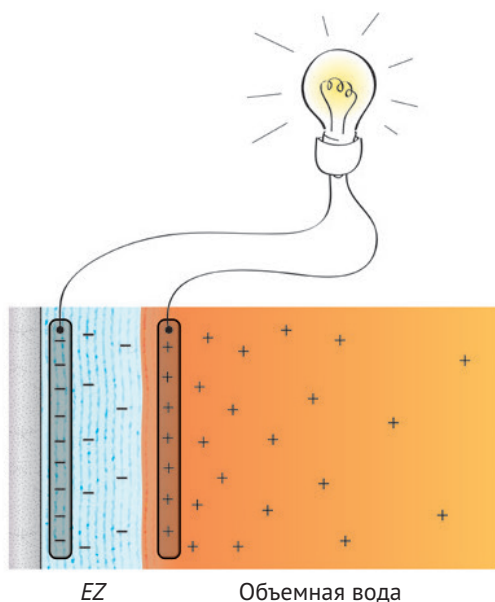
Мы также можем извлекать из воды электрическую энергию (рис. 7.7). Как вы уже видели в главе 5, размещение электродов в противоположно заряженных зонах водяной батареи приводит к протеканию электрического тока. Может ли такой источник энергии конкурировать с существующими технологиями, остается неясным; тем не менее водяная батарея действительно вырабатывает электрическую энергию из поступающей лучистой энергии.

Рис. 7.7. Извлечение электрической энергии с помощью электродов, помещенных в исключющую зону и в воду за ее пределами



Рис. 7.8. Водяные часы. Принципы работы источника питания отличаются от тех, которые могут предложить электрохимии (см. главу 12)

Фактически мы уже получили электрическую энергию из несущих противоположные заряды зон, полученных при пропускании электрического тока через воду (рис. 5.9). Поместив электроды в противоположно заряженные области, мы смогли извлечь существенную энергию – почти столько же, сколько ее было затрачено для создания этих заряженных областей.



Таким образом, вода может содержать электрическую энергию. Представьте себе, что вы используете воду для питания вашего мобильного телефона. Такая перспектива не должна быть полной неожиданностью, поскольку батареи на водной основе уже могут производить достаточно электроэнергии для питания часов (рис. 7.8).

7.2.4. Механическая работа

В контексте механической работы я имею в виду движение воды или поток. Создание потока требует затрат энергии: если вы поднимаете воду в гору, вы тратите энергию; вы можете даже вспотеть. Даже если вы перемещаете воду по горизонтальной трубе, вам все равно нужно расходовать энергию, чтобы преодолеть молекулярное трение или вязкость. Движение любого типа требует затрат энергии.

Теперь предположим, что ни вы, ни любой другой внешний источник энергии не участвуют в создании потока воды. Тогда энергия движения должна исхо-

дить от самой воды. Именно это я и хочу продемонстрировать дальше: приведение потока в движение при отсутствии очевидного внешнего фактора – только за счет скрытой энергии, запасенной в воде. Я представлю три примера.

Пример А: трубка

Наиболее наглядным примером является поток через гидрофильные трубки (рис. 7.9). Чтобы наблюдать его, поместите трубку из нафiona длиной 1 мм в небольшую камеру с водой, следя за тем, чтобы вода полностью проникла внутрь трубки. Затем уложите трубку на дно камеры. Чтобы отследить поток, добавьте в воду какое-то количество микросфер или каплю краски.

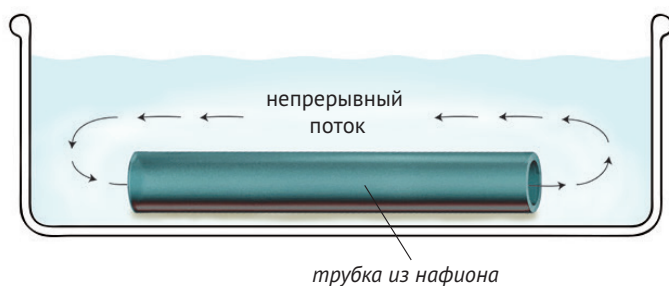


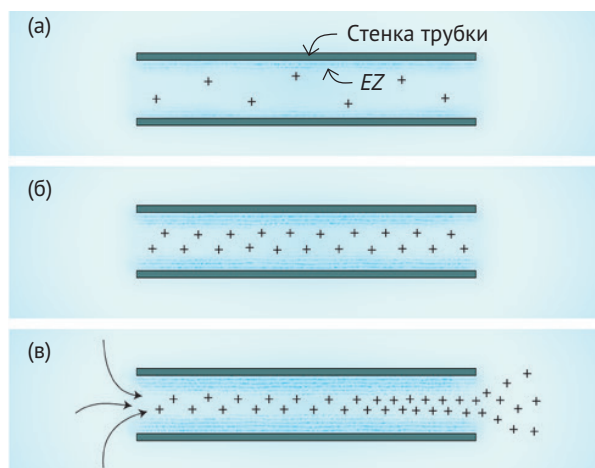
Рис. 7.9. Через погруженные в воду гидрофильные трубки протекает практически непрерывный поток

Вы можете подумать, что ничего особенного не произойдет, но кое-что все же случится: после нескольких минут хаотичных колебаний вы увидите устойчивый поток, протекающий через трубку, очень похожий на кровь, протекающую через сосуд. Его направление непредсказуемо от одного эксперимента к другому, но как только оно начнется, оно сохраняется с небольшим убыванием в течение часа [4]; если предпринимаются шаги для уменьшения влияния протонов, на капливающих в камере, поток может сохраняться более суток [5]. Если в течение этого периода вы повернете трубку, поток сохранит свое направление относительно трубки.

Мы наблюдали подобные потоки, протекающие не только через нафionoвые трубки, но также и через цилиндрические туннели, сделанные в различных гелях. Результаты похожи. Следовательно, это явление не является специфичным для какого-либо одного материала и очевидно возникает из-за гидрофильной природы материалов. Трубки из гидрофобных материалов не создают потока. Вероятно, что какое-то локальное взаимодействие между гидрофильными поверхностями и водой способствует возникновению потока.

Хотя детально механизм этого явления еще не полностью проработан, некоторые аспекты очевидны уже сейчас (рис. 7.10). Нам известно, что внутри трубки возникает исключаящая зона (а); мы можем ее видеть. Исключаящая зона стимулирует накопление ионов гидроксония в центре трубки (б); мы можем измерить концентрацию. Когда концентрация ионов гидроксония достигает определенного уровня, эти положительно заряженные молекулы воды должны начать выходить с одного или другого конца трубки в жидкость снаружи. Выход ионов инициирует поток (в), что, в свою очередь, привлекает свежую воду в другой конец трубки. Поступающая вода протонируется, что делает поток практически бесконечным.

Рис. 7.10. Механизм возникновения потока внутри трубки. Ключевым моментом является накопление ионов гидроксония в центре трубки и их выход в окружающую воду



После возникновения потока воды свет его усиливает [5]. Белый свет усиливает поток в зависимости от интенсивности; ультрафиолетовое излучение может увеличить поток в четыре-пять раз. Таким образом, энергия, приводящая в движение поток внутри трубки, очевидно, исходит от света. Предположительно свет высвобождает протоны, которые движут поток.

Пример Б: отверстие

Поток через трубку – не единственное проявление «спонтанного» потока воды. В качестве второго примера рассмотрим поток через небольшое отверстие, сделанное в стенке погруженной в воду трубки из нафтона. Вода мгновенно проникает в трубку через отверстие (рис. 7.11). Этот поток, направленный внутрь трубки, наблюдаемый благодаря наличию индикаторных микросфер, имеет удивительно высокую скорость.

Хотя скорость в конечном итоге уменьшается, поток сохраняется неожиданно долго. Для существования данного потока должен быть какой-то источник механической энергии, и различные наблюдения [6] снова указывают на свободные протоны, в данном случае стремящиеся к отрицательному заряду внутри трубки.

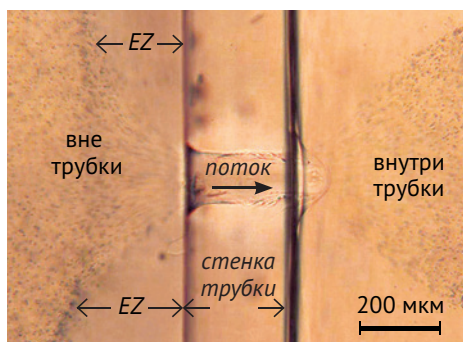


Рис. 7.11. Входящий поток через отверстие в стенке трубки из нафiona. Вид с верхней части камеры. Проникающая внутрь суспензия микросфер движется к двум открытым концам трубки

Пример В: шарики

Третий пример предположительно спонтанного потока относится к гелевым шарикам. Поместите гелевый шарик диаметром 0,5 мм на дно небольшой экспериментальной камеры. Затем залейте туда воду так, чтобы верх шарика был едва покрыт водой. Добавьте немного микросфер для отслеживания потока. Природа потока удивительна: в приповерхностном слое вода постоянно стекает в направлении шарика со всех сторон (рис. 7.12). По мере того как вода приближается к шарика – или к исключавшей зоне шарика, – она поворачивает вниз, в сторону дна камеры; затем вода продолжает движение наружу, прочь от шарика. Поток энергично циркулирует за пределами шарика – снова стимулируемый притяжением положительных ионов гидроксония к отрицательной исключавшей зоне.

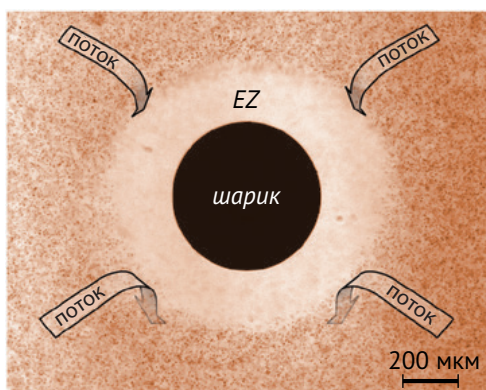


Рис. 7.12. Гелевый шарик (вид сверху), расположенный в камере, содержащей воду и микросферы, создает постоянный поток, обтекающий шарик сверху вниз

Мы наблюдали этот замкнутый поток с различными типами шариков и различными типами камер. Неизменно поток движется без усталости в течение многих часов, по крайней мере до тех пор, пока микросферы не осядут на дно камеры, так что поток больше не удастся отслеживать. Какая-то энергия должна приводить в движение этот поток (предположительно всегда направленный сверху вниз), и очевидным кандидатом является лучистая энергия, поглощаемая водой.

Эти три разновидности потока, если рассматривать их в контексте привычных энергетических парадигм, могут показаться загадочными; они напоминают вечные двигатели. Теоретически потоки можно было бы объяснить, если бы они возникли в результате побочных эффектов, таких как температурные градиенты, но в каждом эксперименте мы тщательно проверяли и исключали подобные ошибки. Потоки кажутся несколько менее загадочными, если рассматривать их в контексте исключаящих зон, поскольку эти зоны, расположенные рядом с поверхностями материалов, выделяют протоны. Даже незначительные градиенты концентрации протонов (или ионов гидроксония) будут приводить в движение потоки, потому что градиенты заряда всегда стремятся к выравниванию. *Градиенты заряда являются мощной движущей силой всех разновидностей потоков.*

Отсюда вытекает вопрос: что происходит с потоками в отсутствие физического объекта, который их направляет? Предположим, что у нас нет трубки, отверстия или сферы, чтобы упорядочить и направить поток. Что происходит в таком случае? Лучистая энергия продолжает поступать в систему; но как вся эта энергия рассеивается при отсутствии упорядоченных потоков?

Возможно, вы догадались, что перемещение молекул все равно происходит, хотя и ненаправленное. Случайные перемещения молекул происходят в воде непрерывно. Известные как броуновское движение, эти перемещения важны для физики и химии; мы рассмотрим их в главе 9, где обсудим, может ли броуновское движение быть вызвано поступлением лучистой энергии.

Пока достаточно отметить, что поглощенная электромагнитная энергия может расходоваться на выполнение механической работы, приводящей в движение потоки жидкости.

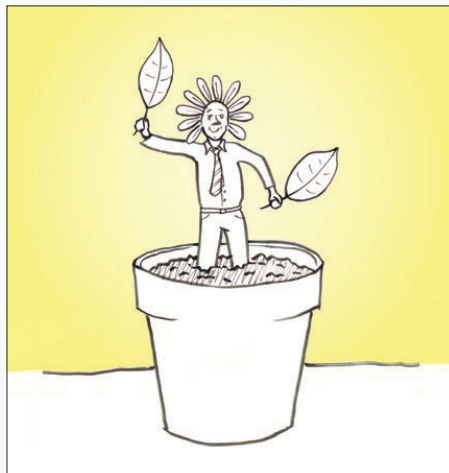
7.3. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ, ПОДОБНОЕ ФОТОСИНТЕЗУ

Вода, очевидно, выполняет все виды работ, от химической и оптической до электрической и механической. Потенциальная энергия, за счет которой выполняется эта работа, исходит от разделения зарядов, которое, в свою очередь, возникает под действием поглощенной лучистой энергии. Эта энергия служит посредником, который запускает процессы работы или отдачи энергии.

Эта цепь событий имеет поразительное сходство с фотосинтезом. В процессе фотосинтеза поглощенная лучистой энергии солнца приводит к выделению энергии путями, мало чем отличающимися от тех, которые мы только что видели: химическая энергия (метаболизм); механическая энергия (изгиб); поток (в сосудах растений); а в некоторых организмах даже свет. Поглощение лучистой энергии производит различную работу. Примером превращения энергии служат все зеленые растения и микроорганизмы вокруг вас.

А вы фотосинтезируете?

Это делают растения; это делают бактерии; это делают разные одноклеточные организмы. Фотосинтез – это процесс, настолько полезный для видов, находящихся ниже нас на филогенетическом древе, что нельзя не задаться вопросом, сохранила ли природа этот процесс по мере продвижения к более сложным организмам. Я не предлагаю вам фотосинтезировать, потому что общей конечной целью фотосинтеза является выработка органических веществ; мы с легкостью получаем эти вещества из пищи. Однако ваше тело может сделать первый шаг в процессе фотосинтеза: использовать падающий свет для разделения зарядов воды. Разделенные заряды могут пригодиться для приведения в действие различных физиологических процессов.



Одним из таких возможных процессов является перемещение крови через капилляры. Мы только что видели, как под действием света возникает поток в гидрофильной трубке; подобным образом свет может стимулировать движение крови через капилляры

вашей кожи, которые являются просто гидрофильными трубками. В ваше тело проникает достаточно много света, способного выполнять работу, – вы можете убедиться в этом, приставив фонарик к ладони; если вы сделаете это в темноте, вы увидите свет с другой стороны. Таким образом, проникающий в ваше тело свет вполне может стимулировать капиллярный кровоток.

Кровоток использует любую мощность, которую он может получить. У здоровых молодых людей красные кровяные тельца (эритроциты) могут быть больше, чем диаметр капилляров, через которые они проходят: от 6 до 7 мкм против 3–5 мкм соответственно. Эти красные кровяные клетки явно деформируются при прохождении по капиллярам [w2]. Представьте, что вам нужно протолкнуть частично спущенный футбольный мяч через водосточную трубу унитаза, и вы получите представление о подобной работе: для нее требуется значительное усилие даже при низком трении.

Однако измерения практически не обнаруживают падения давления

в капиллярной сети – в основном падение давления происходит в относительно более крупных артериолах. Следовательно, капилляры не ведут себя как каналы с высоким сопротивлением. Вероятно, какая-то энергия помогает сердцу создавать поток, и эта энергия может трансформироваться из лучистой энергии, которую поглощает ваше тело.

Возможно, мать-природа не обделила нас. В своей великой мудрости она могла сохранить механизм, заимствованный у растений и бактерий, приспособив его для питания кровотока энергией света и других видов работы в организме животных. Первый шаг может быть одинаковым для всех: преобразование энергии света гидрофильным веществом в контакте с водой. Хотя вы никогда не сможете выпустить новые побеги или наклониться к свету, вы тем не менее можете использовать тот же механизм преобразования энергии, которым так эффективно пользуется растение на вашем подоконнике.

Первым шагом в процессе фотосинтеза является расщепление воды. Расщепление на положительные и отрицательные компоненты выполняется окруженными водой светопоглощающими хромофорами. Этот сценарий напоминает рассмотренный нами ранее: покрытая водой гидрофильная поверхность. В обоих случаях свет вызывает расщепление молекул воды. Поэтому можно предположить, что вызванное светом расщепление воды при фотосинтезе похоже на расщепление воды, связанное с исключительной зоной. Это означает, что фотосинтетические хромофоры являются просто конкретным воплощением более общих гидрофильных поверхностей. Свет, падающий на хромофоры и воду, расщепляет воду так же, как и свет, падающий на гидрофильные материалы и воду, – но в первом случае, вероятно, более эффективно.

Если хромофоры представляют собой не что иное, как воплощение типичных гидрофильных материалов, то в реакционных центрах фотосинтеза должны наблюдаться пики поглощения при 270 нм, характерные для присутствия исключавшей зоны. Про синевioletовый и красный пики поглощения написано в каждом учебнике; однако специалисты, изучающие фотосинтез, также обнаруживают впечатляюще большой пик поглощения при 280 нм. Этот пик при 280 нм обычно отвергают как помеху, связанную с загрязнением белком, но возникает вопрос: может ли (формально) пик при 280 нм быть тем же самым, что и пик при 270 нм, являющийся маркером исключавшей зоны? Если это так, то это явный признак присутствия исключавшей зоны воды внутри реакционных центров фотосинтеза. Рядом с хромофором будет находиться исключавшая зона, и в целом картина будет очень похожа на то, что происходит рядом с обычными гидрофильными поверхностями.

Иными словами, первый этап фотосинтеза может являться частным случаем более общего процесса, описанного на этих страницах, – светоиндуцированного расщепления воды и разделения зарядов. *Разделение зарядов благодаря наличию исключавшей зоны может быть характерным первым этапом процесса фотосинтеза.*

7.4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС

Упомянутые выше примеры говорят о том, что исключавшая зона хранит потенциальную энергию для последующего использования. Однако не вся эта накопленная энергия остается доступной для использования. Это происходит потому, что часть энергии излучается обратно в окружающую среду, а часть – превращается в тепло. Это тепло можно обнаружить инфракрасными камерами, а иногда и простым термометром. Следовательно, общий выход накопленной энергии состоит не только из работы, а из работы плюс лучистая энергия.

Это соображение можно наглядно представить в виде уравнения:

$$\text{лучистая энергия на входе} = \text{высвобожденная энергия} \\ \text{или работа} + \text{лучистая энергия на выходе. (1)}$$

Уравнение (1) относится к стационарному состоянию. Оно не относится к переходным состояниям:

например, если поток падающей лучистой энергии резко увеличивается и приводит к расширению исключочающей зоны, то потребуется дополнительный член уравнения для учета этой временно накопленной энергии. Однако для стационарного состояния достаточно уравнения (1).

Уравнение описывает установившийся энергетический баланс. В нем подчеркивается, что эффективность преобразования энергии составляет менее 100 %, поскольку часть поглощенной энергии возвращается в окружающую среду, из которой она поступила. Лишь сохранившаяся часть превращается в полезную энергию или работу. С другой стороны, эта часть на удивление работоспособна: она обеспечивает энергией самые разные процессы.

7.5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Мы завершаем данный раздел книги размышлением о том, куда нас привели предыдущие главы и куда могут нас привести недавно обнаруженные свойства воды.

Мы впервые выявили неожиданное поведение воды. Мы обнаружили, что рядом с гидрофильными поверхностями молекулы воды организуются в жидкокристаллические массивы, способные наращиваться неожиданно далеко от своих зародышевых поверхностей. Подобно кристаллам льда, эти жидкие кристаллы исключают многие вещества, начиная от макроскопических коллоидных частиц до субмикроскопических растворенных веществ. Особая способность этой области исключать из себя примеси породила термин «исключочающая зона».

Исключочающие зоны, как правило, заряжены отрицательно, в то время как зона объемной воды за их пределами обогащена положительными зарядами. Эти зоны имеют разный характер: отрицательно заряженная исключочающая зона, по-видимому, представляет собой полукристаллическую структуру, построенную из скрепленных между собой сотовых слоев; зона положительного заряда бесструктурна и содержит ионы гидроксония, которые могут свободно рассеиваться или двигаться организованным потоком согласно законам электростатики.

Энергия, необходимая для построения исключочающей зоны и разделения зарядов, поступает главным образом от внешних источников. Наиболее эффективно работает инфракрасное излучение. Кроме

того, оно вездесуще и достается даром. Акустическая энергия, судя по всему, тоже демонстрирует эту способность, хотя детали ее воздействия еще предстоит выяснить. Все эти источники энергии способствуют разрыву пространственных связей между молекулами воды, тем самым освобождая эти молекулы, чтобы они могли присоединяться к существующим слоям исключаяющей зоны, словно кирпичи поверх частично построенной стены. Молекулы воды притягиваются к растущему слою, и в процессе электростатического прилипания они теряют положительные заряды в окружающую воду. Таким образом происходит разделение зарядов и заряжается водяная батарея.

Энергетический цикл, лежащий в основе этого процесса, является нетрадиционным в том смысле, что поглощенная лучистая энергия не просто превращается в тепло, как обычно думают (рис. 7.13). Часть этой энергии может быть преобразована в потенциальную энергию; впоследствии она может быть трансформирована в другую форму энергии или работы, включая химическую, оптическую, электрическую, механическую и, возможно, другие виды работ или энергии. Иными словами, есть два пути преобразования энергии в воде.



Вода, таким образом, действует как преобразователь, поглощая энергию одного вида и преобразовыв-

Рис. 7.13. Два пути преобразования энергии в воде. Обычный путь – увеличение температуры; недавно открытый путь – создание запаса потенциальной энергии, способной использоваться для выполнения работы. Второй путь может быть общим первым шагом в фотосинтезе

вая ее в другие виды. Преобразование может происходить мгновенно, как при флуоресценции, или энергия может храниться в резерве для будущего использования, например для выращивания овощей выше, чем у вашего соседа.

Итак, мы приходим ко второму уравнению:

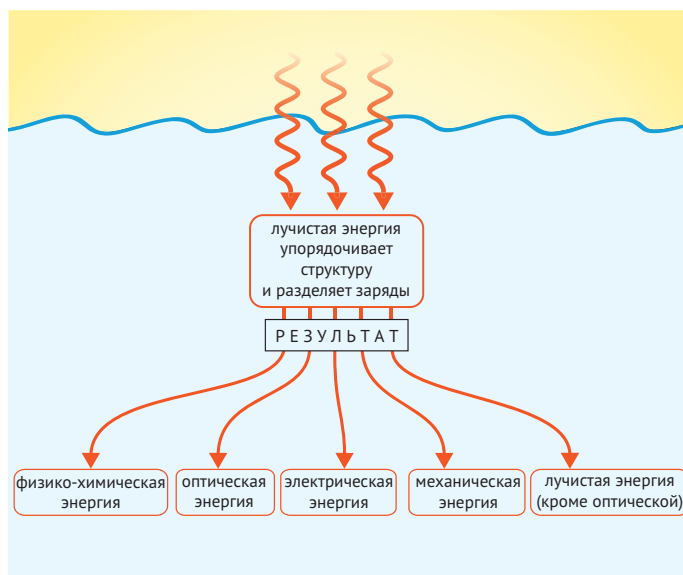
$$E = H_2O. \quad (2)$$

Уравнение (2) говорит о том, что вода и энергия идут рука об руку. Пуристы могут осудить меня за несоответствие единиц измерения, и у меня нет оправдания. Тем не менее я думаю, вы понимаете, что я имею в виду: энергия и вода тесно связаны. Везде, где есть вода, хранится запас энергии, и эта энергия может выполнять различную работу.

Подумайте, что это значит. Вы вносите энергию в воду и получаете другие виды энергии (рис. 7.14). Вода – это преобразователь энергии, жидкая машина, если вам угодно.

Представьте, как работа этой машины может влиять практически на все свойства воды. Возьмем, например, теплоемкость воды. Теплоемкость – это количество тепловой энергии, необходимое для повышения температуры тела на фиксированную величину. У воды теплоемкость больше, чем предсказывает обычная химия: вода нагревается не так быстро, как кастрюля, в которой она находится.

Рис. 7.14. Вода преобразует энергию

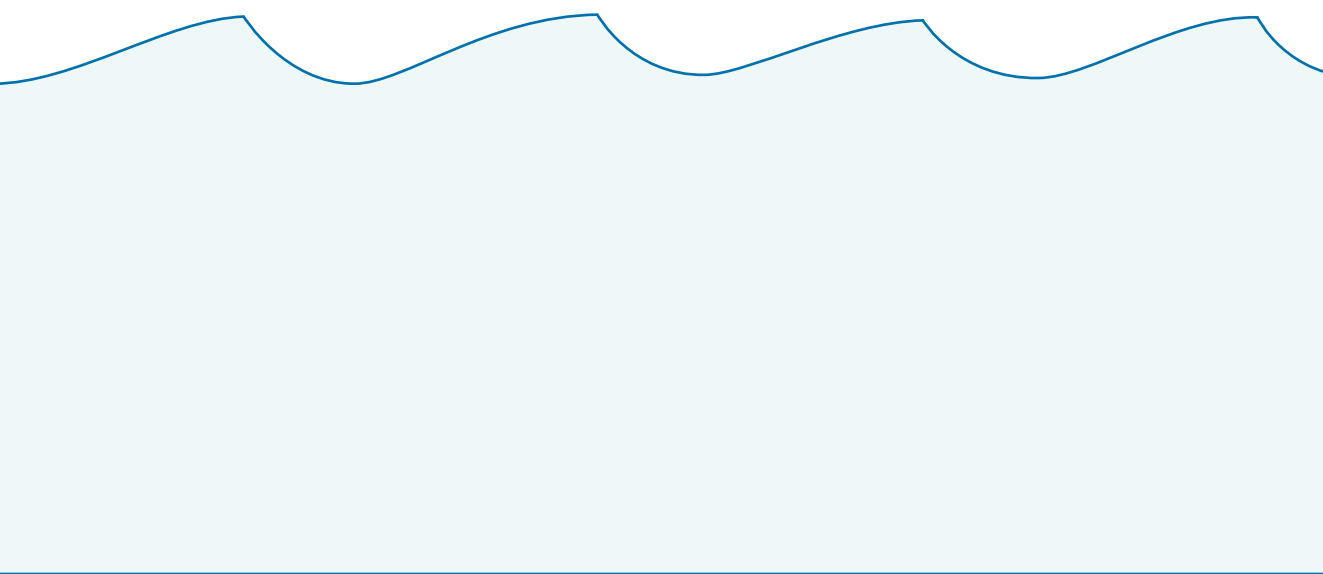


Причина высокой теплоемкости воды была предметом споров, но, пожалуйста, вернитесь к рис. 7.13. Лучистая энергия, безусловно, повышает температуру воды, но часть этой лучистой энергии расходуется на создание структуры. То есть на нагрев идет только часть поступающей энергии. В результате вода должна поглощать большее, чем ожидалось, количество лучистой энергии, чтобы ее температура возросла на некоторую величину.

Теплоемкость иллюстрирует только одну из многих энергетических проблем, связанных с водой; другие проблемы варьируются от испарения теплой воды до замерзания холодной воды. Вы можете подумать, что мы понимаем эти явления, но это совсем не так. Остается много аномалий – это еще один способ сказать, что мы понятия не имеем, что *на самом деле* происходит. У воды осталось множество загадок.

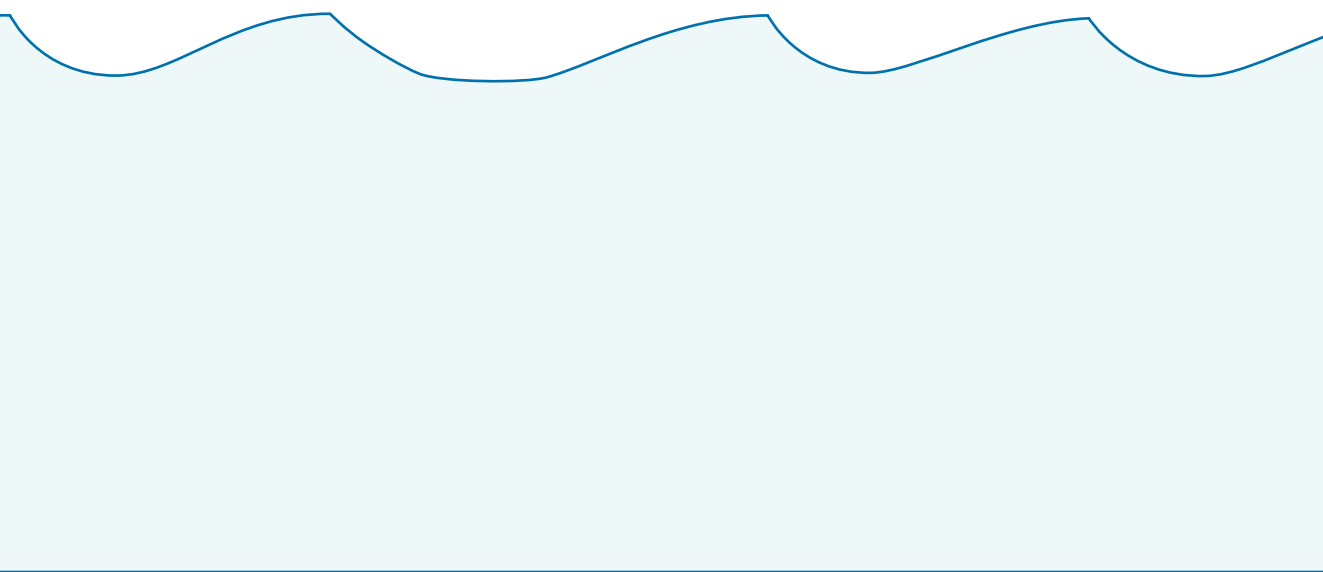
Очевидно, что поиск решения этих загадок должен начинаться с понимания того, что происходит с водой, когда вы добавляете или извлекаете энергию, – и именно к этой цели мы направляемся в следующем разделе книги.

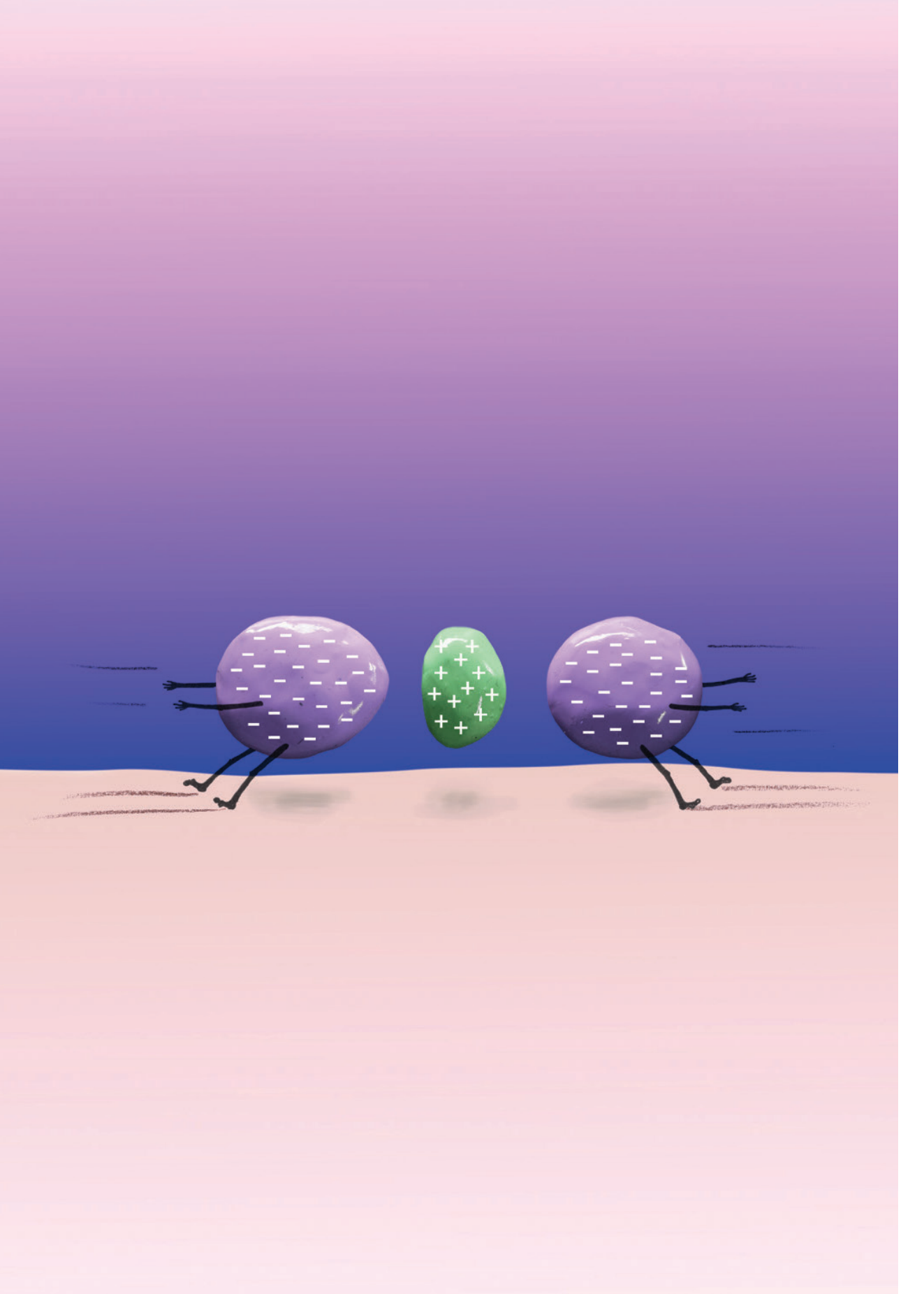
Теперь настало время применить наши знания о воде, чтобы лучше разобраться в широком спектре природных явлений. Наша модель исключаящей зоны проливает новый свет на давно устоявшиеся концепции и – как я надеюсь, вы скоро обнаружите – радикально меняет наше понимание устройства мира.



РАЗДЕЛ III

Что движет водой,
то движет миром





Глава 8

Универсальный аттрактор

Поведение электрических зарядов, несомненно, входит в число фундаментальных научных законов: разноименные заряды притягиваются, а одноименные заряды отталкиваются. Ничего сложного. Позвольте мне спросить: предположим, что вы извлекаете из левого и правого карманов брюк две одинаково заряженные частицы. Поместите эти две частицы в стакан с водой, расположив их достаточно близко, чтобы они «почувствовали» заряд друг друга. Что произойдет с расстоянием между этими двумя частицами?

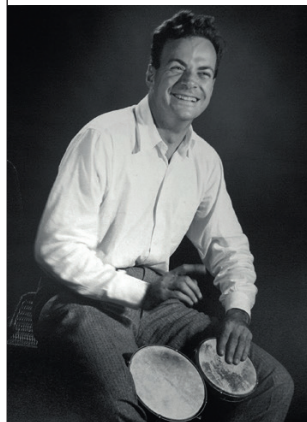
Когда я задаю этот вопрос во время выступления, обычно никто не решается поднять руку. Люди чувствуют подвох и боятся, что неправильный ответ может публично раскрыть их глубоко укоренившиеся заблуждения. Какой-нибудь смельчак в конце концов может поднять руку и смиренно предположить: «Ну... эээ... одинаковые частицы, очевидно, взаимно отталкиваются и удаляются друг от друга».

На самом деле они двигаются навстречу друг другу.

Прежде чем вы сделаете поспешный вывод, что автор находится под действием травки, позвольте мне заверить вас, что этот парадокс не является галлюцинацией. Этот феномен известен уже сто лет. Ирвинг Ленгмюр (Irving Langmuir), личность, достаточно авторитетная, чтобы его именем назвали физико-химический журнал, хорошо знал это явление [1]. Известный физик Ричард Фейнман впоследствии предложил разумное объяснение, которое не бросает вызов никаким фундаментальным постулатам физики [2].

Так почему же две заряженные частицы хотят приблизиться друг к другу?

И что этот феномен может означать для остальной части естествознания?

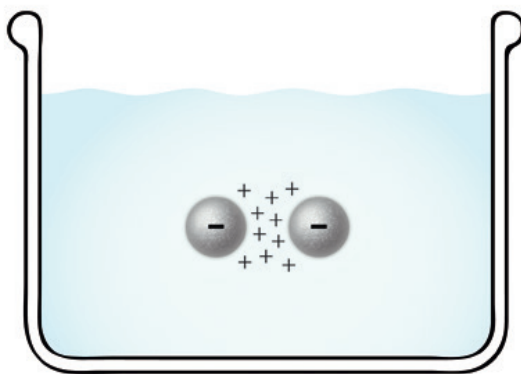


Ричард Фейнман
(1918–1988)

8.1. МЕХАНИЗМ ПАРАДОКСАЛЬНОГО ПРИТЯЖЕНИЯ

Фейнман дал простое объяснение этого притяжения. В своем неповторимом стиле он заявил, что «подобное стремится к подобному» из-за промежуточных «противоположных». Другими словами, одноименно заряженные объекты стремятся друг к другу, потому что между ними находятся заряды противоположного знака. Таким образом, промежуточный положительный заряд способствует сближению двух отрицательных заряженных сфер (рис. 8.1).

Рис. 8.1. Отрицательно заряженные частицы могут притягиваться, если между ними лежит достаточно много положительных зарядов



В этой главе мы увидим множество свидетельств тому, что принцип «подобное стремится к подобному» действительно работает – и очень хорошо. Мы рассмотрим очевидные вопросы: откуда берутся эти «противоположности»? Почему они должны собираться между «подобными» объектами? Наконец, что определяет конечную точку притяжения? В данной главе мы выйдем за рамки ответов на эти вопросы и увидим, что предложенный механизм дает простую основу для объяснения многих парадоксальных явлений.

Если бы Фейнман был в аудитории, когда я задавал свой вопрос, он, конечно, дал бы быстрый, но неполный ответ – в то время мы мало знали об источнике разноименных зарядов. Норио Исе (Norio Ise) из Киотского университета пришлось найти дополнительные доказательства глубокой идеи Фейнмана.

Исе изучал коллоиды. Коллоиды представляют собой относительно однородные смеси частиц и растворителя – такие как йогурт, кровь или молоко (рис. 8.2). Коллоидные частицы меньше песчинок, но больше молекул; обычно их размеры находятся на микро-

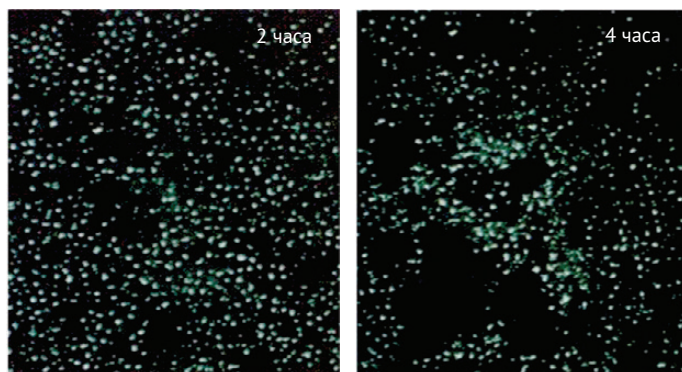


Рис. 8.2. Молоко является распространенным примером коллоидной суспензии

ном уровне. Вы можете обнаружить их присутствие, потому что частицы рассеивают свет и, следовательно, придают непрозрачность суспензии. Для того чтобы увидеть отдельные частицы, нужен микроскоп; тем не менее они распределены по всему коллоидному раствору, наполняя как молоко, которое вы пьете, так и кровь, текущую по вашим венам.

Исе исследовал коллоиды из микросфер и воды – настолько простые, насколько это возможно. Он обнаружил, что если после смешивания сделать длительную паузу, частицы образуют упорядоченные массивы, называемые «коллоидными кристаллами». Пример такой решетки показан на рис. 8.3. На снимке видны две наиболее примечательные особенности коллоидного кристалла: (1) частицы расположены упорядоченно; и (2) между частицами остаются промежутки. Расстояние между частицами может показаться небольшим, но оно достаточно велико, чтобы уместить между ними цепочки из тысяч молекул растворителя.

Исе и его коллеги пришли к выводу, что эти кристаллы образовались в результате электростатического притяжения [4]. Сразу после смешивания микросферы равномерно распределялись в среде растворителя, но со временем они постепенно притягивались друг к другу, оставляя вокруг кластеров пустоты, свободные от микросфер (рис. 8.4).



На этом история не закончилась. С течением времени микросферы внутри этих зон конденсации продолжали сближаться, в конечном итоге образуя периодические массивы, показанные на рис. 8.3.

Исе и его коллеги занялись изучением влияния различных факторов на силу притяжения [5, 6, 7]. В каждом случае оставалось в силе предположение Фейн-

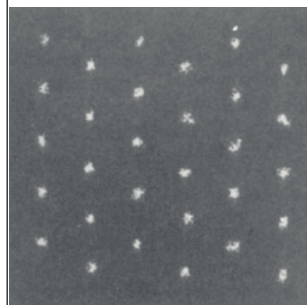


Рис. 8.3. Устойчивое распределение частиц латекса: диаметр 0,4 мкм, 2%-ная концентрация в водной суспензии [3]

Рис. 8.4. Микросферы со временем притягиваются друг к другу, оставляя крупные пустоты, лишенные микросфер. Ширина кадра 10 мкм [4]



Рис. 8.5. Норио Исе получает высшую научную премию Японии. Император и императрица слева. Снимок любезно предоставлен Академией наук Японии

мана: результаты поддавались объяснению только в том случае, если между частицами с одноименным зарядом располагались частицы противоположного заряда. Поэтому Исе и его коллеги сошлись во мнении, что Фейнман совершенно прав. Парадоксальное притяжение действительно возникает на основе традиционного явления: притяжения между противоположными зарядами. Здесь нет даже намека на нарушение фундаментальных законов физики.

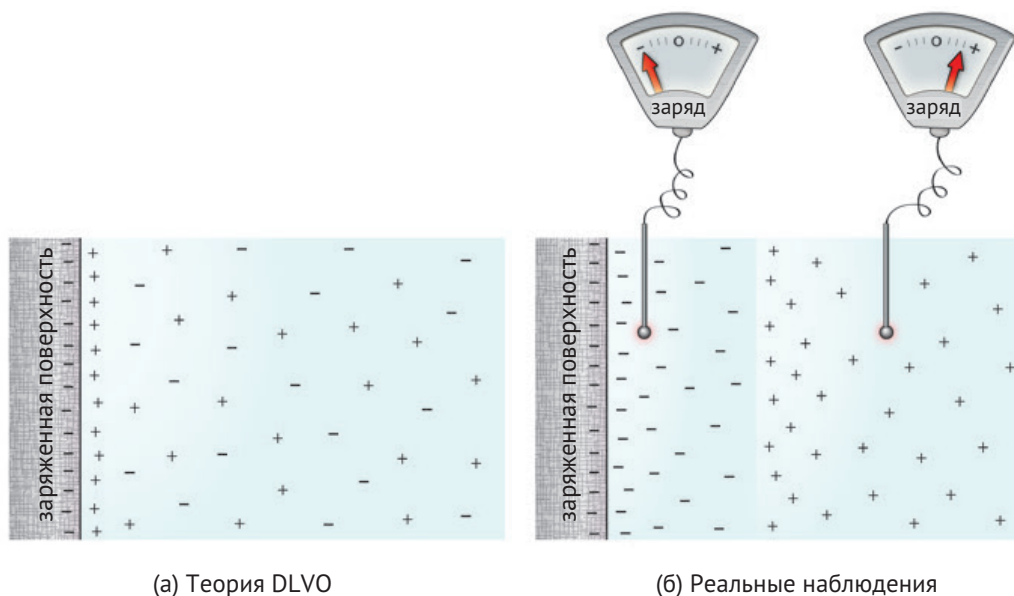
За свои элегантные работы Исе получил высшую научную премию, которую можно получить в Японии: ужин с императором. И еда, и разговор, как мне сказали, были великолепны (рис. 8.5).

8.2. ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ПРИТЯЖЕНИЯ НА ДАЛЬНИХ РАССТОЯНИЯХ

Механизм Фейнмана–Исе, при всей своей простоте, плохо согласуется с убеждениями некоторых физиков-химиков, которые утверждают, что любые подобные взаимодействия невозможны. Их взгляды основаны на так называемой теории DLVO, которая исключает дальние взаимодействия зарядов. DLVO – аббревиатура, составленная по первым буквам фамилий авторов теории: русские ученые Дерягин и Ландау и голландцы Вервей (Verwey) и Овербек (Overbeek).

Теория DLVO описывает силы взаимодействия между двумя заряженными поверхностями, обращенными друг к другу в жидкой среде. DLVO опирается на предположение, что каждая заряженная поверхность будет притягивать противоположные ионы из жидкости; эти ионы будут маскировать поверхностный заряд, подобно савану, скрывающему мертвое тело (рис. 8.6а). Таким образом, наблюдатель, оказавшийся в жидкости на некотором расстоянии от поверхности, вряд ли «почувствует» наличие у нее заряда.

Поэтому теория DLVO не может объяснить притяжение частиц. Согласно этой теории, заряженные поверхности, лежащие даже на небольшом расстоянии друг от друга, не будут замечать взаимное присутствие, поскольку противоположные ионы маскируют заряды. Следовательно, поверхности не будут притягиваться. Критическое расстояние, на котором исчезает притяжение, зависит от различных факторов, но редко превышает несколько десятков нанометров, а чаще всего составляет всего несколько нанометров.



Напротив, наблюдения Исе свидетельствуют о наличии притяжения даже при расстоянии, в 100 раз большем, и очень скоро я приведу вам примеры притяжения, действующего на расстояниях практически в *миллиметрах*. Теория DLVO не соответствует этим наблюдениям.

У теории DLVO есть фундаментальная проблема. Экспериментальные данные противоречат заложенному в ее основу предположению о распределении зарядов. На рис. 8.6б схематически показано экспериментально измеренное распределение заряда (см. также главу 4). На рисунке показана обширная заряженная зона, простирающаяся от поверхности на значительное расстояние в направлении объемной воды; это и есть заряд исключочной зоны. Теория DLVO ничего подобного не предсказывает (рис. 8.6а): поверхностный заряд должен быть полностью или почти полностью замаскирован противоположными ионами. Следовательно, теория конфликтует с реальностью.

Физикохимики тем не менее строго придерживаются теории DLVO. Поэтому многие ученые сомневаются в существовании дальнего взаимодействия зарядов, а некоторые скептики ведут себя даже довольно агрессивно [8]. Исе энергично отвечал на каждый критический выпад [9, 10]; насколько я знаю, его защита остается неуязвимой.

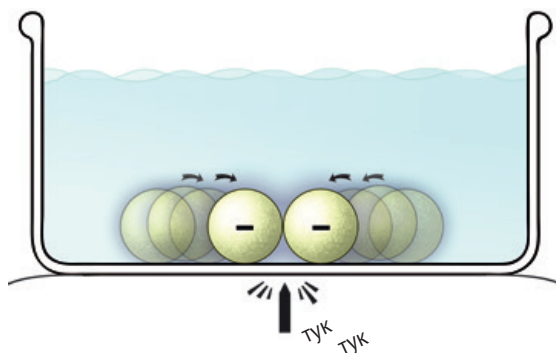
Тем не менее было интересно посмотреть, сможем ли мы подтвердить и, возможно, даже расширить тол-

Рис. 8.6. Распределение разноименных зарядов: а) распределение зарядов согласно теории DLVO, где противоположные ионы собираются рядом с заряженной поверхностью; б) экспериментально измеренное распределение зарядов

кование притяжения Фейнмана–Исе; для этого мы провели ряд экспериментов. В качестве заряженных частиц мы использовали гелевые шарики диаметром 0,5 мм. Эти шарики по молекулярным масштабам представляют собой громоздкие неповоротливые объекты – в миллионы раз больше объема микросфер, обычно используемых Исе и другими исследователями. Благодаря их размеру мы увидели, что происходит на самом деле.

Мы положили два одинаково заряженных шарика на дно маленькой камеры, содержащей чистую воду, на некотором расстоянии друг от друга. Затем мы стали наблюдать за происходящим. Иногда шарики спонтанно двигались навстречу друг другу, намекая на возможное притяжение; но чаще всего они прямо оставались на месте. Нам пришло в голову, что склонность шариков прилипать ко дну камеры может скрыть любые признаки притяжения, поэтому мы добавили в протокол эксперимента легкое постукивание по дну камеры, чтобы освободить шарики. Этот прием сработал (рис. 8.7).

Рис. 8.7. Прием, применяемый для устранения прилипания шариков ко дну камеры



При каждом толчке шарики заметно отрывались от дна и могли свободно двигаться, прежде чем осесть на дно и снова к нему прилипнуть. Периодическое постукивание позволяет нам отслеживать изменение расстояния между шариками.

Результаты [11] ясно говорят о том, что шарики неизменно притягиваются друг к другу (рис. 8.8). Сблизились даже шарики, первоначально разделенные почти на полмиллиметра. Это сближение происходило раз за разом, как с отрицательно, так и с положительно заряженными парами шариков. На самом деле положительно заряженные шарики меньше прилипали ко дну камеры и часто притягивались вообще без постукивания.

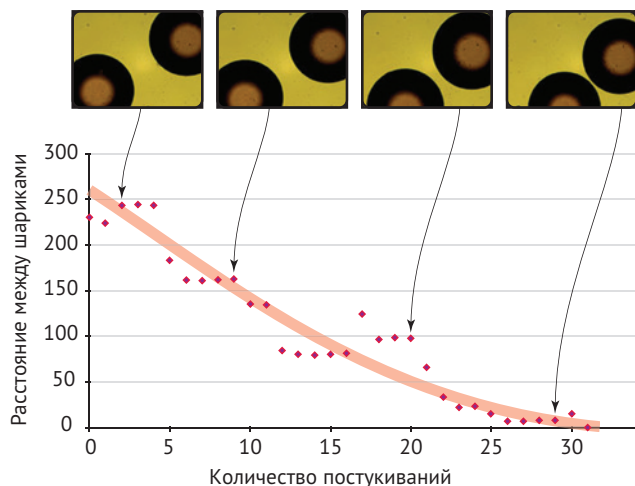


Рис. 8.8. Расстояние между шариками как функция времени. Шаррики постепенно сближаются. Изображения выше соответствуют расположенным под ними точкам данных

Таким образом, мы подтвердили притяжение в максимально простой системе: два больших шарика в воде. Похоже, что подобное притягивает подобное даже издалека – результат, который нас особенно порадовал.

Нам осталось лишь найти противоположные заряды, теоретически необходимые для обеспечения притяжения. Можем ли мы быть уверены в их присутствии? И откуда берутся разноименные заряды?

8.3. ПОДТВЕРЖДЕНИЕ НАЛИЧИЯ РАЗНОИМЕННЫХ ЗАРЯДОВ

Одним из возможных источников разноименных зарядов является исключаящая зона. Такие зоны возникают рядом с гидрофильными поверхностями за счет поглощения лучистой энергии. Поверхности могут быть плоскими или сферическими (глава 4). При формировании этой зоны заряды противоположного знака вытесняются за ее пределы (рис. 8.9а). Следовательно, взвешенная в воде отрицательно заряженная сфера должна быть окружена положительно заряженными ионами.

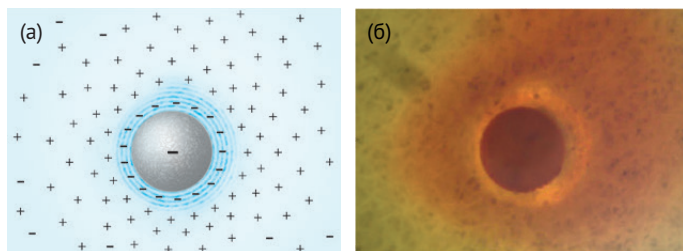
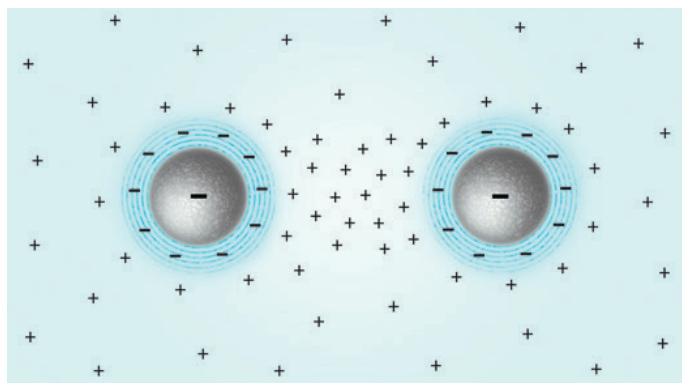


Рис. 8.9. Сферические частицы, погруженные в воду: (а) схема распределения окружающих зарядов; (б) отрицательно заряженный шарик (темная сфера) погружен в воду с pH-чувствительным красителем. Более светлая область вокруг темной сферы – это исключаящая зона, которая вытесняет краситель. Насыщенно-красная область за пределами зоны указывает на низкое значение pH, т. е. на высокую концентрацию в этой области протонов

Наши эксперименты подтвердили наличие этих положительных ионов. На рис. 8.9б изображен погруженный в воду гелевый шарик, окруженный pH-чувствительным красителем. За пределами бесцветной исключяющей зоны интенсивный красный цвет указывает на чрезвычайно низкое значение pH, т. е. на высокую концентрацию ионов гидроксония. Следовательно, две части рисунка прекрасно согласуются друг с другом.

Теперь предположим, что вместо одной отрицательно заряженной частицы у нас есть пара таких частиц; предположим также, что эти частицы расположены недалеко друг от друга (рис. 8.10). Каждая частица, покрытая EZ-оболочкой, окружена большим количеством положительных зарядов. Наибольшее количество положительных зарядов должно оказаться между частицами, так как в эту промежуточную область вносят свой вклад обе частицы.

Рис. 8.10. Предполагаемое распределение зарядов, когда две сферы расположены рядом. Положительные заряды в промежутке между ними почти не рассеиваются из-за их притяжения к отрицательно заряженным исключяющим зонам



Результат? Сферы будут двигаться *навстречу* друг другу, т. е. в направлении наибольшего положительного заряда.

Пожалуйста, обратите внимание, что этот механизм не нарушает никаких законов обычной физики. Одноименные заряды *не притягиваются*. Взаимное притяжение испытывают только разноименные заряды, как вы знаете из начального курса физики. Наибольшее количество противоположных зарядов находится в промежутке между частицами. Таким образом, даже при неожиданно большом расстоянии между частицами найдется достаточное количество зарядов противоположного знака, опосредующих притяжение (рис. 8.8).

Можем ли мы обнаружить эти заряды?

Наличие зарядов-посредников удалось обнаружить в экспериментах с шариками макроскопических

размеров [11]. Мы сделали это двумя способами. Во-первых, мы использовали pH-чувствительные красители (рис. 8.11): цвет красителя подтвердил, что наибольшее количество протонов находится между двумя отрицательно заряженными шариками (а); краситель также показал, что в случае с двумя положительно заряженными шариками концентрация OH^- (высокое значение pH) также наиболее высока в промежутке между шариками (б).

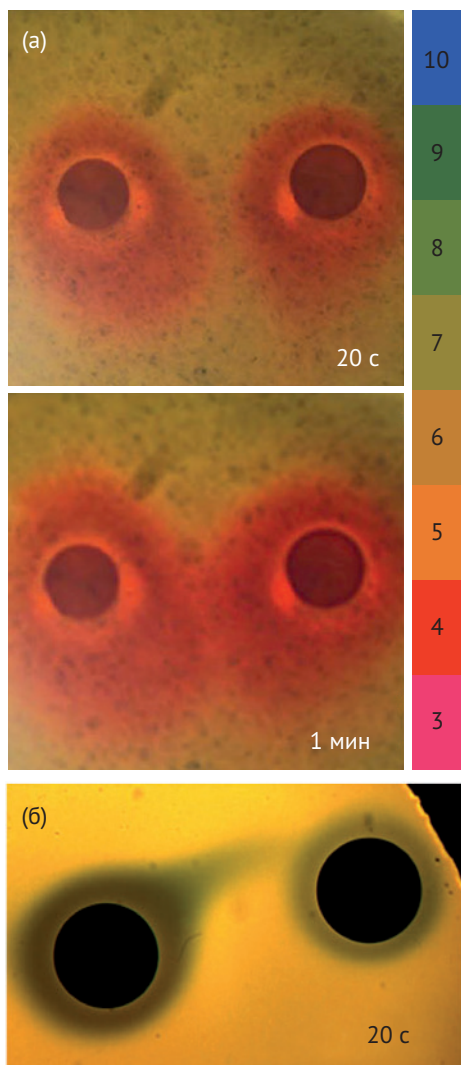


Рис. 8.11. Противоположные заряды, расположенные между одинаково заряженными сферами: (а) краситель показывает область низкого pH (многочисленные протоны или ионы гидроксония) между двумя отрицательно заряженными шариками. Справа – шкала pH; (б) между двумя положительно заряженными шариками расположена область с высоким значением pH (отрицательные заряды). Отрицательные заряды иногда сливаются в мостоподобные структуры, как показано на снимке. На всех снимках дрейф жидкости слегка сдвигает противоположные заряды-посредники от центра

Во втором тесте мы использовали тонкие микроэлектроды, расположенные в различных точках в промежутке между шариками. Эти электроды показали то же самое, что и эксперименты с красителем: электри-

ческий потенциал с полярностью, противоположной полярности исключаяющей зоны [11].

Следовательно, противоположные заряды, опосредующие притяжение, действительно существуют. Гипотеза Фейнмана подтвердилась.

8.4. БАЛАНС СИЛ И УСТАНОВЛЕНИЕ КОНЕЧНОГО СОСТОЯНИЯ

При наличии механизма, объясняющего притяжение одноименных зарядов, возникает вопрос: когда же прекращается встречное движение? Наблюдения показывают, что сферы, как правило, перестают двигаться до того, как они встречаются друг с другом (рис. 8.3); но почему так происходит? Почему частицы не сталкиваются?

Ответ заключается в том, что одноименные заряды отталкиваются. Отталкивающая сила невелика, пока одноименно заряженные частицы находятся на большом расстоянии друг от друга; там доминирует притяжение. По мере того как отрицательно заряженные частицы приближаются друг к другу, их взаимное отталкивание нарастает. Встречное движение прекращается, когда растущая сила отталкивания уравновешивает силу притяжения.

Такое равновесие может установиться в одном из двух конечных состояний, и в наших экспериментах мы видели их оба. В случае использования типичных частиц микронного размера в воде конечное состояние возникает, когда частицы остаются на некотором расстоянии друг от друга (рис. 8.12, сверху). В этом случае баланс отталкивающих и притягивающих сил образует стандартный коллоидный кристалл, показанный на рис. 8.3.

В случае использования более крупных частиц, таких как полумиллиметровые шарики, сила притяжения может превосходить силу отталкивания, даже когда частицы соприкасаются. Причина заключается в масштабе: фланговые области рядом с точкой соприкосновения по-прежнему разделены значительными зазорами (рис. 8.12, внизу), в которых помещается множество противоположно заряженных частиц, поддерживающих притяжение. Между тем отталкивание остается относительно слабым из-за больших расстояний между отрицательно заряженными поверхностями. В подобной ситуации притяжение преобладает даже при буквальном столкновении сфер – притяжение продолжает удерживать их вместе.

При наличии множества сфер столкновения перерастают в агрегацию. Снова возникает упорядоченная кристаллическая структура, но уже при тесном контакте элементов друг с другом.

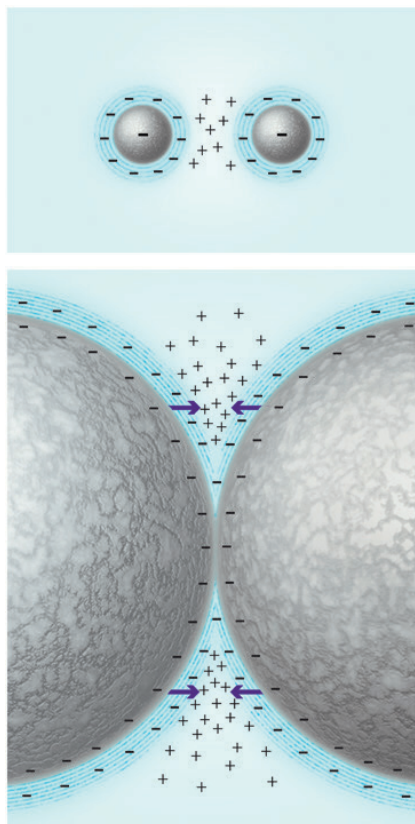


Рис. 8.12. Стабильные состояния для более мелких (верхняя) и более крупных частиц (нижняя). Равновесие возникает, когда сила притяжения уравнивает силу отталкивания

В любом случае, кристаллы образуются, когда отталкивающие и притягивающие силы уравниваются друг друга. Избыточные заряды удерживают систему в устойчивом равновесии даже при наличии зазоров между крупными частицами. Поскольку баланс зависит от разноименных зарядов, можно ожидать, что падающий свет повлияет на расстояние. Эксперименты подтвердили это предположение [12]: увеличение освещенности заставляет частицы сближаться.

8.5. РАСТВОРЫ ПРОТИВ СУСПЕНЗИЙ

Рассказывая о коллоидных частицах, я неоднократно использовал термин «суспензия». Что такое суспензия? И чем взвешенные объекты отличаются от растворенных?

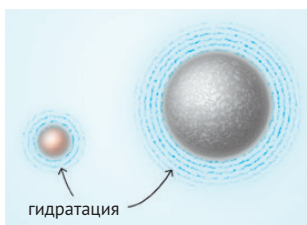


Рис. 8.13. Одинаковая гидратация молекулы и частицы подразумевает, что раствор и суспензия в принципе схожи

Физикохимики проводят четкую границу между этими двумя явлениями. Химики считают молекулы частью раствора, потому что они взаимодействуют с окружающей водой, т.е. молекулы обладают «гидратными оболочками». Другое дело – частицы. Согласно преобладающему мнению, частицы просто смешиваются с водой, оседая на дно.

Однако на самом деле частицы явно *взаимодействуют* с водой: они образуют исключаяющие зоны, которые следует понимать как «гидратацию».

В этом смысле взвешенные частицы во многом схожи с молекулами растворенных веществ (рис. 8.13). Они управляются одними и теми же регулирующими механизмами. Чтобы понять логику этого аргумента, представьте объект, размер которого лежит на границе между частицей и молекулой. Этот объект взвешен или растворен? Какой набор правил должен регулировать его поведение?

Если эти два явления основаны на одном принципе, то можно надеяться, что преобладающая интерпретация изменится и непререкаемые толкования, которыми сейчас заполнены учебники по химии, уступят место более простым определениям.

8.6. ВОЗМОЖНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ

Главная мысль этой главы заключается в том, что, похоже, все частицы притягиваются друг к другу. Противоположности притягиваются, и мы только что видели, как подобное стремится к подобному. В данном случае эффективное словосочетание «подобное стремится к подобному» звучит наиболее уместно, но я подчеркиваю, что правила традиционной физики остаются неизменными; физика все еще работает так, как вас учили. Дело в том, что притяжение практически универсально; по крайней мере, так оно работает в воде.

Однако внутренние механизмы этих двух разновидностей притяжения различаются, особенно с точки зрения энергии. Мы воспринимаем притяжение противоположно заряженных объектов как аксиому: до сих пор ни одно наблюдение не поставило под сомнение утверждение о том, что положительное притягивает отрицательное. Чтобы сработало это притяжение, не требуется энергия. Напротив, когда частицы с противоположными зарядами приближаются друг к другу, они фактически высвобождают потенциальную энергию, накопленную при разделении зарядов.

Сложнее устроен механизм притяжения одноименно заряженных частиц. Здесь притяжение в конечном счете возникает за счет поглощенной энергии: внешняя лучистая энергия создает исключаящую зону и разделяет заряды, выступающие посредниками притяжения. Чем интенсивнее падающий свет, тем интенсивнее притяжение [12]. Следовательно, притяжение одноименных зарядов нуждается в энергии: до тех пор, пока Солнце продолжает дарить нам энергию, одинаково заряженные объекты будут продолжать притягиваться.

Притяжение одноименных зарядов не ограничивается коллоидными частицами, взвешенными в воде. Исключающие зоны также встречаются в различных полярных растворителях, включая этанол и уксусную кислоту [13]. Подобный принцип разделения зарядов должен применяться и в этом случае. Теоретически этот принцип применим не только к жидкостям, но и в любой ситуации, когда электромагнитная энергия приводит к разделению зарядов – от атомного до космического масштаба.

Карамельные кристаллы

Кристаллы соли и сахара представляют собой крайние случаи явления «подобное стремится к подобному». Для получения кристаллов сахара вы растворяете сахар (сахарозу) в воде и нагреваете раствор в присутствии затравочного кристалла. По мере того как вода медленно охлаждается и испаряется, образуется «твердый» кристалл – леденец. Его многочисленные противоположные заряды удерживают его в твердом состоянии.

Наличие этих зарядов можно подтвердить раскалыванием леденца в темноте (см. рисунок). Когда кристалл-леденец трескается, разделенные заряды перепрыгивают через трещину, создавая разряд, похожий на молнию.

Искры проще всего получить при помощи леденцов Lifesaver со вкусом ментола, завернутых в индивидуальную прозрачную упаковку.



Возьмите плоскогубцы, поместите завернутую конфету между губок, погасите свет и дайте глазам приспособиться к темноте. Затем с помощью плоскогубцев раздавите леденец по длинной оси, и вы увидите вспышку. (Затем, развернув обертку, вы сможете насладиться леденцовой пылью.) Чтобы усложнить эксперимент, разверните упаковку, и пусть ваш друг разгрызет леденец: если рот вашего друга достаточно сухой, вы увидите голубые искры.

Несколько примеров:

- *атомные объекты.* Рассмотрим газообразный водород. Два ближайших атома водорода разделяют электронные облака, образуя газ. Таким образом, отрицательные заряды расположены между двумя положительно заряженными ядрами;
- *физические объекты.* Массив одинаково заряженных металлических шариков, помещенных на мягко встряхиваемую изоляционную подложку, вскоре приобретает двумерный порядок; и, конечно же, между этими заряженными металлическими шариками лежат противоположные заряды на изоляционной подложке [14]. Это явление напоминает формирование двумерного коллоидного кристалла;
- *биологические объекты.* Рассмотрим только что синтезированные биомолекулы, которые самостоятельно собираются в более крупные структуры, включая нити и везикулы. Механизм сборки подобных объектов не до конца понятен. Может ли механизм «подобное стремится к подобному» объединить эти молекулы?
- *живые организмы.* Поведение рыб в косяках обычно объясняют эволюционным развитием. Однако поверхность рыбы покрывает слизистое, похожее на гель вещество. Гелеподобные вещества создают исключаяющие зоны, а за их пределами располагаются протоны. Могут ли рыбы с пользой для себя использовать механизм «подобное стремится к подобному», чтобы более эффективно объединяться в группы?
- *космический масштаб.* Доминирующим веществом в космосе является заряженная плазма [15]. «Пылевая» плазма встречается в кольцах Сатурна, в хвостах комет и в многочисленных межзвездных облаках, заполняющих космос. Частицы этой пылевой плазмы располагаются в упорядоченных кристаллоподобных структурах. Эти плазменные кристаллы настолько похожи на коллоидные, что их часто называют «коллоидной плазмой».

Таким образом, хотя механизм «подобное стремится к подобному» изначально был доработан для объяснения парадоксального поведения коллоидных частиц в воде, применимость этого принципа охватывает широкий спектр явлений от атомного до космического масштаба, включая явления, которые мы видим каж-

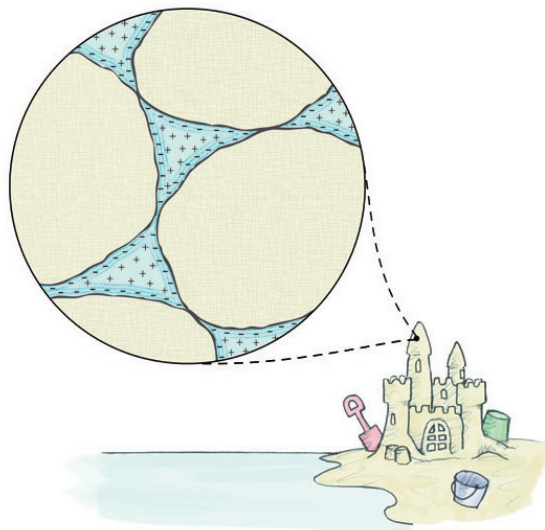
дый день, но на самом деле не понимаем – и никогда не думаем объяснять подобным механизмом.

Пара примеров:

- *облака*. Взгляните на пухлое белое облако в чистом голубом небе (рис. 1.2). Облака состоят из капель воды. Капли с одноименным зарядом обычно должны рассеиваться, но очевидно, что они концентрируются, образуя отдельные облака, которые мы видим. В основе такого объединения вполне может лежать механизм «подобное стремится к подобному» – механизм притяжения с участием противоположных зарядов-посредников, удерживающий эти капли вместе, в результате чего образуются отдельные облака.
- Если капли расположены регулярно, как в коллоидном кристалле, то это дает ответ на некоторые загадки. Представьте себе, как пучок солнечного света поздним вечером освещает одно из этих облаков. Капли, из которых оно состоит, рассеивают падающий свет во всех направлениях. Если эти капли расположились на одинаковом расстоянии, то свет будет рассеиваться под определенным углом, в зависимости от длины волны. Результат: великолепная радуга;
- *песчаные замки*. Прочность замков из песка (глава 1), построенных, чтобы защитить нас от вторжения воображаемых флотилий, тоже может быть основана на механизме «подобное стремится к подобному». Эти замки построены не только из песка; они содержат воду, благодаря чему вокруг каждой частицы песка возникает исключаяющая зона (рис. 8.14). Поэтому между обернутыми в исключаяющую зону частицами песка лежат протонированные молекулы воды. Эти прослойки образуют клей, который скрепляет песчинки.

Позвольте мне предположить, что механизм «подобное стремится к подобному» может быть универсальным. Как минимум, его существование сводит на нет рефлекторное представление о том, что одинаковые заряды *должны* отталкиваться, – и заменяет это представление более утонченной моделью взаимодействия частица–частица, которая включает в себя притяжение. Если эта модель найдет убедительное подтверждение, то несколько базовых научных понятий окажутся под угрозой.

Рис. 8.14. Силы притяжения склеивают частицы песка между собой



Так что не удивляйтесь, если мы вернемся к этому механизму в следующих главах; он раскрывает необъяснимые в противном случае явления. *Потенциально, механизм «подобное стремится к подобному» может быть основополагающим для всей природы.*

8.7. Вывод

Заряд обволакивает частицы, взвешенные в водной среде. Этот заряд возникает по мере того, как вода преобразует энергию окружающей среды в структурированные исключаяющие зоны. Исключаяющие зоны имеют одну полярность, в то время как вода за пределами этих зон содержит заряды противоположной полярности. Большинство таких противоположных зарядов скапливаются между соседними частицами, поэтому частицы притягиваются и движутся навстречу друг другу. Возникает естественное притяжение одноименно заряженных частиц.

Это притяжение, известное как механизм «подобное стремится к подобному», возникает из-за наличия зарядов противоположного знака, лежащих между одноименно заряженными частицами. Противоположные заряды притягиваются. Следовательно, законы физики не нарушаются. На самом базовом уровне, как и прежде, противоположности притягиваются друг к другу.

Оцените философское воплощение этого притяжения. В японской культуре (в датируемой XI веком «Сказке о Гэндзи») способ сближения двух враждующих сторон заключается в том, чтобы поставить между

ними привлекательную женщину, которая объединяет мужчин (рис. 8.15). Мы видим здесь сходный механизм: вмешательство противоположности создает притяжение. Таким образом, притяжение более или менее универсально: притягиваются не только противоположности, но и схожие сущности. Если вы позволите мне некоторую поэтическую вольность, я считаю, что мир, наполненный притяжением, выглядит более гостеприимным, чем мир, наполненный отталкиванием.



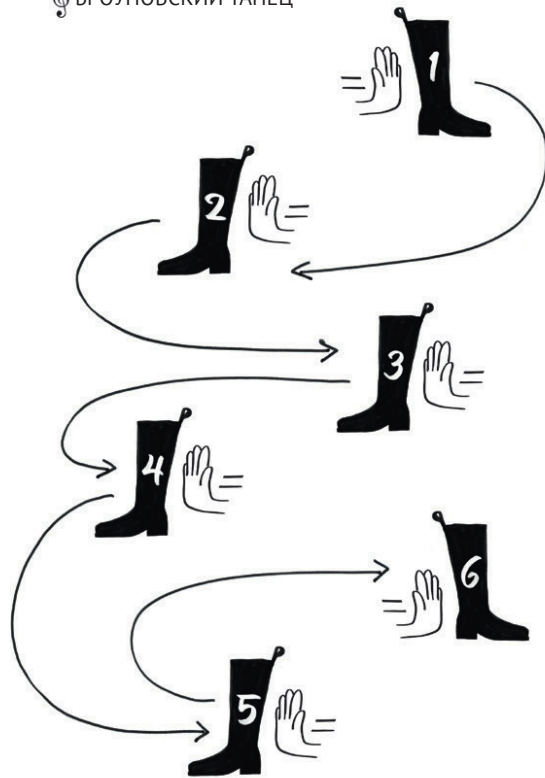
Рис. 8.15. Противоположности могут сойтись при определенных обстоятельствах

Механизм «подобное стремится к подобному» лежит в основе следующей главы, которая посвящена броуновскому движению: дерганому танцу взвешенных частиц.

Мой интерес к броуновскому феномену был вызван очевидным парадоксом: частицы, взвешенные в воде, обычно танцуют. Однако как только частица получает свое место в коллоидном кристалле, ее движение практически прекращается. Частица спокойно замирает на месте на некотором расстоянии от каждого из своих ближних соседей. Мне показался любопытным не только переход от движения к покою, но и сам нервный танец: кажется, что частицы обладают некой внутренней энергией, как будто они практически живые.

Меня преследовал вопрос: почему частицы кажутся такими живыми во взвешенном состоянии, а при вовлечении в организованный массив они практически умирают? Я не мог перестать думать об этом. В конце концов, эти мысли пролили свет на новое понимание броуновского движения, подробно описанное в следующей главе.

♩ БРОУНОВСКИЙ ТАНЕЦ



Глава 9

Броуновское движение – танец под музыку энергии

В начале XIX века шотландский ботаник Роберт Броун³ (Robert Brown, рис. 9.1) обнаружил нечто странное. После того как Броун поместил несколько крупиц пыльцы в контейнер с водой, он заметил, что они совершают своеобразные суетливые движения – вместо того чтобы безжизненно замереть в воде, крупинцы исполняли бесконечный танец. Вскоре он обнаружил, что эти движения характерны не только для пыльцы, но и для спор, пыли и даже крошечных осколков оконного стекла.

Этот хаотичный танец стал известен как броуновское движение, несмотря на то что первые сообщения о таком движении появились на полвека раньше. В отличие от других исследователей, Броун впервые показал, что это, казалось бы, самопроизвольное движение демонстрируют не только объекты биологического происхождения, но и любые другие микроскопические частицы. Другими словами, броуновское движение было универсальным свойством природы.

Какая энергия питает этих броуновских «танцоров»? Почему инертные частицы бесконечно перемещаются туда-сюда, когда утверждается, что «вечное движение» невозможно? Общепринятое объяснение причин этого своеобразного движения давно известно, однако оно не учитывает количество лучистой энергии, поглощенной из окружающей среды. В этой главе мы спрашиваем, может ли поглощенная энергия дать нам новое (и, возможно, более простое) объяснение причин этого движения.

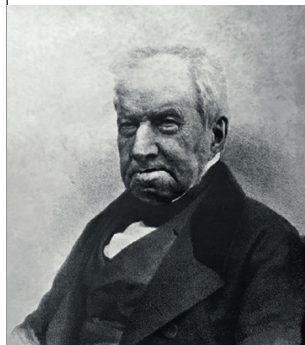


Рис. 9.1. Роберт Броун (1773–1858)

³ Исторически принятое русское написание фамилии ученого. – Прим. перев.

9.1. БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ ПО МНЕНИЮ ЭЙНШТЕЙНА

Наблюдения Броуна поначалу сбивали с толку физиков. Движение требует энергии, но источник этой энергии остался неясным. Энергия, поступающая из окружающей среды, казалась маловероятной причиной, поскольку ученые предполагали, что стакан воды, стоявший некоторое время на столе, находится в равновесии с окружающей средой; похоже, что вода не получает никакой избыточной энергии для обеспечения движения. Физики дружно почесали затылки, но ответа на этот вопрос так и не нашли.

Потом пришел Эйнштейн. В плодотворном 1905 году Эйнштейн опубликовал новаторские работы по трем направлениям: особая теория относительности, фотоэлектрический эффект и броуновское движение. У него был хороший год. Объяснение броуновского движения, предложенное Эйнштейном, не требовало постоянного притока движущей энергии. Вместо этого он опирался на постоянно присутствующую внутреннюю энергию, которая проявляется как температура.

Эйнштейн считал, что броуновское движение вытекает в основном из двух явлений: осмос и трение. Осмос – это явление, при котором вода движется в направлении растворов или частиц; концентрация воды всегда стремится к уравниванию. Эйнштейн воспринял это присущее молекулам воды стремление как генератор движения.

Чтобы понять, как это может происходить, представьте себе некие частицы, взвешенные в воде. Отдельную частицу можно рассматривать как пространство, свободное от воды. Из-за осмотического движения молекулы воды всегда стремятся занять это пространство. Иногда молекулы воды натываются на частицу, провоцируя ее движение.

Эйнштейн понимал, что любое перемещение частицы в жидкости должно преодолеть трение. Чтобы учесть это вязкостное сопротивление, он применил стандартное уравнение трения, известное как закон трения Стокса. Эйнштейн заявил, что движущая сила осмоса равна силе сопротивления трения, и тем самым сформулировал современное объяснение броуновского движения.

Это упрощенное изложение недооценивает утонченность рассуждений Эйнштейна. Он задумался не только о происхождении движения, но и о его при-

роде. Он сравнил движение молекул воды с движением молекул газа. Молекулы газа, согласно хорошо сформулированной к тому времени кинетической теории, сталкиваются в случайном порядке; кинетика их движения выводится из температуры газа. Температура рассматривалась как мера движения.

Эйнштейн постарался распространить эту кинетическую теорию газа на жидкости. Полагая поведение молекул воды аналогичным поведению молекул газа, он предположил, что молекулы воды движутся более или менее хаотично, иногда ударяя по взвешенным частицам и толкая эти частицы в разные стороны (рис. 9.2).

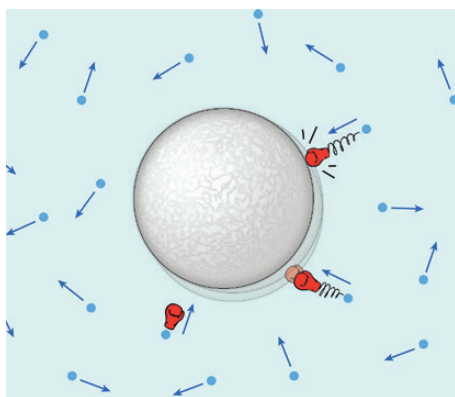


Рис. 9.2. Происхождение броуновского движения по Эйнштейну. Молекулы воды непрерывно бомбардируют частицу. Эта механическая энергия порождает движение

Конечно, единичные удары не вызывают большого перемещения. Масса молекулы воды примерно в 10 000 000 раз меньше, чем у частицы микронного размера. Так что ее удар будет слабым. Мой друг Эмилио дель Джудиче (Emilio Del Giudice) сравнивает это воздействие с ударом комара о лобовое стекло грузовика – он не вызовет заметного отклонения грузовика от своего курса. Чтобы повлиять на грузовик, вам понадобится много комаров.

Во всяком случае, используя кинетическую теорию газов, Эйнштейн пришел к уравнению, описывающему динамику броуновского движения (см. врезку на стр. 203). Это уравнение предсказывает величину смещения частиц (на самом деле среднее квадратичное смещение частиц) с течением времени.

С помощью этой формальной теории Эйнштейн описал, что должно происходить с частицей, взвешенной в сосуде с молекулами воды. Молекулы воды, по его мнению, должны совершать случайные движения. Иногда эти молекулы сталкиваются с частицей. Поскольку столкновения происходят в случайные моменты, частица будет испытывать хаотичные пе-



Рис. 9.3. Броуновское движение, описанное как походка пьяного моряка

ремещения, которые напоминают походку пьяного моряка (рис. 9.3).

Теория Эйнштейна привела к рождению понятия «теплового» движения. Согласно его формулировке (см. стр. 203), броуновское движение частицы в жидкости должно зависеть от температуры. По мере повышения температуры должны увеличиваться и перемещения частицы. Исходя из зависимости от температуры, Эйнштейн предложил называть такие движения «тепловыми», или «термическими». Физики стали воспринимать температуру как отражение этого движения: атомы и молекулы, танцующие с интенсивностью, измеренной с точки зрения температуры.

Хотя ученые в целом согласны с Эйнштейном, поначалу его выводы столкнулись с резким неприятием. В своем историческом обзоре Бруш (Brush) [1] представляет увлекательный отчет о сопротивлении теории Эйнштейна. Физики весьма скептически отнеслись к тому, что они считали сомнительными теоретическими выкладками. Закон Стокса, например, был сформулирован для описания трения в макроскопических системах, таких как качающиеся маятники, но Эйнштейн предположил, что этот закон применим и к микроскопическим объектам, участвующим в броуновском движении. Кроме того, некоторые физики полагали, что столкновения молекул воды с частицами (аналогично столкновению комаров с грузовиком) не настолько сильны, чтобы объяснить наблюдаемые движения частиц, если только столкновения не будут скоординированы. Другие физики высказывали опасения по поводу взаимоисключающих предположений: осмотическая теория подразумевала, что молекулы воды должны ударяться о поверхность частицы, а затем отскакивать, но закон Стокса подразумевал, что эти молекулы должны оставаться рядом с частицей, для того чтобы создать трение. Эти проблемы волновали физиков того времени.

Далее Бруш описывает еще один спорный вопрос: общий подход Эйнштейна. Этот подход опирался на абстрактную форму статистической механики, суть которой некоторые физики считали трудной для понимания.

Вдобавок к теоретическим затруднениям некоторые экспериментальные наблюдения противоречили предсказаниям Эйнштейна. Современники, такие как Сведберг (Svedberg) и Анри (Henri), обнаружили, что перемещения частиц в четыре–семь раз превышают

предсказания Эйнштейна. Эти ученые не стеснялись громко заявлять о противоречиях.

Тем не менее по мере роста научного авторитета Эйнштейна сопротивление его теории постепенно растаяло; в течение нескольких десятилетий теория Эйнштейна стала общепринятой. К настоящему времени тепловое движение стало считаться одним из самых фундаментальных законов природы. Считается, что каждый атом, каждая молекула и каждая частица исполняют этот вечный тепловой танец; из таких танцевальных па произошло наше современное понимание физики твердого тела. Не будет преувеличением сказать, что концепция теплового движения стала практически столь же фундаментальной, как ньютоновские законы движения или теория атомного строения материи.

9.2. ВОПРОСЫ БЕЗ ОТВЕТОВ

Поскольку все возражения современников Эйнштейна теперь уже давно забыты, вы могли подумать, что на все поставленные тогда вопросы, касающиеся броуновского движения, получены исчерпывающие ответы. Однако это не так. Теория не соответствует современным экспериментальным наблюдениям, по крайней мере в трех отношениях: (1) когда в воду добавляется соль; (2) когда концентрация частиц относительно высока и (3) когда включается свет. Позвольте мне вкратце остановиться на этом.

Что касается ситуации (1), то броуновское движение измеряли в чистой воде и в воде, содержащей различное количество соли [2]. Добавление соли увеличивало размах перемещений, т. е. усиливало хаотичное дрожание частиц. Теория Эйнштейна не дает очевидного объяснения того, почему в присутствии соли молекулы воды более часто или более энергично ударяются о частицы.

Теория Эйнштейна также не предполагает влияния концентрации частиц (2). При высоких концентрациях движения соседних частиц часто становятся синхронными: когда одна частица движется, другие частицы, находящиеся поблизости, часто движутся в том же направлении. Такое синхронное поведение проявляется также в коллоидных кристаллах [4] и при высоких концентрациях частиц с добавлением соли [5]. Синхронизация создает проблему для классической теории, которая подразумевает только случайные движения. Согласованного движения частиц не должно быть.

Возможное решение этой проблемы может заключаться в том, что классическая теория не применима к случаям высокой концентрации: если концентрация частиц достаточно высока, чтобы вытеснить всю воду из промежутка между частицами, то поблизости не окажется молекул воды, попадающих в частицы, поэтому теория Эйнштейна больше не применима. Тем не менее в упомянутых исследованиях концентрация частиц редко была настолько высока: расстояние между частицами, как правило, измерялось микрометрами и соответствовало ряду из тысяч молекул воды; следовательно, в промежутке между частицами должно быть много подвижных молекул, делающих свою работу. Конфликт между теорией и практикой не исчерпан.

Синхронность – не единственный вид наблюдаемого неслучайного поведения. При высоких концентрациях частиц исследователи обнаружили «прыгающее» движение [6, 7]. Частица в течение некоторого времени дрожала вблизи почти неподвижной точки; затем она прыгала к новому положению, где продолжала дрожать. Это было похоже на прыжок частицы из одной ячейки в другую. Подобное ячеистое перемещение представляет собой еще одно явное отклонение от предсказанной теорией прямой зависимости между пройденным среднеквадратичным расстоянием и временем.

Воздействие света (3) приводит к еще одному противоречию. Хотя исследования столетней давности, выполненные Гоуи (Gouy), отрицают влияние света на броуновское движение, более современные инструменты выявили глубокие и воспроизводимые эффекты. Добавление даже скромного количества световой энергии уменьшает размах дрожания частиц (рис. 9.4). Уменьшение зависит от интенсивности и длины волны и легко достигает 50 % [8].

Воздействие света можно было бы игнорировать, если бы оно работало косвенно, через увеличение температуры, вызванное освещением; однако повышение температуры в вышеописанных экспериментах составило менее 1 °С. На самом деле повышение температуры вообще не подходит в качестве теоретического объяснения: теория Эйнштейна предполагает, что любое повышение температуры должно увеличить перемещения частиц, но свет производит обратный эффект. Таким образом, этого объяснения в любом

случае недостаточно, чтобы спасти формулировку Эйнштейна.

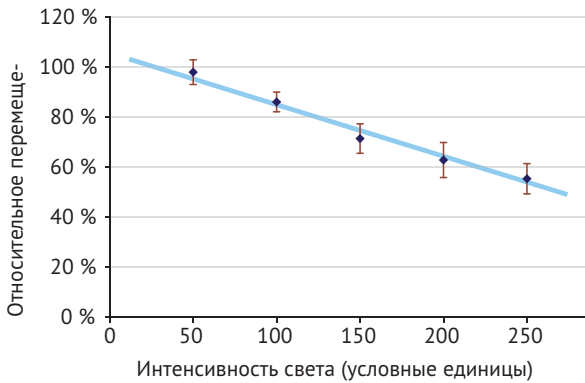


Рис. 9.4. Перемещения микросферы, измеренные в течение фиксированного периода времени при различной интенсивности падающего света. При более высокой интенсивности света смещения уменьшаются

Эффект, вызванный воздействием света, не имеет очевидного объяснения в классических рамках. С другой стороны, эффект выражен настолько сильно, что требует объяснений. Мы скоро дадим ответ на этот вопрос.

Помимо трех только что упомянутых противоречий, из-за неясного характера движущей силы возникает четвертая проблема. Эйнштейн предложил осмос в качестве движущей силы броуновского движения. Он сделал это потому, что осмотическое движение в свое время рассматривалось как фундаментальное явление природы, на том же уровне, как, скажем, притяжение между положительным и отрицательным зарядами. Однако с тех пор осмотический механизм стал более неопределенным и остается предметом дебатов. В главе 11 представлены доказательства того, что осмотическое движение является следствием разделения зарядов, а не фундаментальным явлением природы, как утверждает классическая теория.

Подводя итог, можно сказать, что хотя теория броуновского движения Эйнштейна получила широкое признание и подходит для некоторых экспериментальных результатов, она противоречит другим наблюдениям, не только в прошлом, но и в настоящее время. Эти противоречия означают, что теория в лучшем случае является неполной. Более того, я утверждаю далее, что теория ошибочна: она не учитывает движущую силу, основанную на поглощении внешней энергии, которая может влиять или даже вызывать наблюдаемое броуновское движение.

9.3. НЕРАВНОВЕСИЕ – ЕЩЕ ОДНА

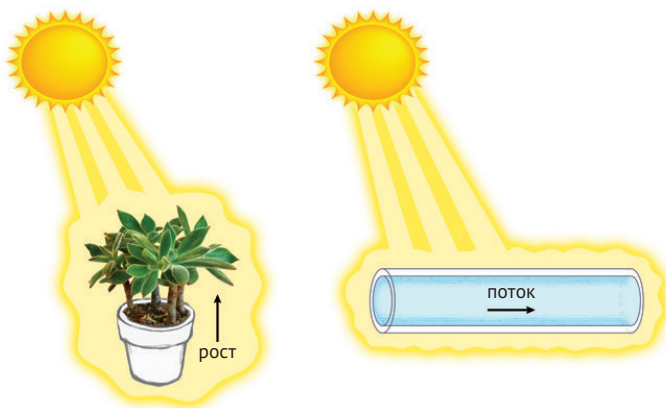
ПРОБЛЕМА БРОУНОВСКОГО ДВИЖЕНИЯ

Теория Эйнштейна основывается на предположении, что система находится в равновесии. Пока температура окружающей среды остается стабильной, система не должна ни накапливать, ни терять энергию. Горшок с теплой водой, безусловно, рассеивает энергию в окружающую среду, и стакан холодной воды может поглощать энергию; но закрытый сосуд с водой, находившийся в комнате в течение некоторого времени, не должен ни терять, ни поглощать энергию. Так предполагает классическая теория.

Тем не менее в главе 7 представлены доказательства того, что вода при комнатной температуре постоянно поглощает электромагнитную энергию из окружающей среды. Эта поглощенная энергия создает упорядоченную структуру и разделяет заряды – накапливая потенциальную энергию, которая впоследствии может выполнять различную работу. Посредством подобного преобразования энергии вода функционирует так же, как и все обычные работающие двигатели: вне равновесия.

Работа вне равновесия свойственна даже одному из самых первичных для жизни механизмов на водной основе – фотосинтезу (рис. 9.5). При фотосинтезе фотоны, поступающие из внешней среды, расщепляют воду, а продукты расщепления стимулируют обмен веществ, рост, движение жидкости и т. д. Поглощаемая световая энергия постоянно идет на выполнение какой-либо работы – это означает, что система находится вне равновесия.

Рис. 9.5. Энергия излучения производит работу в растениях и в воде; эти два процесса концептуально схожи. Перерабатывая внешнюю энергию, оба процесса функционируют в неравновесных условиях



Следовательно, презумпция равновесия в классической теории вступает в противоречие с доказательством того, что *вода находится вне равновесия*. И вода, и растения (последние состоят в основном из воды) работают вне равновесия: поступающая энергия непрерывно питает систему, как топливо непрерывно питает ваш автомобиль. Если вода находится вне равновесия, то любое объяснение броуновского движения, построенное на презумпции равновесия, выглядит сомнительно.

Это серьезная проблема. Частицы непрерывно движутся и совершают работу, но в классическом понимании, для того чтобы выполнять эту работу, не требуется никакой внешней энергии. Внутренней энергии достаточно – бесконечно много. Тот факт, что работа броуновского движения может продолжаться без всякой внешней поддержки, подвергает сомнению классическую теорию.

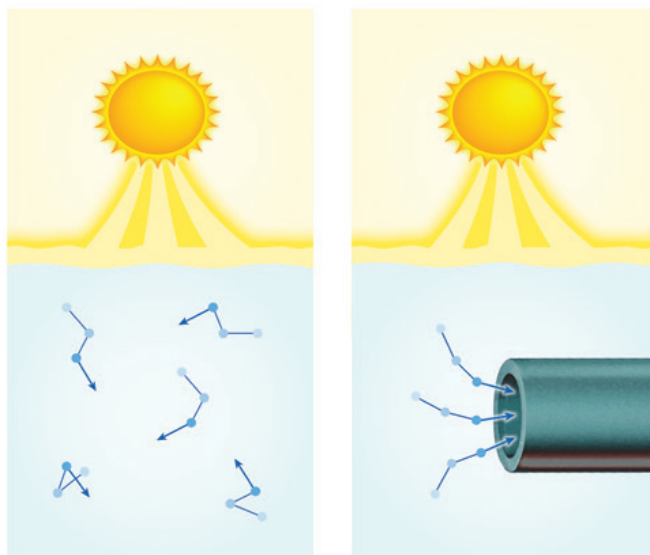
9.4. АЛЬТЕРНАТИВНАЯ ПРИЧИНА БРОУНОВСКОГО ДВИЖЕНИЯ?

Учитывая эти противоречия между теорией и экспериментами, кажется, стоит сделать шаг назад и поразмыслить. Прошло сто лет с тех пор, как Эйнштейн предложил внутреннее тепло в качестве источника броуновского движения. Тем не менее можем ли мы быть абсолютно уверены, что Эйнштейн не ошибался?

Позвольте мне предложить альтернативный источник энергии броуновского движения: внешняя электромагнитная энергия. Если поглощенная электромагнитная энергия используется для осуществления в воде различных форм работы (глава 7), то может ли эта энергия также питать броуновское движение?

Намек на то, что эта гипотеза звучит многообещающе, можно увидеть, вспомнив о воде, протекающей по гидрофильным трубкам. Подумайте об этом потоке как о сумме множества направленных броуновских перемещений. С этой точки зрения, трубка просто организует эти перемещения в коллективный поток. Поскольку электромагнитная энергия приводит в движение поток через трубку, то можно прийти к логическому заключению, что электромагнитная энергия вызывает отдельные перемещения, которые в совокупности образуют поток (рис. 9.6).

Рис. 9.6. Энергия внешнего источника вызывает перемещения, которые могут быть хаотичными или направленными, в отсутствие (слева) или в присутствии (справа) координирующего их элемента соответственно



Внешний источник питания броуновского движения также имеет смысл с точки зрения потока энергии. Вода постоянно поглощает электромагнитную энергию, которую необходимо расходовать. Поэтому можно рассматривать броуновскую работу как своего рода перепускной клапан – способ потратить всю эту поглощенную энергию. Другими словами, броуновское движение может быть естественным отражением непрерывного поглощения электромагнитной энергии водой.

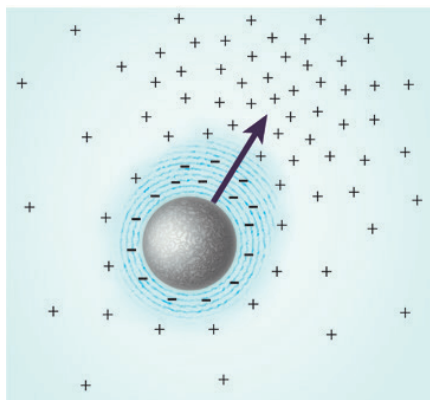
Идея о том, что в основе броуновского движения лежит внешнее электромагнитное излучение, может показаться радикальной, но она имеет предшественников. Несколько физиков XIX века считали, что электромагнитная энергия может косвенно вызывать движение, превращаясь в тепло. Позже Макс Планк, отец квантовой механики, размышлял аналогичным образом: он заинтересовался идеей о том, что электромагнитные взаимодействия могут вызывать случайные движения молекул. В конце концов, Планк пошел в другом направлении, когда эта линия рассуждений не смогла принести богатых научных плодов, на которые он рассчитывал. Тем не менее идея электромагнитного возбуждения движения молекул привлекала внимание Планка в течение двух десятилетий. Эта идея не так уж радикальна и не лишена здравого смысла.

9.5. СИЛА В ОСНОВЕ БРОУНОВСКОГО ДВИЖЕНИЯ

Хотя вышеприведенные соображения могут уместить энергетику броуновского движения в правдоподобные рамки, они ничего не говорят о непосредственной движущей силе. Какая сила может толкать частицы в разные стороны? Если мы допустим, что за этими движениями скрывается электромагнитная энергия, то как эта энергия трансформируется в движение?

Исходя из принципа бритвы Оккама, мы рассмотрим причастность исключаяющей зоны. Если электромагнитная энергия создает исключаяющие зоны, то какое-то свойство этих зон должно войти в уравнение движения. У исключаяющей зоны есть два основных атрибута: упорядочение молекул и разделение зарядов. Оба этих атрибута, похоже, заслуживают внимания. Заряд, в частности, может генерировать значительные силы, которые способны привести в движение броуновского танцора.

Чтобы понять, как заряд может приводить в движение частицу, представьте себе одиночную микросферу, взвешенную в воде. Микросфера, словно оболочкой, покрыта исключаяющей зоной. Если энергия падает равномерно со всех сторон, то эта исключаяющая зона должна быть высокосимметричной. На практике, однако, абсолютная равномерность падающей энергии недостижима; и при малейшей неравномерности мы получаем неоднородную оболочку с соответствующим неравномерным распределением зарядов (рис. 9.7).



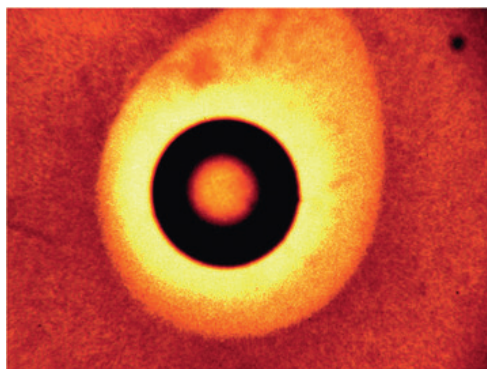
В какую сторону захочет двигаться взвешенная микросфера, изображенная на этом рисунке? Подвижный объект – это не только микросфера, это микросфера

Рис. 9.7. Более интенсивный поток энергии (сверху справа) должен давать асимметричное распределение заряда. Эта асимметрия приводит к возникновению ненулевой электростатической силы, перемещающей объект и его исключаяющую зону в направлении максимального потока падающей энергии

плюс ее исключаящая зона. Эта частица теоретически может двигаться в любом направлении, но, будучи отрицательно заряженной, она неизбежно будет двигаться в направлении наибольшего положительного заряда. На рисунке движение направлено в сторону правого верхнего угла.

Мы попытались смоделировать асимметрию исключаящей зоны (рис. 9.7) и получили положительный результат. На рис. 9.8 изображен гелевый шарик (примерно 0,5 мм в диаметре), лежащий на полу камеры. Исключаящая зона обычно равномерно покрывает шарик. Однако когда мы включали дополнительный направленный источник света, исключаящая зона увеличивалась в направлении источника. Следовательно, асимметрия, показанная на рис. 9.7, физически реализуема.

Рис. 9.8. Асимметрия исключаящей зоны вокруг гелевого шарика, возникающая в результате воздействия света, падающего сверху справа



Далее мы проверили, движется ли отрицательно заряженная исключаящая зона в направлении положительного заряда, как показано на рис. 9.7. Для этого мы использовали другой экспериментальный подход. Мы расположили систему, состоящую в основном из длинной ленты, горизонтально закрепленной в экспериментальной камере так, чтобы края ленты оказались сверху и снизу. Один конец ленты был жестко закреплен, образуя консольный рычаг (рис. 9.9а). Рядом с противоположным свободным концом к одной из кромок ленты была приклеена трубка из нафиона.

Когда мы погрузили сборку лента–нафион в воду, вокруг нафиона образовалась исключаящая зона, высвобождающая протоны (рис. 9.9б). Однако лента была достаточно большой, чтобы блокировать диффузию протонов, поэтому протоны оставались с одной стороны ленты. По мере того как эти протоны распространялись в окружающей воде, рычаг впечатляюще сгибался в их сторону (рис. 9.9в). Это наблюдение подтвердило жи-

дания: отрицательно заряженные исключаяющие зоны движутся в направлении положительно заряженных протонов – даже в направлении тех протонов, которые были рассеяны самой исключаяющей зоной. Это подтверждает принцип, проиллюстрированный на рис. 9.7.

Поэтому мы ожидаем, что частицы, подобные показанным на рис. 9.7 и 9.8, всегда будут двигаться в направлении наибольшего локального положительного заряда – на этих рисунках в сторону правого верхнего угла. Все, что нужно, – это локальная асимметрия зарядов, практически неизбежное явление в массиве частиц, на которые падает неравномерный поток энергии. Движение в направлении положительного заряда можно рассматривать как основной элемент броуновского движения.

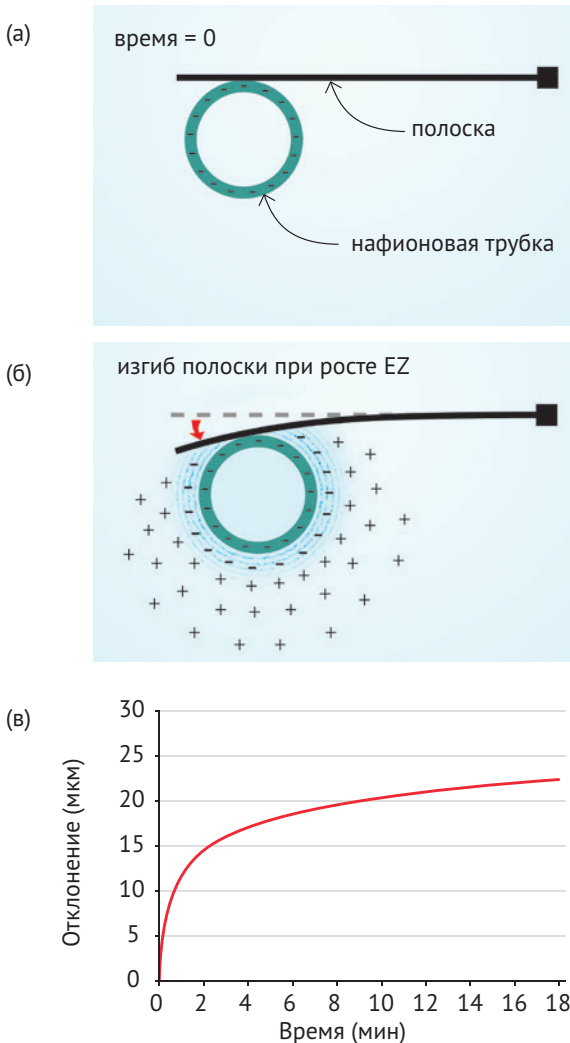


Рис. 9.9. Отклонение исключаяющей зоны в сторону протонов: (а) нафионовая трубка, установленная на лицевой стороне ленты; (б) лента, отклоняющаяся в сторону протонов; (в) изменение степени отклонения с течением времени

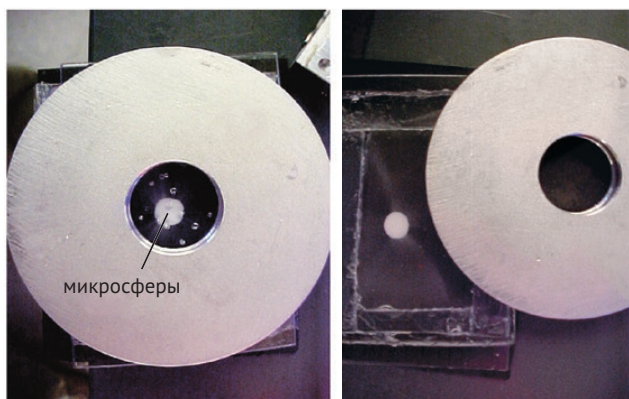
9.6. ДЕЙСТВИТЕЛЬНО ЛИ ЧАСТИЦЫ ДВИЖУТСЯ К СВЕТУ?

Если этот принцип «притяжения к заряду» действительно работает, то у него должны быть последствия. Одно из последствий вытекает из эффекта падающего света. Падающий свет создает исключаящую зону и облако противоположного заряда вокруг частиц. Если свет поступает преимущественно с одного направления, то облако противоположного заряда будет больше в этом направлении, чем в других. Поэтому взвешенные частицы должны двигаться в направлении падающего света.

Я приведу четыре примера, которые подтверждают такое поведение.

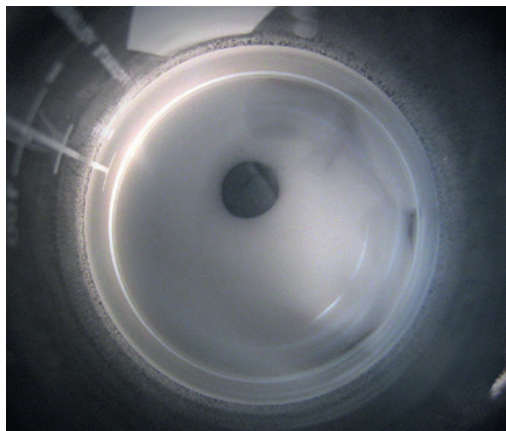
- Наглядный, хотя и относительно сложный пример – в предыдущей главе. Я упоминал, что дополнительный свет заставляет коллоидные частицы притягиваться ближе друг к другу. Он делает это, разделяя заряды, которые опосредуют притяжение. Таким образом, в областях, получающих больше света, усиливается взаимное притяжение и возникает сгущение частиц. Их конденсаты постоянно притягивают дополнительные микросферы, что равнозначно притяжению микросфер к свету.
- Вторым доказательством притяжения к свету являются эксперименты, которые ограничивают пучок падающего света. Мы пропустили пучок света через отверстие в равномерную суспензию микросфер. Микросферы двинулись в сторону освещенной области и в конечном итоге сконцентрировались в узко освещенной зоне (рис. 9.10).

Рис. 9.10. Светоиндуцированное притяжение микросфер. Свет проникает через отверстие в алюминиевой маске. Через некоторое время микросферы в камере под маской собираются в центре отверстия



Бактерии делают то же самое (рис. 9.11). Они движутся к источнику ближнего инфракрасного света так же, как микросферы наверху движутся к ограниченному пучку света. Предполагается, что бактерии реагируют на инфракрасный свет при помощи чувствительного внутриклеточного сенсора [10]. Может быть и так, но движение бактерий к свету настолько похоже на движение микросфер, что справедливо будет спросить, не действует ли здесь аналогичный физический механизм.

- Третий пример: помните ли вы вертикальный цилиндр, из которого ушли микросферы, образовавшийся в центре мензурки? Я рассказал про эту аномалию в главе 1. Первоначально микросферы были равномерно распределены по всему объему воды. В конце концов они мигрировали к периферии мензурки, оставляя вертикально ориентированный цилиндр без микросфер (рис. 9.12). Мы обнаружили, что на микросферы падал свет, равномерно освещающий мензурку со всех сторон. Этот падающий свет притягивал микросферы к периферии мензурки, оставляя середину пустой.



Сформировав цилиндр, можно дополнительно исследовать влияние света. Яркий свет с одной стороны быстро притягивал микросферы в эту сторону; цилиндр постепенно смещался в направлении менее освещенной стороны, где он в конце концов исчез. Всё это произошло в течение минуты или двух [11].

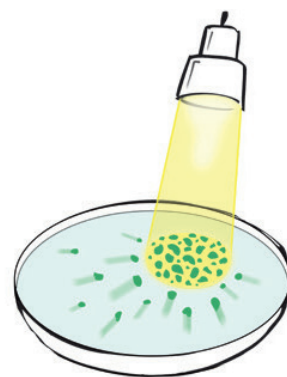


Рис. 9.11. Клетки бактерий и частицы движутся к наиболее ярко освещенной области

Рис. 9.12. Зона, свободная от микросфер в стакане (вид сверху). Вертикально ориентированная свободная зона появляется вблизи центра водной взвеси микросфер

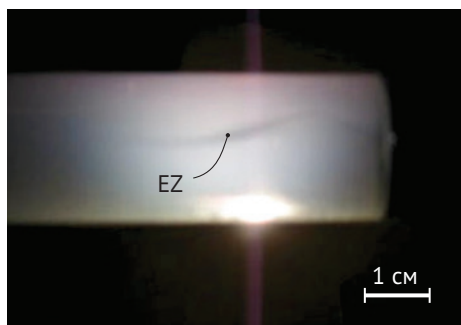
Оптический пинцет

Притяжение частиц к свету, наблюдаемое в этих четырех примерах, лежит в основе широко используемого экспериментального инструмента, называемого оптическим пинцетом. Биофизики используют оптический пинцет для перемещения частиц из точки в точку. Вы просто светите интенсивным пучком света на частицу или клетку, перемещаете пучок, и вуаля: освещенный объект следует за лучом. Фактически частица попадает в «ловушку» светового пучка, поскольку всегда ищет точку с наибольшей интенсивностью света.

Это явление «звездных войн» обычно приписывается так называемому радиационному давлению, однако механизм, показанный на рис. 9.7, дает простое альтернативное объяснение. Эта альтернатива будет применима не только для низких интенсивностей света в только что описанных экспериментах, но и для более высоких интенсивностей, обычно используемых в оптическом пинцете. Чем выше интенсивность, тем сильнее эффект захвата. Основополагающий принцип, однако, может быть одинаковым для всех интенсивностей света.

Мы видели аналогичное смещение под действием света и при постановке опытов в других вариантах. Например, мы прикрепили гелевый диск к одному из концов высокой цилиндрической камеры, которую затем наполнили водой и микросферами; затем положили цилиндр набок и наблюдали за развитием исключаяющей зоны. Исключаящая зона изменила форму – она начиналась как диск (отражающий форму зародышевого геля), но резко сужалась в конической форме, в конце концов приобретая все более стержневидную форму, по мере того как продолжала расти вдоль цилиндра. Мы часто рассматривали эти стержневидные формы с помощью фонарика или лазерного луча. Каждый раз, когда мы включали свет, исключаящая зона смещалась от источника света (рис. 9.13). Это смещение, похоже, возникло как побочное следствие притяжения окружающих микросфер к источнику света, как описано выше.

Рис. 9.13. Светоиндуцированное отклонение свободной от микросфер зоны. Эта исключаяющая зона распространяется с зародышевой поверхности, расположенной слева. Луч света направлен снизу вверх. Микросферы, притягиваемые к свету, заставляют исключаящую зону смещаться в противоположном направлении



- Четвертый пример относится к осаждению, которое мы наблюдаем в обычных суспензиях из микросфер. Обычно микросферы через некоторое время оседают на дно камеры, образуя осадочный слой. Мы обнаружили, что освещение сверху замедляет осаждение, а освещение снизу ускоряет его. И снова свет притягивает микросферы.

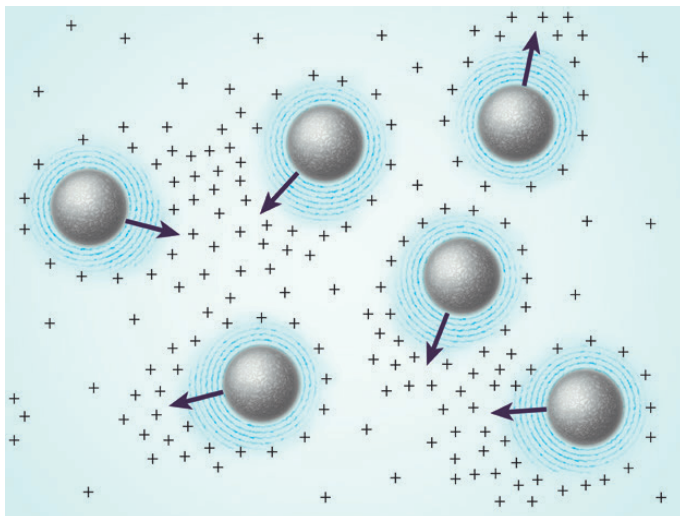
Эти многочисленные примеры не оставляют сомнений в том, что взвешенные частицы движутся к свету. Значит, мы не занимаемся пустословием: мы подтвердили реальность порождаемой светом силы, гипотетически приводящей в действие броуновское движение.

9.7. ДИНАМИКА ГРУППЫ ЧАСТИЦ

Мы не ответили на вопрос, как эти легко управляемые перемещения создают кажущиеся хаотичными движения, характерные для броуновского феномена. До сих пор мы рассматривали одну частицу: падающий свет создает асимметричное распределение зарядов вокруг частицы, которое притягивает частицу к самому высокому положительному заряду и, следовательно, к наиболее интенсивному свету.

Когда в воде обитают несколько частиц, сценарий их поведения становится более сложным (рис. 9.14). Исключающая зона одной микросферы генерирует положительные заряды. Эти положительные заряды притягивают соседние микросферы, которые движутся навстречу. Они движутся вместе со своими исключительными зонами и привлеченными ими ионами гидроксония. Эти движения изменяют локальное распределение зарядов. Они также могут перекрывать или открывать путь для света к другим микросферам и т. д. Динамика становится настолько сложной, что кажется случайной.

Рис. 9.14. Распределение зарядов, окружающих микросферы в суспензии. Стрелками обозначены предполагаемые направления движения отрицательных частиц в сторону максимумов положительного заряда. Направления будут постоянно меняться по мере движения частиц



Чтобы еще больше усложнить ситуацию, положительные ионы, высвобождающиеся из одной исключаяющей зоны, могут влиять на размер исключаяющей зоны другой микросферы: мы обнаружили, что размер зоны зависит от локальных концентраций положительных ионов. Следовательно, сценарий с участием множества частиц становится настолько сложным, что предсказать характер движения частиц становится практически невозможным.

С другой стороны, если мы правы, то локальная динамика может быть более предсказуемой. Так как движение одной частицы должно влиять на движение соседних частиц, перемещения соседей могут быть в какой-то степени связанными. Это должно быть наиболее заметно при высоких концентрациях частиц, когда заряд одной частицы может более сильно влиять на положение другой частицы. Эксперименты подтвердили это: как уже было описано, объединение частиц действительно происходит, и оно наиболее отчетливо проявляется при высоких концентрациях частиц. Это соответствует нашим ожиданиям.

9.8. ДОСТОИНСТВА МЕХАНИЗМА ДВИЖЕНИЯ, ПИТАЕМОГО СВЕТОВОЙ ЭНЕРГИЕЙ

В конечном счете мы приходим к вопросу, обладает ли предлагаемый механизм броуновского движения лучшей объяснительной силой, чем классический механизм.

Классическая формулировка работоспособна (с важными исключениями, разумеется); в противном случае она не продержалась бы так долго. Эта формулировка содержит три переменные (см. врезку): вязкость жидкости, температуру и размер частиц. Из уравнения с участием этих переменных следует, что броуновское движение должно уменьшиться, если выполнить хоть одно из следующих действий: увеличить вязкость жидкости; увеличить размер частиц или уменьшить температуру жидкости. Эксперименты подтвердили все эти ожидания. Следовательно, для объяснения этих основных переменных достаточно классической модели.

С другой стороны, новая формулировка тоже работает, а именно:

- *вязкость*. Если вы наблюдали за шмелем, увязшим в банке с медом, то видели, как вязкая среда гасит колебания. Это происходит независимо от причины колебаний. Принцип одинаково подходит как для нового, так и для старого механизма;
- *размер частиц*. Крупные частицы должны колебаться меньше, чем мелкие, потому что более крупным частицам приходится отталкивать больше молекул воды, чтобы двигаться. Это предположение вытекает практически из любой теории и применимо в нашем случае;
- *температура*. Как экспериментально подтверждено при температурах от 0 до 30 °С, при снижении температуры воды размер исключавшей зоны увеличивается. С увеличением размера зоны растет эффективный объем микросферы. Это приводит к увеличению массы, следовательно, частица не может двигаться так далеко, как раньше, за такой же промежуток времени. Следовательно, температурная зависимость соответствует как старой, так и новой теории.

Помимо соответствия этим трем основным ожиданиям, механизм исключавшей зоны также объясняет

Броуновское движение с точки зрения Эйнштейна

Уравнение Эйнштейна описывает коэффициент диффузии D частицы в жидкости:

$$D = \frac{k_b T}{6\pi\eta a},$$

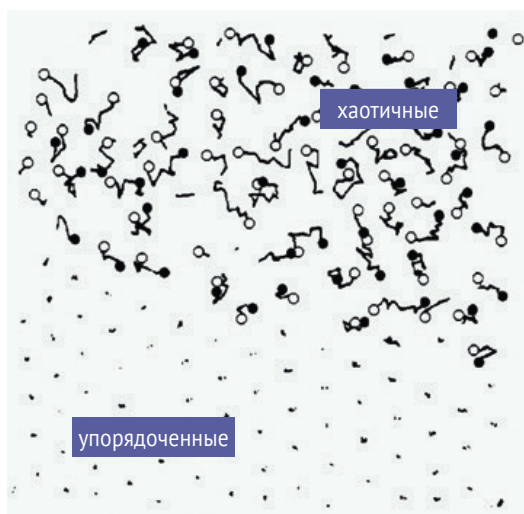
где k_b – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, η – вязкость жидкости и a – радиус частицы.

Из значения D можно вычислить смещение x с течением времени как

$$\overline{x^2} = 2Dt,$$

где $\overline{x^2}$ – среднеквадратичное пройденное расстояние и t – время. Это уравнение позволяет нам предсказать, как далеко должна сместиться частица за заданное количество времени.

Рис. 9.15. Траектории перемещения частиц за определенный период времени как в пределах упорядоченной области коллоидного кристалла (внизу слева), так и за ее пределами (вверху справа). Источник: Дошо (Dosho) и др. [12]



Причина, по которой эти микросферы, образно говоря, замирают, заключается в ограничении притяжения подобного к подобному. Коллоидный кристалл достигает своей стабильности, потому что мощные силы притяжения и отталкивания находятся в строгом равновесии; этот жесткий баланс дает стабильность. Он гарантирует, что микросферы, лежащие внутри массива, становятся относительно невосприимчивыми к флуктуациям заряда, возникающим вне массива, и тем самым подвержены меньшему количеству броуновских флуктуаций. Таким образом, новая формулировка правдоподобно объясняет парадоксальное в остальном поведение, проиллюстрированное на рис. 9.15.

Другим явлением, которое должен объяснить предлагаемый механизм, является наличие броуновского движения в жидкостях, отличных от воды. Исключающие зоны появляются во многих полярных растворителях, и этим зонам так же присуще разделение за-

рядов [13]. Новая формулировка работает и здесь; она предсказывает броуновские движения как в этих жидкостях, так и в воде.

Механизм исключаящей зоны должен объяснить и бесконечность движения. Вы можете отставить в сторону стакан воды с микросферами на день – или на год, – и (при условии что микросферы не осаждаются на дно) хаотичные движения будут продолжаться без изменений. Эти частицы просто продолжают двигаться. Движение бесконечно, потому что бесконечен источник движущей энергии: до тех пор, пока жидкость продолжает поглощать электромагнитную энергию, эта энергия будет продолжать питать броуновское движение.

Почему пыль подвергается броуновскому движению?

Атмосфера же содержит положительный заряд, который может нейтрализовать отрицательный заряд пыли. Этот процесс занимает некоторое время, потому что воздушным зарядам нужно время, чтобы собраться вокруг частицы пыли. Следовательно, медленно движущиеся частицы легко нейтрализуются, а быстро движущиеся – нет. Таким образом, скорость частицы имеет значение. Следовательно, полный заряд частицы будет динамично меняться, что приведет к, казалось бы, непредсказуемому воздушному броуновскому танцу.



Пыль в основном состоит из чешуек кожи и волос. Те и другие отрицательно заряжены, а значит, взаимно отталкиваются. Отталкивание нарастает по мере движения пыли по воздуху: пыль приобретает заряд точно так же, как и волосы получают заряд (и топорщатся) от фена – это трибоэлектрический эффект. Чем быстрее относительное движение воздуха, тем выше отрицательный заряд и, следовательно, отталкивание.



Вы можете задаться вопросом, почему движущиеся частицы пыли, как нам кажется, парят во время танца. Эти частицы тяжелее воздуха и должны неуклонно опускаться к земле, но они плавают в воздухе. Здесь играет роль отрицательный заряд земли – давно известное свойство, о котором редко вспоминают. Отрицательно заряженная земная поверхность отталкивает отрицательно заряженную пыль, поэтому частицы остаются на плаву. Они продолжают свой бесконечный танец, редко оседая и никогда не касаясь друг друга во взаимном отталкивании.

9.9. Следствия

Классическая научная поэма Лукреция «О природе вещей» (ок. 60 г. до н. э.) дает запоминающееся описание броуновского движения – пусть и в частицах пыли:

«Наблюдайте, что происходит, когда солнечные лучи попадают в здание и проливают свет на его тенистые места. Вы увидите множество мельчайших частиц, смешивающихся во множестве сочетаний... Их танец указывает на скрытое от нашего зрения движение материи. Оно происходит от атомов, которые движутся сами по себе [т. е. спонтанно]. Затем те маленькие составные тела, которые сами немногим больше атомов, приходят в движение под действием их невидимых ударов и, в свою очередь, ударяют по чуть более крупным телам. Таким образом, движение поднимается вверх от атомов и постепенно выходит на уровень наших чувств, так что те тела, движение которых мы видим в солнечных лучах, подвижны ударами, которые остаются невидимыми».

Лукреций провидчески описывает современный взгляд на происхождение броуновского движения. Каждый атом, каждая молекула, каждая частица и каждый более крупный объект испытывают случайные перемещения. Маленькие частицы ударяют более крупные, приводя их в движение. Этот механизм был хорошо описан два тысячелетия назад. Однако до Эйнштейна никто не понимал происхождения этих перемещений. Эйнштейн пришел к выводу, что движущей силой является тепло, содержащееся *внутри* системы. Это тепло вырабатывает движение, которое порождает тепло, которое вырабатывает движение, и так далее, – процесс, продолжающийся бесконечно без какой-либо внешней помощи.

Однако во времена Эйнштейна ученые не могли себе представить, что простая водяная суспензия может поглощать энергию *извне* системы и использовать ее. Несмотря на то что это постоянно происходит в растениях, никто не предполагал, что это происходит в неживых системах, таких как стакан с водой. Тем не менее доказательства, представленные выше, показывают, что это может происходить и действительно происходит: поступающая извне энергия постоянно поглощается и используется в полезных целях; одним из подобных «способов использования» является подпитка броуновского движения.

Если это новое объяснение броуновского движения подтвердится, то многие физические явления могут

потребовать переосмысления. Одним из них является «тепловое движение» – обобщающее название броуновского движения. До сих пор считалось, что тепловое движение атомов и молекул происходит за счет *внутренней* энергии. Если же эти движения питает *внешняя* энергия, то возникает совершенно иная парадигма с совершенно иными последствиями.

Одно из важных различий между этими двумя формулировками заключается во влиянии соседей (рис. 9.16). В формулировке Эйнштейна движения частиц зависят только от ударов соседних молекул воды; любые частицы, расположенные дальше этих молекул, не имеют большого значения. В концепции исключяющей зоны справедливо обратное: частицы, лежащие на некотором расстоянии, генерируют заряды, и эти колеблющиеся заряды могут влиять на движение рассматриваемой частицы. Данные эффекты могут распространяться на дальние расстояния. В этом смысле две трактовки принципиально отличаются друг от друга, вдобавок к различию между механической и электрической природой.

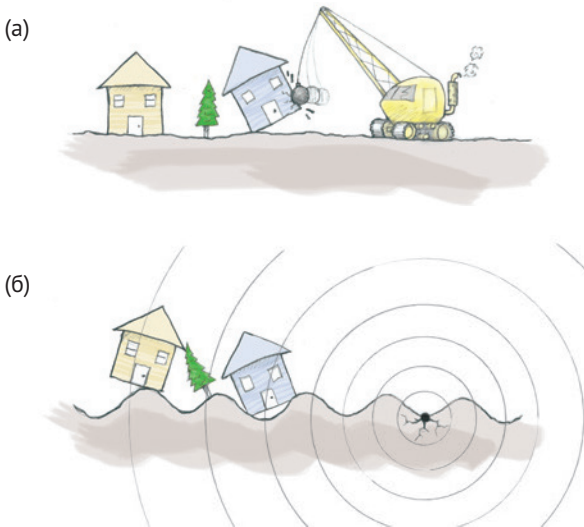


Рис. 9.16. (а) Формулировка Эйнштейна подчеркивает локальное взаимодействие; (б) концепция исключяющей зоны подразумевает воздействие на большие расстояния

Вследствие этих различий явления, которые кажутся аномальными в парадигме Эйнштейна, становятся менее аномальными в парадигме исключяющей зоны. Я уже упоминал о связи близко расположенных частиц и почти полном отсутствии движения частиц внутри коллоидного кристалла. Ни один из феноменов не вписывается в классическую парадигму, но

парадигма исключаяющей зоны вмещает в себя и то, и другое. Усиление движения, вызываемое солями, также не находит внятного объяснения в классической парадигме. Новая парадигма легко объясняет явление изменением размеров: соль уменьшает размер исключаяющей зоны, [14] что уменьшает эффективный размер частиц, позволяя им более активно танцевать. Таким образом, по крайней мере, некоторые явления, которые трудно примирить с классической парадигмой, находят естественные объяснения в рамках парадигмы исключаяющей зоны.

Остается неясным, объясняет ли формулировка исключаяющей зоны все свойства броуновского движения, но я считаю, что у нее есть шанс, потому что она содержит в себе новинку – внешний источник энергии. Эта особенность, с одной стороны, может потребовать переосмысления связи между ростом исключаяющей зоны и традиционной энтропией, а с другой – может раскрыть многие неразгаданные тайны броуновской динамики.

Однако прежде чем двигаться дальше, я считаю необходимым прояснить несколько моментов. Кажется ли вам очевидным понятие теплового движения, когда вы читали эту главу? Возможно, да. Я должен признать, что у меня возникло чувство замешательства, когда я впервые узнал, что внутренняя тепловая энергия служит источником броуновского движения. Я не мог понять, как тепло превращается в движение, хотя понимал, что физики считают тепло и движение практически синонимами. Связь была знакома, но механизм, лежащий в основе связи, оставался неразгаданным.

Мы не задумываясь употребляем термины «тепловая энергия» и «температура», но я пришел к выводу, что они не такие однозначные, как принято считать. Интуитивно понятная расшифровка этих терминов требует свежего подхода, и в следующей главе мы попытаемся ответить на этот вызов.

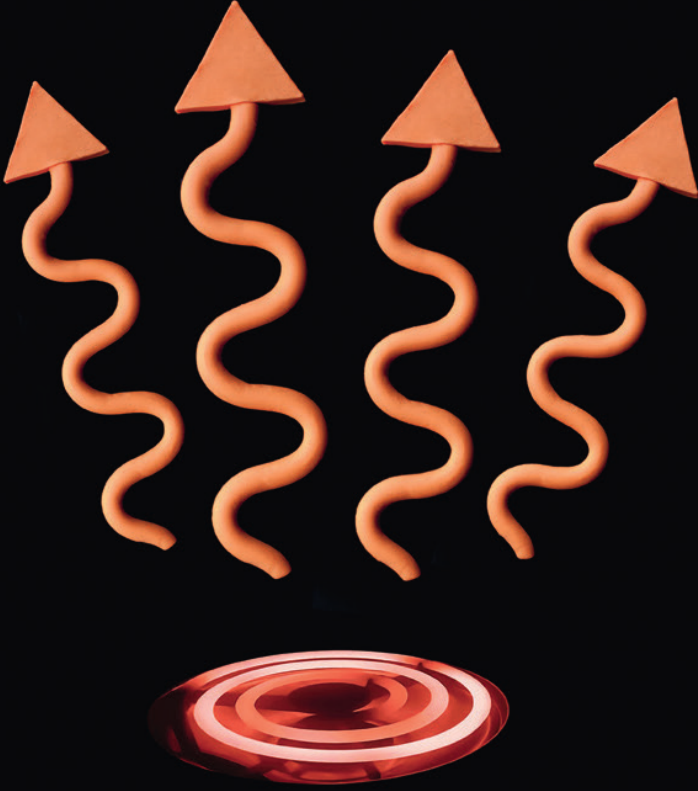
9.10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно традиционным представлениям, броуновское (тепловое) движение возникает благодаря молекулярно-кинетической энергии, которую мы обычно выражаем через температуру. Считается, что эта энергия бесконечно перемещает частицы случайным (броуновским) образом. Хотя эта теория броуновско-

го движения стала общепринятой, она противоречит удивительно большому количеству экспериментальных наблюдений.

Выдвинутая в этой книге альтернативная гипотеза предполагает, что броуновское движение питает падающая лучистая энергия. Поглощенная энергия создает исключаяющие зоны вокруг частиц и тем самым разделяет заряды. Разделенные заряды создают силы, которые приводят в движение частицы.

Соответствие экспериментальным данным вселяет уверенность в этой альтернативной модели. Модель также интуитивно понятна: потребляемая энергия превращается в энергию на выходе. А значит, эта довольно простая модель может начать разрешать многочисленные парадоксы, окружающие броуновский танец. Наконец-то мы сможем понять, почему эти частицы не останавливаются.



Глава 10

Тепловая энергия и температура: новый взгляд на тепловую тьму

Когда я обедал в очаровательном ресторанчике на Кострове недалеко от Сиэтла, мое внимание привлек мимолетный комментарий коллеги, относящийся к температуре. Мой коллега сказал, что если вы энергичными круговыми движениями взболтаете емкость с водой, чтобы образовался вихрь, то вода охладится. Я воскликнул: «Не может быть!» Взбалтывание сопровождается трением. Всем известно, что трение вызывает нагрев, а не охлаждение. Совершенно очевидно, что мой коллега ошибается.

В конце концов мой коллега оказался прав. Заинтересовавшись темой нашего обеденного разговора, я попросил одного из моих студентов повторить эксперимент. Он ответил, что уже много раз проделывал это в лаборатории, и вода действительно охлаждается. То же самое я услышал от коллеги из Новой Зеландии, который пообещал определить, насколько холоднее может стать вода, но не смог охладить ее до температуры ниже 4°C .

Вихри – это природные явления, наблюдаемые в реках и ручьях, а также в ваннах и смывных унитазах. Популярная установка для демонстрации вихря показана на рис. 10.1.

Почему при завихрении вода остывает?

Вы можете справедливо заметить, что для лучшего понимания сути явления нужно строго разделить определения тепловой энергии и температуры. Строгость определений обычно идет на пользу. Однако, как показано в предыдущей главе, даже надлежащая строгость, применяемая к сомнительному основанию, не обязательно дает хороший результат. Долгое время предполагалось, что броуновское движение вызвано тепловой энергией, но строгое обращение с терминами со стороны известных физиков так и не привело



Рис. 10.1. Популярная установка для демонстрации водного вихря

к полному пониманию механизма. Они упустили некоторые важные моменты.

Прежде всего это относится к тепловой энергии и температуре. На этих определениях (наряду с энтропией) основаны практически все рассуждения, связанные с энергией. Тем не менее, как вы увидите ниже, эти термины на удивление расплывчаты. Использование подобных терминов в кухонной беседе вполне приемлемо; однако на расплывчатых определениях опасно строить научную модель. Это может привести вас к мысли, что что-то должно стать теплее, когда на самом деле оно остывает.

Поэтому мы постараемся избежать использования нечетких определений и обратимся к более строгим терминам. Один из таких терминов, «лучистая энергия», относится и к температуре, и к тепловой энергии, но его преимущество заключается в уникальном определении. С другой стороны, не все знакомы с понятием лучистой энергии; я надеюсь, что вы найдете в себе силы изучить короткое «учебное пособие», с которого начинается эта глава. Малые тяготы иногда приносят большое благо.

10.1. Происхождение лучистой ЭНЕРГИИ

Лучистая энергия – это электромагнитная энергия. Она охватывает широкий диапазон длин волн, причем каждый сегмент спектра имеет разные характеристики (рис. 10.2): световые волны можно увидеть; микроволны могут приготовить вашу еду; радиоволны помогают нам общаться; рентгеновские лучи создают изображения; инфракрасные волны согревают нас. Эти свойства настолько отличаются друг от друга, что мы можем легко забыть о принадлежности всех волн к одному электромагнитному спектру.

Чтобы понять природу лучистой энергии, необходимо понять, что электромагнитные волны *всегда возникают только благодаря движению зарядов*. Эта концепция схематически представлена на рис. 10.3. Представьте статический заряд, расположенный где-то в пространстве (рис. 10.3, слева). Если вы находитесь достаточно близко, вы (или ваш измерительный прибор) можете почувствовать этот заряд. Если заряд перемещается, то ваше восприятие заряда будет меняться (рис. 10.3, середина). Обнаружение этого изменения занимает некоторое время, в зависимости от

того, как быстро информация распространяется через промежуточную среду. Аналогичным образом колебательные движения заряда вперед-назад создадут колебания напряженности поля (справа), которые вы снова заметите через короткий промежуток времени. Теперь вы ощущаете распространяющуюся электромагнитную волну.



Рис. 10.2. Различные источники лучистой энергии. Эта энергия включает в себя широкий спектр длин волн

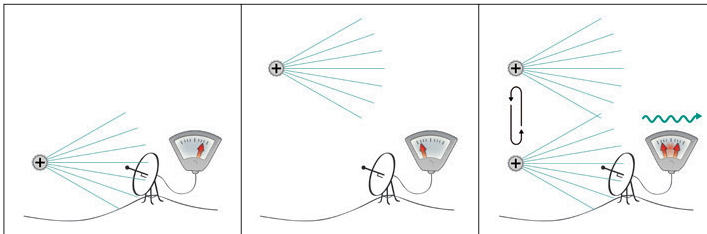


Рис. 10.3. Генерация электромагнитных волн (упрощенно). Колебательное движение заряда создает переменное электрическое поле, которое может воспринимать датчик

Источником электромагнитной волны может служить любой колеблющийся заряд. Это может быть электрон, протон, ядро атома или даже более крупный объект, обладающий электрическим зарядом. Все это источники электромагнитных волн. Кроме того, амплитуда колебаний лежит в широком диапазоне – от крошечной, как внутри атома, до колоссальной, как в большой передающей антенне. Однако процесс генерации волн всегда один и тот же: колебание электрического заряда.

10.2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЛН С РАЗЛИЧНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Теперь рассмотрим, что происходит, когда электромагнитная волна проникает в какой-либо материал. Все материалы содержат внутренние заряды. Волны взаимодействуют с этими зарядами; следовательно, входящая волна будет вызывать колебательное движение внутренних зарядов, с которыми она сталкивается. Эти заряды начнут колебаться в ответ. Если поступающая волна является периодической, то внутренние заряды вынуждены колебаться с той же периодичностью. Фактически колебание одного заряда вызывает колебание другого заряда. Каждый приемник становится следующим источником. Процесс продолжается.

Однако продолжение процесса зависит от среды, через которую проходит волна. Если среда неоднородная, то основные характеристики волны останутся неизменными, хотя она может затухать. Если среде не хватает однородности, то характер колебаний будет меняться по мере прохождения через толщину материала. Например, волна может распространяться быстрее на одном участке, чем на другом; более быстрое распространение означает перемещение на большее расстояние между пиками колебаний за одно и то же время, то есть увеличение длины волны. Таким образом, длина волны может меняться, когда она проходит через материал.

Наконец, эти волны выходят наружу. Из-за упомянутых выше процессов выходящие волны могут отличаться от падающих волн. Падающая волна с длиной волны 10 мкм может распространяться через среду, поглощаться и затем повторно излучаться, скажем, на 5 или 20 мкм, в зависимости от характера среды. Волны, проходящие через сложные среды, могут переизлучаться на более длинных или коротких волнах – так называемые стоксовы и антистоксовы сдвиги (рис. 10.4).

Примером такого сдвига является флуоресценция. Падающий свет некоторой длины волны временно перемещает электроны материала на более высокие энергетические уровни; когда эти электроны возвращаются на исходный уровень, они излучают на большей длине волны. Таким образом, падающий на материал синий свет может вызвать испускание красного света. В таких случаях принято говорить, что этот материал флуоресцирует красным.

Сдвиги спектра также происходят в инфракрасном диапазоне длин волн. Ближайший пример – ваш дом.

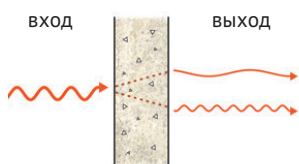


Рис. 10.4. Электромагнитное излучение, проходящее через неоднородную среду. Характер излучения может измениться. Общая выходная энергия не должна равняться входной энергии, если среда накапливает энергию и использует ее для производства работы

Солнечный свет падает на внешнюю сторону стены, которая поглощает падающую энергию. Затем энергия передается на внутреннюю сторону стены, которая, в свою очередь, излучает в комнату – так что вы чувствуете тепло. Длины и амплитуды инфракрасных волн, выходящих из внутренней части стены, могут полностью отличаться от таковых для входящего солнечного света.

Эти примеры иллюстрируют фундаментальные процессы: излучение, поступающее в систему, вызывает колебание заряда, которое генерирует электромагнитные волны, которые вызывают колебание следующего заряда, и так далее. Наконец, волны выходят из системы, но только после того, как они претерпели множественные изменения длины и амплитуды и, возможно, выполнили некоторую работу (главы 7 и 9). Следовательно, излучение материала зависит не только от свойств волны, поступающей в систему, но и от характера среды.

10.3. ИЗЛУЧЕНИЕ ВОДЫ

Как характер среды может помочь нам понять, что происходит в воде?

Характер излучения среды обычно выражается сокращенным термином: «излучательная способность». Объекты с более высокой излучательной способностью излучают больше энергии, чем объекты с низкой излучательной способностью; они кажутся более насыщенными энергией. Если они излучают в инфракрасном диапазоне, то объекты с более высокой излучательной способностью будут выглядеть в ИК-камере ярче, чем соседние объекты с меньшей излучательной способностью.

Например, рассмотрим рис. 10.5. На обычном изображении офисной стены в видимом диапазоне (сверху) заметны только слабые неровности. На изображении в ИК-диапазоне (внизу) мы видим намного больше подробностей внутреннего устройства стены. Некоторые детали изображения видны только благодаря различиям в излучательной способности материалов.

Более показательное изображение облаков в инфракрасном диапазоне представлено на рис. 10.6. Эти облака излучают значительное количество лучистой энергии. Традиционный подход напрямую связывает интенсивность инфракрасного излучения с температурой (см. температурную шкалу с правой стороны изображения). Таким образом, эксперт, знакомый с современными представлениями о таких явлениях, может

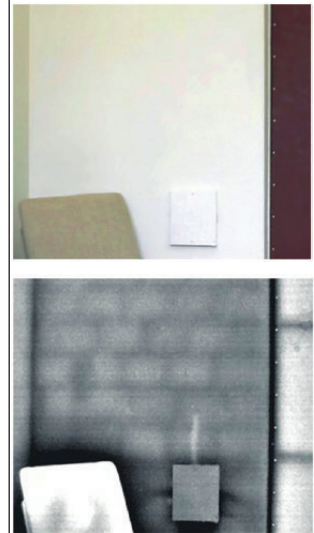


Рис. 10.5. Внутренняя стена в комнате, расположенной по соседству с коридором. Снимки сделаны в видимом свете (вверху) и ИК-лучах (внизу) [1]. ИК-изображение раскрывает устройство внутренней структуры стены

Рис. 10.6. ИК-изображение, полученное в диапазоне длин волн 9–12 мкм. Температура почвы примерно 0 °С. Внизу виднеются дымовая труба и верхушки деревьев. В соответствии с температурной шкалой, предоставленной производителем камеры, отдельные участки облачности демонстрируют температуру выше 15 °С, несмотря на температуру окружающего воздуха –20 °С. Таким образом, температурная шкала, как это ни парадоксально, говорит о том, что облака на 35 °С теплее окружающего воздуха

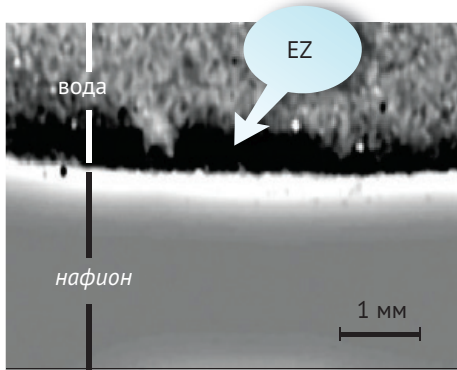


Толкование снимка с точки зрения лучистой энергии, напротив, говорит о том, что облако имеет более высокую излучающую способность, чем окружающая среда; иными словами, движущиеся заряды внутри облака в изобилии генерируют инфракрасное излучение. Облако может выглядеть «теплее», но на самом деле просто сильнее колеблются заряды внутри облака.

Эта иллюстрация показывает, как слепая зависимость от знакомых понятий может иногда вводить в заблуждение. Разумеется, облако в холодном небе не является печкой в холодильнике. Неправильная интерпретация опирается на знакомые понятия, такие как тепловая энергия и температура. Значит, мы должны поставить крест на использовании этих распространенных терминов.

Рассмотрим третье ИК-изображение, которое вы уже встречали в этой книге (для удобства приведено повторно). На рис. 3.15 показан ИК-снимок воды вблизи поверхности нафтона. Поскольку к моменту получения этого снимка соответствующие области исключавшей зоны и объемной воды соприкасались в течение длительного времени, любые физические различия между этими зонами должны были уравниваться; несмотря на это, исключавшая зона выглядит темнее. Она излучает меньше инфракрасной энергии. Можно

сказать, что исключаяющая зона имеет более низкую «температуру», чем объемная вода рядом с ней, но этот разговорный термин снова вводит нас в заблуждение.



Почему исключаяющая зона излучает меньше лучистой энергии, чем объемная вода? Вспомните о подвижности зарядов в соответствующих зонах. В исключаяющей зоне заряды зафиксированы в решетке; они могут перепрыгивать из одной точки решетки в другую, но по большей части эти заряды остаются на месте. В прилегающей объемной воде заряды относительно свободны: они могут двигаться, теряя энергию. Поскольку движущиеся заряды вырабатывают лучистую энергию, область объемной воды должна выглядеть ярче. Поэтому объемная вода выглядит «теплее», чем исключаяющая зона, но, строго говоря, это просто более активное движение зарядов.

Таким образом, яркие и темные участки на инфракрасных изображениях не обязательно означают более высокую или более низкую *температуру*; скорее, они отражают более высокую или более низкую интенсивность движения заряда. Упоминание более ярких объектов как имеющих «более высокую температуру» уместно в случайном разговоре, но в научном дискурсе лучше избегать определений «температура» и «тепловая энергия» как таковых, придерживаясь более строгих и обоснованных терминов, таких как лучистая энергия.

Эта мысль составляет центральное послание данной главы: *излучающая способность отражает интенсивность движения заряда*. Это верно для всех длин волн электромагнитного спектра. Если мы будем строго придерживаться этого фундаментального определения, не поддаваясь искушению упомянуть температуру или тепловую энергию, то вряд ли собьемся с пути в поисках понимания.

Рис. 3.15. Инфракрасное излучение на границе сред нафтион–вода. Образец уравнивали при комнатной температуре. Черная полоса, проходящая горизонтально по центру изображения, совпадает с ожидаемым расположением исключаяющей зоны

10.4. ЧТО ЖЕ ТАКОЕ ТЕМПЕРАТУРА И ТЕПЛОВАЯ ЭНЕРГИЯ?

Полагаю, что нужно вкратце рассказать о происхождении этих знакомых терминов. Чтобы понять, почему они сбивают с толку, нужно знать, что они означают.

Что касается тепловой энергии, у этого термина нет однозначно преобладающего значения. Нагревание часто (но не всегда) описывается как передача тепловой энергии от одного физического тела другому, исключая любую работу, выполняемую над этим телом. Иными словами, вы можете передавать лучистую энергию к телу и называть это нагреванием; но вы не можете поднять валун на вершину горы и назвать это нагреванием, потому что работа не в счет. В принципе, чем больше лучистой энергии вы доставляете, тем больше нагреваете физический объект.

Теперь рассмотрим нагревание по отношению к воде. Как и другие вещества, вода поглощает, трансформирует, а затем излучает падающую лучистую энергию. Наиболее значимые длины волн лежат в ИК-области спектра, в частности от 3 до 15 мкм. У этого факта есть простое объяснение: заряды молекул воды находятся на определенных характерных расстояниях друг от друга, и поэтому всякий раз, когда заряды колеблются, они предпочитают делать это на длинах волн, связанных с этими характерными расстояниями, а именно от 3 до 15 мкм. Вода будет поглощать и испускать излучение преимущественно с этими длинами волн.

Теперь вы можете понять, почему понятия «инфракрасное излучение» и «тепловая энергия» воспринимаются как равнозначные, когда идет речь о воде. Вода поглощает инфракрасное излучение; поэтому она «нагревается». Вода также испускает инфракрасное излучение, и поэтому она «кажется теплой».

Однако необходимо помнить, что «инфракрасное излучение» и «тепловая энергия» не являются взаимозаменяемыми понятиями. Вода поглощает не только ИК-волны, но и многие другие волны электромагнитного спектра. Даже видимый свет может нагреть воду, если он будет достаточно интенсивным. И ваша микроволновая печь может достаточно эффективно нагревать воду. Таким образом, *нагревание не является однозначным эквивалентом поглощения ИК-излучения*. Мы также не можем утверждать, что нагретая вода излучает только в инфракрасном диапазоне длин волн.

Действительно, вода может излучать энергию даже на видимых длинах волн (глава 7).

Из-за столь неоднозначной связи между лучистой и тепловой энергиями мы должны с большой осторожностью использовать термин «тепловая энергия», пытаясь улучшить понимание природных процессов.

Теперь обратимся к температуре. Когда вода «нагревается» от инфракрасного излучения или другой поглощенной энергии, мы говорим, что температура воды повышается. Опять же, нам следует ясно понимать, что именно мы подразумеваем под температурой.

К сожалению, не существует единственного определения температуры. Определение зависит от контекста. Некоторые определения выглядят следующим образом: степень или интенсивность наличествующего тепла; способность вещества передавать тепловую энергию другому веществу; мера средней кинетической энергии атомов или молекул вещества; отражение движения частицы, возникающего в результате перемещения, вибрации или смены энергетических уровней электрона; для газа это распределение вероятностей энергии движения частиц газа.

Даже хорошо известные характерные значения температуры не помогают прояснить ситуацию. Говорят, что вода замерзает при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и кипит при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Можно подумать, что эти критерии будут полезными ориентирами для определения реального значения температуры. Но это не так, поскольку чистая вода при стандартном давлении может замерзнуть при температурах значительно ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (особенно в замкнутых объемах) и может кипеть при температурах выше, а иногда и ниже $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Мы могли бы не обращать внимания на эти аномалии, но, возможно, они указывают на неполноценность наших знаний. Учитывая разнообразие определений, термин «температура» выглядит столь же неоднозначно, как и «тепловая энергия».

В дополнение к проблемам неоднозначности определений у нас есть более фундаментальная проблема для неравновесных систем – таких как вода. Специалисты по термодинамике предупреждают, что для подобных систем эмпирические данные могут не совпадать с тем, какое из двух тел является более нагретым. Проще говоря, это означает, что любая система, находящаяся вне равновесия, не имеет четко определенной температуры. Для воды это серьезная проблема. Пока мы не решим эту проблему, *мы просто не узнаем*

истинное значение терминов «температура» и «тепловая энергия».

Теперь вы можете понять, почему я старательно избегаю использования этих общепринятых терминов. Чем можно заменить восклицание «Ой, плита горячая!» в повседневной жизни? В научных дискуссиях, однако, размытые определения неизбежно приводят к размытым и даже ошибочным заключениям. Вот вам два примера: броуновское движение и завихрение воды. В обоих случаях мы введены в заблуждение использованием температуры в качестве основной переменной.

С другой стороны, у нас будет больше шансов добиться правильного понимания, если мы будем придерживаться физически обоснованных терминов, а один из таких терминов – «лучистая энергия». Давайте посмотрим, поможет ли лучистая энергия дать разумные ответы на давние вопросы.

10.5. ОХЛАЖДЕНИЕ, НАГРЕВАНИЕ И ЛУЧИСТАЯ ЭНЕРГИЯ



Рис. 10.7. Ваша рука ощущает количество лучистой энергии, исходящей из воды

Когда ваша ладонь охватывает стакан с водой, она поглощает лучистую энергию, излучаемую водой (через стенки стакана). Если вода испускает интенсивное ИК-излучение, вы воспринимаете это как тепло; если ИК-излучение слабое, вы ощущаете прохладу. Ваша рука ощущает излучение, передает сигнал в мозг, и вуаля! – вы знаете, горячая ли вода (рис. 10.7).

Термометры измеряют тепло схожим образом. Они работают в одном из двух режимов измерения: бесконтактном (излучательном) или контактном. Принято считать, что это разные режимы, но я считаю, что они скорее похожи, чем отличаются. Позвольте мне объяснить.

Термометры, работающие в бесконтактном режиме, измеряют количество получаемой инфракрасной энергии. Они функционируют так же, как ваша рука.

Контактные термометры, напротив, основаны на принципе теплопроводности. Стеклообразная колбочка «переносит» тепло из внешней среды при контакте с любым предметом, находящимся вне ее.

Если в сосуд налита вода, то «тепловые колебания» воды передаются непосредственно стеклу, заставляя вибрировать ближайшие атомы, которые, в свою очередь, заставляют вибрировать более удаленные атомы, и так далее. В конечном итоге эти колебания достигают ртути в термометре, последующее расширение которой позволяет вам читать температуру по шкале.

По сути, этот контактный режим мало отличается от бесконтактного. В обоих случаях лучистая энергия распространяется через среду, а количество энергии измеряется и приводится к значению температуры. По сути, ваша рука делает то же самое: чем крепче вы обхватываете стакан, тем сильнее ощущение (то есть вода будет казаться «более горячей»).

Все эти методы измерений фиксируют лучистую инфракрасную энергию, и вся эта энергия возникает из-за колебаний заряда. Я надеюсь, что теперь вам хорошо видна связь между лучистой энергией и более неопределенными понятиями тепловой энергии и температуры.

Итак, мы продолжаем наши рассуждения, опираясь на концепцию лучистой энергии. С лучистой энергией связаны два полезных факта, которые помогают понять свойства воды:

- протоны, выделяющиеся в объемную воду во время формирования исключаяющей зоны, представляют собой движущиеся заряды, которые генерируют достаточно интенсивное излучение. Эта лучистая энергия создает ощущение тепла;
- EZ-вода вырабатывает относительно небольшое инфракрасное излучение из-за ограниченной подвижности зарядов. Низкая интенсивность инфракрасного излучения создает видимость низкой температуры.

Вооружившись этими фактами, мы попробуем решить некоторые проблемы, сбивающие с толку ученых и раздражающие всех остальных. В этой книге мы рассмотрим две такие проблемы: смешивание и завихрение.

Переносит ли лучистая энергия информацию?

Вода излучает лучистую энергию. Большая часть этой энергии поступает из объемной воды, но исключаяющая зона тоже излучает некоторую энергию. Длины волн, излучаемых исключаяющей зоной, зависят от ее структуры.

Хотя все исключаяющие зоны построены по схожему принципу (глава 4), возможны варианты. Исключаяющие зоны вырастают на зародышевых поверхностях с уникальным распределением зарядов. Эти уникальные распределения обязательно наложат отпечаток уникальности на исключаяющие зоны. Следовательно, энергия, излучаемая исключаяющей зоной, может содержать информацию, специфичную для поверхности.

Если это так, то вода исключаяющей зоны может излучать информацию так же, как ее излучают антенны телевизионных станций. Излучаемая энергия может содержать в себе нечто большее, чем просто пульсации электромагнитного поля.

Что происходит, когда вода поглощает излучаемую энергию? Если излучаемая энергия содержит информацию, то мы можем предположить, что эта информация будет искажена или утеряна. Однако часть информации может сохраниться, если некоторые режимы пульсации энергии вызовут появление новых вариантов структуры исключаяющей зоны. Любое подобное сохранение информации будет представлять собой не что иное, как передаваемую с помощью электромагнитных волн информацию о структуре – своего рода электронная почта на водной основе.

Хотя подобный обмен информацией в лучшем случае может показаться надуманным, ошеломляющие открытия нобелевского лауреата Люка Монтанье (Luc Montagnier) подтверждают наличие такого способа передачи информации (см. рисунок справа). Монтанье утверждает, что успешно передал воде сигналы о структуре ДНК. Сначала он изготовил



водную суспензию образца ДНК. Затем поместил суспензию в герметичную пробирку, расположив ее рядом со второй, аналогично запечатанной пробиркой с водой. Пробирки стояли рядом друг с другом и в течение длительного периода времени подвергались воздействию обычного источника электромагнитной энергии.

Затем к «обученной» воде во второй пробирке добавили реагенты, необходимые для синтеза ДНК. Эта процедура создала новую ДНК. Последовательность этой ДНК не была случайной: она была такой же, как образец ДНК в первой пробирке. Хотя две пробирки были герметично запечатаны и никогда не вступали в физический контакт, информация, очевидно, передавалась из одной пробирки в другую [3, 4].

Первоначальная реакция на доклад Монтанье была скептической. Тем не менее некоторые ученые, вдохновленные сообщениями Гурвича (Gurwitsch) [5] о явлении электромагнитного переноса почти столетней давности и более поздней работой Бенвениста [6], ухватились за эту идею. На момент написания данной книги две лаборатории утверждают, что смогли подтвердить открытие Монтанье. Будет интересно посмотреть, что получится из этих исследований.

10.6. Дело о ПОДОЗРИТЕЛЬНОМ ТЕПЛЕ И ПРОПАВШЕМ ОБЪЕМЕ

Непонятная проблема возникает, когда вещества смешиваются с водой. Вы можете ожидать, что ничего особенно интересного не произойдет, если не считать растворения. Однако обычное смешивание веществ может привести к серьезным последствиям (рис. 10.8а). Добавление нескольких капель воды в концентрированную серную кислоту может вызвать кипение, разбрызгивание, а иногда даже взрыв.

Это не единственный нелогичный результат смешивания. Когда жидкости смешиваются с водой, конечный объем не всегда равен сумме двух начальных объемов (рис. 10.8б): объем может быть больше, но чаще он становится меньше. В крайних случаях уменьшение объема может составлять до 20 %. Смешивание твердых веществ с водой может привести к аналогичным результатам: попадание небольшого количества гранул гидроксида натрия в колбу с водой приведет к уменьшению объема жидкости; чтобы вернуться к исходному объему, требуется добавить еще много таких гранул.

Вы можете наблюдать парадоксальное поведение объема, наполнив стакан водой до краев, а затем добавив туда поваренную соль. Вода не будет переливаться через край, даже если излишек соли начнет оседать на дне стакана. Может показаться, что объем куда-то исчезает.

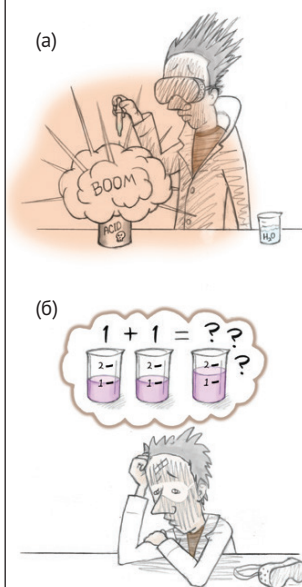


Рис. 10.8. Смешивание веществ с водой может привести к неожиданным последствиям

Химики хорошо знают эти явления. Согласно преобладающей теории, выброс тепловой энергии, вызванный добавлением небольшого количества воды к серной кислоте, возникает в результате сложения энергий тепла, выделяющегося при каждом из подпроцессов, лежащих в основе сольватации; их сумма дает «тепловую энергию гидратации». Это тепло нагревает воду. Феномен изменения объема имеет другое объяснение, основанное на том, что смешивание разнородных молекул может привести к образованию как более, так и менее оптимальных межмолекулярных связей.

Хотя эти объяснения кажутся достаточно простыми, нет легкого способа удостовериться в их правильности. В первом явлении сложение тепловых энергий разных процессов обычно предполагается исходя из результата эксперимента, а не вытекает из наблюдений за отдельными процессами. Во втором явлении предположение о том, что молекулы подходят друг другу, как кусочки мозаики, не является, по меньшей мере, точной наукой. Следовательно, достоверность этих объяснений остается неподтвержденной.

Когда я начал изучать эти два явления, то был поражен неожиданной корреляцией: *выделение тепла и изменение объема, вероятно, связаны между собой*. Похоже, что всякий раз, когда выделялось тепло, происходило уменьшение объема; и наоборот, в тех случаях, когда поглощалось тепло, происходило расширение. Я задавался вопросом, не имеют ли эти термические и объемные явления общее происхождение.

С этой точки зрения никогда не рассматривался уже известный нам фактор – исключаящая зона. Смешивание растворенного вещества с водой, по-видимому, так или иначе изменяет величину исключаяющей зоны: например, если вещество было первоначально обезвожено, то добавление воды должно способствовать росту исключаяющей зоны, поскольку это является основой механизма растворения (глава 8).

Предположим, что из-за смешивания некоторого вещества с водой произошло увеличение исключаяющей зоны. Как это может повлиять на «температуру» и объем?

- При построении исключаяющей зоны высвобождаются протоны. Эти заряды расходятся по окрестностям, генерируя лучистую энергию; следовательно, смесь должна «нагреться».
- Между тем смесь должна сжаться, поскольку плотность исключаяющей зоны превышает плот-

ность объемной воды (см. главы 3 и 4). Следовательно, превращение объемной воды в исключаящую зону приведет к уменьшению объема.

Таким образом, рост исключаящей зоны может объяснить нагревание и усадку раствора, по крайней мере теоретически. Мы провели эксперименты, чтобы проверить, действительно ли в упомянутых случаях происходит рост исключаящей зоны.

10.6.1. Решение загадки объема и температуры

Прежде всего мы искали подтверждения нашим предположениям. Повышение температуры и уменьшение объема раствора казались нам тесно связанными, но мы хотели быть в этом уверены. Поэтому рассмотрели семь тепловыделяющих растворов. Во всех этих случаях мы подтвердили связь уменьшения объема с увеличением температуры. (Один случай вызвал технические затруднения, но другие эксперименты подтвердили связь.) Как правило, уменьшение объема происходило в течение десятков секунд, как и максимальное выделение тепла. Как мы и ожидали, два явления хорошо коррелировали друг с другом.

Затем мы проверили, возникают ли при этих растворениях исключаящие зоны. Нашим стандартным тестом на присутствие EZ-воды является наличие сигнатурного пика поглощения на 270 нм. Во всех случаях растворы демонстрировали этот пик или что-то близкое к нему. Иногда пик может быть смещен на 10–25 нм в том или ином направлении; иногда вместо одного пика могут появляться два подпика; и некоторые пики могут быть слабее или сильнее, чем другие. Но во всех случаях мы обнаружили что-то близкое к ожидаемому пику. Типичный пример показан на рис. 10.9.

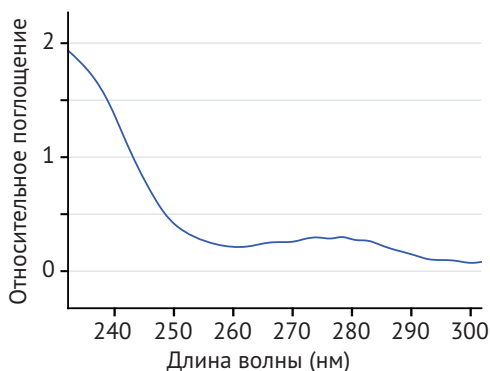


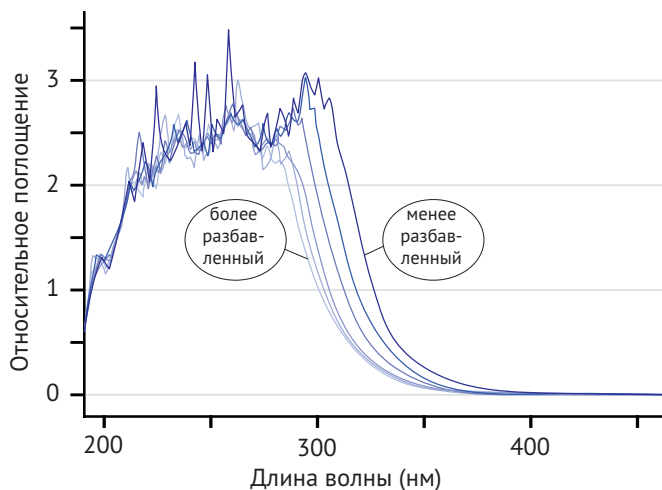
Рис. 10.9. Спектрометрическая запись поглощения ультрафиолета смесью 50:50 HCl и воды. Пик соответствует 278 нм

Эти результаты подтвердили не только связь между нагреванием и усадкой, но и появление исключаяющей зоны всякий раз, когда смешивание приводило к нагреванию и усадке. Судя по всему, мы были на правильном пути – по крайней мере для тех смесей, для которых характерно и нагревание, и усадка.

Противоположные эффекты процесса растворения – и менее распространенный результат – охлаждение и расширение. Чтобы исследовать этот вариант, мы сосредоточились на хорошо известном примере: смешивание персульфата аммония с водой. Персульфат аммония выпускается в виде порошкообразных кристаллов. Когда порошок смешивается с водой примерно в равных частях, объем раствора становится больше, чем сумма объемов двух веществ. Мы подтвердили ожидаемое расширение, хотя технические трудности помешали количественно оценить эффект. С другой стороны, температуру было легко отслеживать с помощью термометра; она упала на 8 °С. Следовательно, растворение происходило, как и ожидалось: смесь охладилась и расширилась.

Критический вопрос заключался в том, уменьшает ли растворение долю EZ-воды. Рисунок 10.10 показывает, что это так: изначально был обнаружен широкий пик внушительной величины с центром приблизительно в 270 нм. Этот пик постепенно сужался по мере растворения новых порций сухого вещества.

Рис. 10.10. Персульфат аммония, растворенный в воде. С увеличением количества растворенного вещества (справа налево) площадь под пиком поглощения уменьшается



Чтобы понять причину наблюдаемого явления, полезно знать, как производятся порошкообразные

кристаллические материалы, такие как персульфат аммония. Хотя существуют различные методы, кристаллы обычно образуются после воздействия интенсивной лучистой энергии (тепла). Лучистая энергия строит исключаящую зону. Поэтому мы можем предположить, что мощный источник ИК-излучения, применяемый для производства этих материалов, создает объемные исключаящие зоны и связанные с ними протоны вокруг каждой молекулы вещества. Выраженные силы притяжения и отталкивания упорядочивают молекулы, которые затем образуют кристаллы по мере высыхания раствора (см. врезку в главе 8). Визуально сухой кристаллический порошок не содержит жидкой воды, но в изобилии содержит EZ-структуры, что объясняет наличие необычайно выраженного пика на 270 нм (рис. 10.10).

Попадание такого вещества в воду уменьшает его кристаллическую упорядоченность. Вода предоставляет большой объем, в котором могут рассеиваться разнородные заряды. Рассеяние протонов уменьшает взаимодействия между ними, и с уменьшением интенсивности движения зарядов происходит уменьшение инфракрасного излучения. Следовательно, раствор кажется холодным. Между тем исключаящие зоны уменьшаются по мере поступления воды, поскольку их первоначальный размер зависел от мощного источника лучистой энергии, которой больше нет. Уменьшение исключаящих зон объясняет сужение пика поглощения на 270 нм (рис. 10.10).

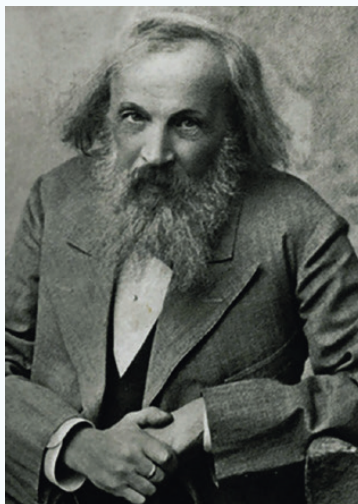
Таким образом, мы объяснили поведение тепловых и объемных характеристик растворов: температура падает из-за уменьшения мощности излучения, а объем увеличивается, потому что плотная вода исключаящей зоны превращается в менее плотную объемную воду.

Парадигма исключаящей зоны, по-видимому, достаточна не только для объяснения явлений нагрева/усадки, но также для объяснения явлений охлаждения/расширения. Для количественной оценки и систематизации этих наблюдений необходимы более комплексные исследования. Возможно, тогда станет ясно, почему попадание безобидной воды в ванну с серной кислотой может привести к взрыву.

Водка и вязкость

Дмитрий Менделеев, русский ученый, который подарил миру знаменитую периодическую таблицу элементов, также изучал смешивание этанола и воды. Как и большинство смесей, эта смесь нагревается и уменьшается в объеме. Менделеев отметил еще один признак: увеличение вязкости в три раза. Причина остается невыясненной, но высокая вязкость исключаящей зоны (см. рис. 3.17) может объяснить результат. Этанол образует исключаящие зоны, очень похожие на аналогичные зоны воды [7], поэтому смесь этанола и воды может давать смешанные исключаящие зоны, демонстрирующие существенно повышенную вязкость.

И хотя это предположение нуждается в подтверждении, не вызывает сомнений другой практический результат: поскольку самую высокую вязкость имеет смесь этанола и воды в соотношении 40:60, Менделеев считал, что такое соотношение идеально подходит для изготовления водки. Это соотношение используется по сей день. Высокая вязкость придает напитку особое ощущение «тела», достаточное, чтобы объяснить, почему русские потребляют его в таком количестве.



Дмитрий Менделеев
1834–1907

10.6.2. Почему завихрение вызывает понижение температуры

Далее мы рассмотрим второе парадоксальное явление: завихрение. Почему завихренная вода кажется холоднее, чем незавихренная?

Завихренная вода привлекла внимание ученых после работы легендарного австрийского натуралиста Виктора Шаубергера (Viktor Schauberger). Шаубергер провел большую часть своей жизни, изучая воду. Длительные наблюдения убедили его, что вихри придают воде особую «жизненную силу». Шаубергер считал воду, взятую из быстрых, наполненных завихрениями потоков, более «живой», чем застойную воду, которую он считал мертвой. Он также считал, что завихренная вода холоднее.

Но сам Шаубергер сто лет назад пошел по стопам другого легендарного австрийца, Рудольфа Штайнера (Rudolph Steiner), в обширный перечень деятельности которого входило сельское хозяйство. Штайнер изобрел так называемую технику биодинамического

Цемент

Действуя по стандартному рецепту, вы добавляете воду в порошок цемента, энергично перемешиваете, выливаете в опалубку и оставляете смесь в покое на день или два. Бетон в конечном счете затвердевает. Вы можете заметить, что в процессе затвердевания он излучает тепло. Почему это происходит?



Добавление воды в цемент приводит к образованию пластичной смеси, очень похожей на влажный песок. Подобная консистенция возникает уже известным нам образом: вокруг смачиваемых частиц образуются исключаящие зоны; высвобождаемые протоны затем опосредуют притяжение типа

«подобное стремится к подобному». Так возникает начальное сцепление частиц. Частицы сначала сцепляются слабо, образуя вещество, похожее на замазку, а затем все прочнее, поскольку по мере роста количества зарядов растут и силы притяжения.

Нагревание смеси – ожидаемый побочный эффект. Рост исключаящих зон приводит к постепенному высвобождению протонов. По мере того как эти концентрированные протоны начинают двигаться, они генерируют избыточную лучистую энергию, которая ощущается как тепло.

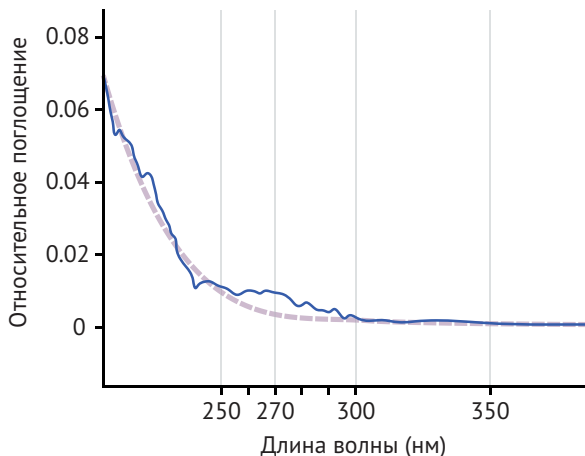
Между тем эта лучистая энергия помогает довести процесс до конца. Эта энергия способствует дальнейшему росту исключаящих зон, увеличению количества высвобождаемых протонов и, следовательно, увеличению сил притяжения. Вот что делает бетон таким прочным. Этот упрощенный принцип применим не только к образованию бетона, но и к более широкому кругу явлений.

земледелия, центральной особенностью которой является перемешивание воды. По сей день некоторые фермеры и садоводы нахваливают эту завихренную воду за ошеломляющую урожайность без удобрений.

Завихренная вода и сегодня остается удивительно популярной среди некоторых групп энтузиастов. Тем не менее эмпирические наблюдения, демонстрирующие разнообразные полезные свойства завихренной воды, подкреплены лишь скудными фундаментальными научными обоснованиями.

Я осмелюсь предположить, что, по крайней мере, некоторые из свойств завихренной воды связаны с образованием исключаящих зон. Предварительные эксперименты подтвердили пик поглощения при 270 нм (рис. 10.11), подразумевая, что EZ-вода действительно присутствует. Мы проводим дальнейшие эксперименты.

Рис. 10.11. Результаты измерения спектра поглощения завихренной воды. Предварительные наблюдения показывают рост исключяющей зоны



Если в завихренной воде действительно присутствует EZ-вода, как показывают предварительные исследования, то «жизненная сила» воды Шаубергера может на самом деле быть энергией, поскольку в исключяющих зонах присутствует потенциальная энергия. Что касается охлаждения: если завихрение преобразует некоторую часть объемной воды в EZ-воду, то вода в целом должна казаться более прохладной, потому что EZ-вода излучает меньше энергии, чем объемная вода. Уменьшение энергии излучения воспринимается нами как охлаждение.

(Читатель может заметить возможную нестыковку: недавно сформированная исключяющая зона генерирует протоны, которые могут противодействовать эффекту охлаждения, испуская лучистую энергию; однако такие протоны будут быстро рассеиваться из-за большого объема завихренной воды; это сведет к минимуму вклад протонов в тепло. Конечным результатом завихрения должно быть охлаждение.)

Образование исключяющих зон в результате вихревого движения воды будет менее загадочным, если вспомнить, что EZ-вода содержит больше кислорода, чем объемная вода. Вихревое движение приводит к постоянному контакту воды с кислородом как из воздуха сверху, так и из пузырьков, увлеченных вихрем вниз. Таким образом, вода постоянно смешивается с кислородом, что способствует образованию исключяющих зон. Кроме того, среда, через которую проходит воздух, неизбежно приобретает отрицательный заряд (см. главу 9), который, в свою очередь, также способствует образованию исключяющих зон (рис. 5.8). Все это, очевидно, говорит о том, что исследование механизма возникновения исключяющих зон в результате

вихревого движения и следующего за этим охлаждения жидкости заслуживает серьезного внимания.

Разрешение парадоксов разбавления и вихревого охлаждения помогает подчеркнуть ключевую тему главы: понимание термических свойств воды требует возврата к основам, а именно к движению зарядов. Чем интенсивнее движутся заряды, тем больше лучистой энергии они вырабатывают, что делает испускающие лучистую энергию вещества «более горячими». Уменьшение подвижности зарядов приводит к уменьшению выработки лучистой энергии, что заставляет вещество выглядеть «холодным».

Приверженность этой фундаментальной концепции только что помогла нам разрешить некоторые парадоксы и еще хорошо послужит нам, когда мы начнем исследование других природных явлений.

РЕЗЮМЕ

Тепловые характеристики воды по-прежнему полны аномалий и парадоксов. Чтобы разрешить эти парадоксы, мы отступили от стандартных объяснений, основанных на тепловой энергии и температуре, и заняли более фундаментальную позицию. В частности, мы сосредоточились на лучистой энергии.

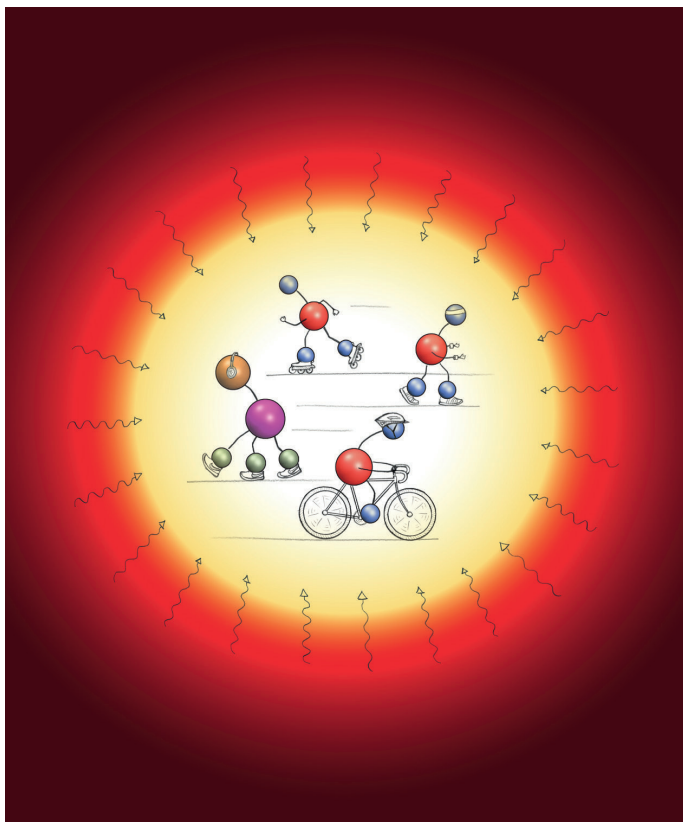
Источником лучистой энергии является движущийся заряд. Колебательное движение заряда порождает электромагнитные волны, которые распространяются через материалы и при этом часто меняют свои характеристики. В случае воды наиболее важные длины волн лежат в инфракрасном диапазоне. Вода излучает и поглощает значительное количество инфракрасной энергии из-за особенностей атомной структуры молекулы воды. Таким образом, инфракрасные волны имеют особое значение, что помогло нам понять, как тепло и температура связаны с лучистой энергией.

Второй особенностью нашего подхода было признание вклада исключаяющих зон в производство лучистой энергии. При строительстве исключаяющей зоны происходит высвобождение протонов, движения которых инициируют ИК-излучение. Мы ощущаем это инфракрасное излучение как тепло. Как только исключаяющая зона перестает расти и вносить протоны в объемную воду, наибольшее значение приобретает доля воды, которая стала EZ-водой. Чем больше объем EZ-воды, тем меньше инфракрасное излучение, что воспринимается нами как охлаждение.

Эти соображения помогают понять, почему смешивание веществ с водой иногда приводит к изменению температуры и объема. Они также помогли разрешить парадокс, открывающий данную главу: почему завихренная вода кажется холодной.

Все эти выводы были получены с использованием понятия лучистой энергии и при условии отказа от использования терминов «тепловая энергия» и «температура». Хотя последние термины могут быть незаменимыми для повседневного использования, их неоднозначность делает невозможным их использование в качестве основы системы научных взглядов.

Мы продолжаем наше исследование, используя свойства лучистой энергии, чтобы прийти к пониманию сути многих явлений. Вы увидите, как понятие лучистой энергии помогает нам осознать обычное повседневное поведение воды.



Глава 11

Осмос и диффузия – они не существуют

В знаменитом мультфильме про Гарфилда изображен толстый кот с высокой стопкой книг на голове. Гарфилд заявляет: «Я получаю знания осмосом». Осмос дает лентяю хоть небольшой шанс на передачу знаний без труда – информация сама просачивается из резервуара знаний в ожидающий мозг.

Реальный осмос, прототип этой метафоры, – это процесс, который переносит воду из места, где ее доля высока, в место, где ее меньше. Вода движется. Осмотическое движение воды сыграло центральную роль в понимании Эйнштейном броуновского движения, и в этой главе я выполняю данное ранее обещание (глава 9) пересмотреть осмотический механизм.

Было бы неправильно рассматривать осмос без упоминания диффузии, поскольку эти явления дополняют друг друга. Диффузия – это движение частиц или молекул в жидкости, в то время как осмос представляет собой движение жидкости к частицам или молекулам (обычно через мембрану). В каком-то смысле эти явления противоположны, хотя они оба уменьшают градиенты концентрации, перемещая вещества в области, где они менее сконцентрированы. Процессы осмоса и диффузии являются основными транспортными средствами природы.

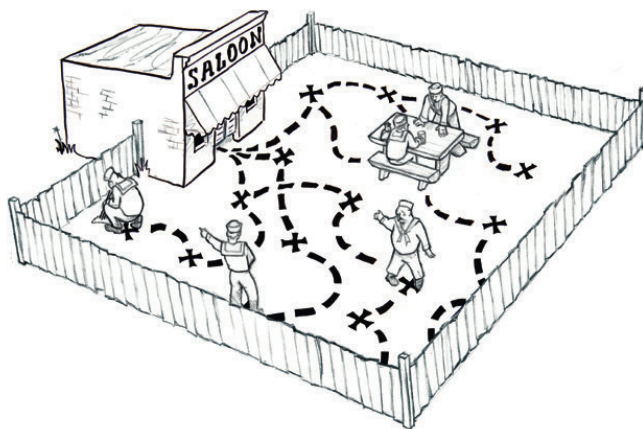
В этой главе мы рассмотрим механизмы, лежащие в основе осмоса и диффузии. Происходят ли эти явления спонтанно как следствие какого-то фундаментального закона природы? Или какая-то энергия, лежащая в их основе, движет ими, словно ветер, вращающий мельницу?

11.1. ДИФфуЗИЯ: ОСМОС НАОБОРОТ

Вы бросаете щепотку соли в куриный суп (с шариками мацы или без них). Соль растворяется в супе. С технической точки зрения, происходит диффузия соли, и суп в конечном итоге становится равномерно вкусным.

Теория диффузии вытекает из общепринятой теории броуновского движения. Под влиянием «тепловых» движений каждая молекула отскакивает в условно случайном направлении – это гарантирует равномерное распространение молекул. Мы можем сравнить эти молекулы с пьяными моряками, выходящими из портового кабака: если они будут находиться внутри огороженного двора (и не будут отвлекаться), то в конечном итоге статистически равномерно распределятся по всему двору (рис. 11.1). Аналогичным образом соль распространяется по всему супу.

Рис. 11.1. Случайные блуждания в конечном итоге приведут к статистически равномерному распределению по определенному пространству



Хотя случайный характер перемещения молекул не вызывает сомнений, эти блуждания требуют энергии: если диффузия является коллективным результатом множества броуновских движений, а броуновские движения нуждаются в энергии (глава 9), то и диффузия нуждается в энергии. Иначе быть не может. Процесс диффузии может выглядеть пассивным, но его должна питать какая-то энергия.

Стандартная теория диффузии не включает в себя внешний источник энергии. Она описывает диффузионное рассеивание в терминах коэффициента диффузии D , который зависит от различных физических факторов (см. врезку в главе 9), но не учитывает поступающую извне энергию. Предполагается, что диффузионное движение происходит самопроизвольно.

Однако часто теоретически предсказанное рассеивание не согласуется с наблюдениями. Классическим примером является диффузия заряженных полимеров в водном растворе: диффузия происходит как в обычном, так и в экстраординарных режимах [1]. Какой режим будет превалировать, зависит от концентрации

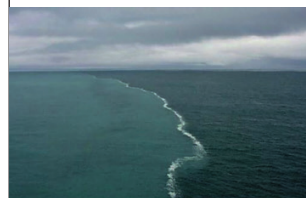
соли. Небольшое снижение концентрации соли может вызвать резкий переход от обычной быстрой диффузии к чрезвычайно медленной диффузии. Причина такого бистабильного поведения остается неуловимой для тех, кто ограничен рамками классической теории.

Противоречия между теорией и реальностью часто приводят к введению таких надуманных терминов, как «субдиффузия» или «супердиффузия». Например, говорят, что белки демонстрируют субдиффузию [2], тогда как частицы в метеорных следах демонстрируют супердиффузию [3]. Эти термины лишь подчеркивают, что стандартная теория диффузии не работает так надежно, как хотелось бы надеяться. Традиционной формулировке явно чего-то не хватает.

Эта ограниченность теории проявляется даже в обычных бытовых явлениях. Например, возьмем смешивание речной и морской воды. Реки сбрасывают свою воду в море, и стандартная теория диффузии предсказывает, что два типа воды должны сразу смешиваться. Однако предсказание не всегда сбывается: в некоторых местах соленая и пресная вода могут оставаться разделенными практически бесконечно [w1]. Даже массы соленой воды из разных источников с трудом смешиваются между собой: вблизи курортного города Скаген, Дания, где Балтийское море встречается с Северным морем, постоянно присутствует хорошо заметная разделительная линия [w2]. Пример этой линии показан на рисунке справа.

Задумавшись об этих общеизвестных нестыковках с теорией, мы решили провести собственные эксперименты. Мы налили насыщенный раствор соли в стакан, а затем долили сверху чистую воду, которая содержала красители или микросферы, что позволило нам наблюдать, как смешиваются верхний и нижний растворы. В течение многих часов не происходило заметного смешения жидкостей. То же самое произошло в обратном эксперименте, где мы наливали соленую воду поверх чистой воды: и в этом случае мы не наблюдали видимого смешения. Результат второго эксперимента означает, что различия в плотности не могут служить объяснением устойчивого разделения. Диффузия должна была равномерно распределить молекулы воды и частицы примесей по всему стакану, но этого не случилось, точно так же как долгое время не могут смешаться воды реки и океана.

В следующих экспериментах мы впрыскивали каплю красителя в угол камеры, чтобы наблюдать за его



При слиянии Балтийского и Северного морей образуется разделительная линия

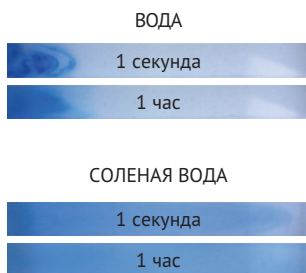


Рис. 11.2. Диффузия метиленового синего красителя. Длина камеры 7,5 см. В чистой воде краситель диффундирует, как и ожидалось; в соленой воде (4 М KCl) краситель диффундирует очень быстро

диффузией. Некоторые результаты шокировали нас. После впрыскивания в камеру с чистой водой краситель диффундирует более или менее в соответствии с уравнением диффузии, то есть довольно медленно (рис. 11.2, вверху). Но когда тот же краситель вводили в концентрированный раствор соли, он распространялся по тонкому поверхностному слою настолько быстро, что мы не могли уследить за ним на глаз; за одну секунду он покрывал практически всю поверхность (рис. 11.2, внизу). Как только это происходило, краситель почти не диффундировал вниз в тело раствора даже через неделю.

Ошеломленные этими результатами, мы продолжили проверять, возникают ли различия из-за какой-то особенности конкретного красителя или соли. Несколько красителей дали аналогичные результаты, как и замена красителя клетками водорослей. Не имело значения, является соль хлористым калием или чем-то еще из множества других распространенных солей. Мы по-прежнему наблюдали качественную разницу между диффузией в чистой и соленой воде.

Эти эксперименты показали, насколько сильно может отличаться реальная диффузия от теоретической. Уравнение диффузии может быть простым, удобным в применении и адекватным прогнозом при ограниченном наборе обстоятельств. Однако это уравнение не дает общего объяснения механизма распространения молекул.

Что не так с теорией?

Уравнение диффузии пришло из концепции теплового движения: вещества рассеиваются в результате хаотичных тепловых колебаний молекул. Однако если внешняя энергия вызывает колебания молекул (глава 9), тогда она также должна стимулировать и диффузию. Поэтому не следует ожидать, что уравнение диффузии будет работать должным образом без учета энергетического фактора. Полезным первым шагом может стать включение энергии в усовершенствованную теорию (рис. 11.3, вверху), хотя это, вероятно, нетривиальная задача.

На втором шаге необходимо учесть «отвлекающие» факторы – так называемые *дистракторы*. Локализованный заряд-дистрактор будет отвлекать растворенные вещества от их нормального поведения так же, как привлекательная женщина будет отвлекать большинство пьяных моряков (рис. 11.3, внизу). Растворенные вещества будут двигаться в предсказуемых направле-

ниях, приближаясь к локализованному заряду или удаляясь от него.

Таким образом, диффузия – это не просто взаимосвязь температуры, размера частиц и вязкости среды, как утверждает классическое уравнение диффузии (врезка в главе 9). Для правильного описания явления диффузии уравнение должно учитывать поглощенную падающую энергию, а также любые отвлекающие заряды, которые могут присутствовать в жидкости. Только тогда теория начнет отражать реальность.

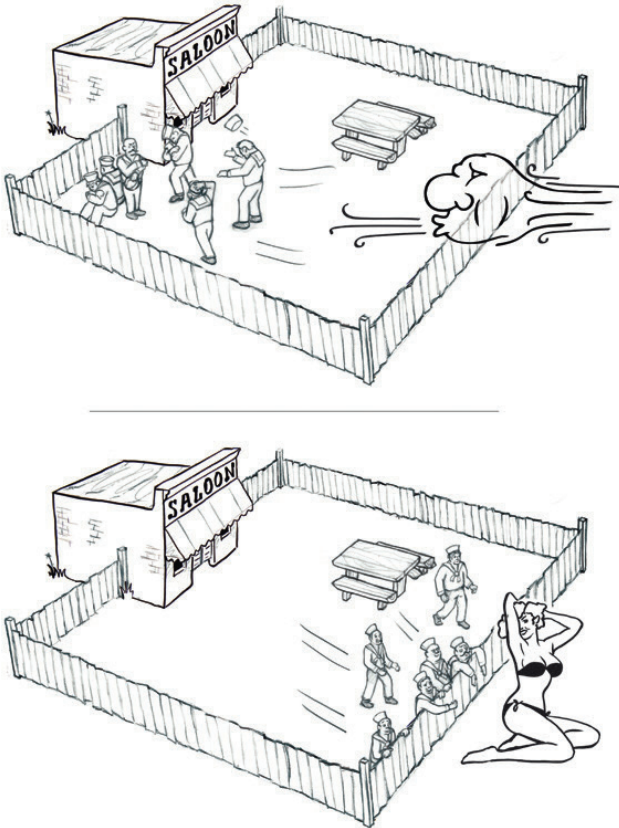


Рис. 11.3. Аналогия диффузии. Диффузионные движения приводятся в движение внешней энергией (вверху) и подвержены влиянию отвлекающих факторов (внизу)

У нас есть соображения о том, с какой стороны подойти к разработке более адекватной теории. Прежде всего следует сосредоточить внимание на ключевой роли внешней энергии. Поглощенная энергия создает исключаяющие зоны вокруг частиц и молекул. Эти зоны разделяют заряды, которые затем становятся предметом вожделения заряженных дистракторов. Положительно заряженные дистракторы будут притягивать отрицательно заряженные исключаяющие зоны и лю-

бые свободные OH^- -ионы; отрицательно заряженные дистракторы будут притягивать положительно заряженные исключаяющие зоны и ионы гидроксония. Чем больше приток внешней энергии, тем сильнее притяжение. Суть в том, что это обусловленное энергией притяжение представляет собой нечто большее, чем побочное явление: питаемые энергией обусловленные зарядами силы в значительной степени определяют характер диффузии.

В таком случае диффузия растворенного вещества во многом похожа на диффузию пьяных моряков: если вы хотите определить мгновенные местоположения моряков, вам необходимо учитывать их энергию и отвлекающие факторы.

Почему чистая и соленая вода смешиваются с таким трудом

Затрудненное смешивание чистой и соленой воды может быть следствием механизма притяжения одноименных зарядов. Молекулы соли окутывают себя исключаяющими зонами [4]. По мере того как растут эти зоны, они генерируют все больше противоположных зарядов – создавая тем самым опосредованное притяжение одноименных зарядов. При достаточно высоких концентрациях соли эти исключаяющие зоны упаковываются в упорядоченные массивы, очень похожие на коллоидные кристаллы (см. главу 8). Действительно, целый ряд измерений оптического рассеяния подтверждает, что растворенные молекулы соли упаковываются в массивные водосодержащие кластеры [5]. Эти кластеры могут напоминать коллоидные кристаллы.

Следовательно, при высоких концентрациях соли в пространстве решетки должна доминировать EZ-вода. Исключаяющие зоны выталкивают почти все, включая даже объемную воду (см. рис. 11.6 ниже). Поэтому вода, оказавшаяся рядом с солевой решеткой, не будет смешиваться с ней даже в течение длительного времени. Этот механизм устойчивого разделения объясняет трудности смешивания речной воды с соленой водой.



В воде очень трудно проникнуть в «кристалл» соленой воды

11.2. Осмос – ЕЩЕ ОДНО НЕПОНЯТНОЕ ЯВЛЕНИЕ

Разобравшись с диффузией, мы посмотрим на явление с другой стороны и разберем осмос – диффузионное движение воды. Поскольку вода состоит из молекул, она должна вести себя как другие молекулы: ее диффузионные движения должны соответствовать тем же принципам, включая получение энергии из внешних источников и основанные на заряде дистракторы.

Традиционная теория осмоса не учитывает энергию, но, по крайней мере, принимает во внимание отвлекающие факторы. Дистракторами являются твердые тела. Утверждается, что взвешенные или растворенные твердые вещества «притягивают» молекулы воды, которые затем диффундируют к растворенным веществам. Считается, что притяжение не имеет отношения к заряду; его объясняют в терминах «концентрации»: молекулы воды перемещаются из областей с более высокой концентрацией (таких как чистая вода) в области с более низкой концентрацией, где вода перемежается с твердыми частицами. Таким образом, вода тянется к растворенным веществам.

Следуя этой формулировке, ученые, включая Эйнштейна, приняли «гарфилдовский» подход к осмосу: пассивное движение воды, очень похожее на пассивный поток знаний. Концентрация молекул воды выравнивается по такому же принципу, как диффузия выравнивает концентрацию молекул растворенного вещества. Однако осмос не может быть пассивным. Если в основе осмоса лежат вызванные поглощенной энергией диффузионные перемещения, то эта энергия должна играть определенную роль в осмосе. Вклад поглощенной энергии не может просто исчезнуть для удобства теории.

Так почему же тогда вода движется?

Многие из нас учили следующий общий принцип: осмос происходит потому, что все в природе стремится к равновесию. Вода «пытается» выровнять свою концентрацию. Таким образом, когда емкость разделена полупроницаемой мембраной на два отсека, молекулы будут двигаться в направлении отсека с большим количеством растворенных веществ (рис. 11.4). Это предположительно происходит потому, что молекулы воды скачут в бесконечном тепловом движении; если они могут проходить через мембрану, то будут пытаться уравнивать концентрацию в разных отсеках, поднимая уровень воды в отсеке, содержащем растворенные вещества.

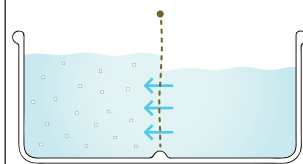


Рис. 11.4. Стандартная экспериментальная установка для наблюдения за осмосом. Мембрана может пропускать молекулы воды, но не растворенные в ней вещества. Вода перемещается из отсека с низкой концентрацией растворенного вещества в отсек с высокой концентрацией растворенного вещества, поднимая уровень воды слева

Это не единственная точка зрения. Ученые обсуждали механизм осмоса на протяжении более трех веков, предлагая множество идей, которые все еще остаются актуальными. В перечень этих идей входят так называемые теория концентрации воды, теория бомбардировки растворенных веществ, теория притяжения растворенных веществ и теория водного натяжения, а также вариант последней теории, который будет предложен в следующей книге австралийского коллеги Джона Уоттерсона (John Watterson). У каждой теории имеются заслуживающие доверия аргументы, но, увы, ни одно предположение не объясняет полную картину; следовательно, ни одна теория не получила всеобщего признания. Вот в чем беда: у нас до сих пор нет четкого объяснения механизма осмоса.

11.3. ОСМОС КАК ЭПИФЕНОМЕН

Одна из возможных причин, по которой механизм осмоса ускользает от нашего понимания, заключается в том, что никто не мог представить себе роль поглощенной энергии в этом процессе; питаемое внешней энергией движение было чуждой концепцией. Другая причина заключается в том, что в стандартном эксперименте с мембраной, используемом для изучения осмоса, никто не мог представить, что сама разделительная мембрана окажется критически важным компонентом. Мембрана казалась всего лишь пассивным барьером, блокирующим растворенные вещества, но позволяющим меньшим молекулам воды проходить из одной камеры в другую.

Теперь мы знаем, что гидрофильные мембраны образуют исключаяющие зоны. Если подобные зоны образуются с обеих сторон мембраны, то оба отсека будут заполнены протонированной водой. И если концентрации протонированной воды в двух отсеках различаются, то относительно мембраны возникнет протонный градиент. Как я покажу далее, такой протонный градиент будет «протаскивать» ионы гидроксония через мембрану, перемещая воду из одного отделения в другое.

Таким образом, у мембраны есть шанс оказаться главным действующим лицом в осмотической драме. Мембрана может создать градиент ионов гидроксония, который приводит в движение осмотический поток воды. С другой стороны, этот гипотетический механизм поднимает острый вопрос: у каждой стороны мембраны образуется исключаяющая зона, представляющая собой барьер, который должны преодолеть

молекулы воды, если они попытаются перетекать из одного отделения в другое. Каким образом вода преодолевает слой исключяющей зоны?

Мы решили проверить гипотезу о протонном градиенте, надеясь в процессе исследований решить эту непростую проблему проникновения. Чтобы убедиться в существовании протонного градиента, мы изготовили стандартную установку, состоящую из двух смежных камер, разделенных обычной осмотической мембраной, как показано на рис. 11.4. Мы применили широко используемую мембрану, поры которой, по-видимому, достаточно велики, чтобы пропустить молекулы воды, но не растворенные вещества. Эта установка позволила нам отслеживать движение воды в сторону камеры с растворенными веществами. Мы также могли исследовать обе стороны мембраны с помощью микроскопа.

Упомянутые выше предположения полностью оправдались [6]. Во-первых, мы подтвердили наличие по обе стороны мембраны исключяющих зон. Мы видели их не только рядом с целлюлозно-ацетатной мембраной, обычно используемой для экспериментов с осмосом, но и рядом с мембраной из нафiona, которая создает аналогичные осмотические потоки.

В обоих случаях, однако, две исключяющие зоны различались по размеру (рис. 11.5). Правая поверхность мембраны, контактирующая с чистой водой, должна образовать исключяющую зону стандартного размера, что в действительности и наблюдалось. Левая поверхность обращена к солевому раствору. Соль уменьшает размер исключяющей зоны [7]. Поэтому исключяющая зона на левой стороне мембраны была намного меньше.

Как насчет протонов? Правая камера должна содержать множество протонированных молекул воды из-за большой исключяющей зоны, примыкающей к мембране. Левая исключяющая зона, будучи намного меньше, должна выделять очень мало протонов. Измерения потенциала вблизи мембраны подтвердили, что правая камера имеет значительно больший положительный заряд, чем левая. Итак, предполагаемый электрический градиент оказался реальным.

Теперь представьте судьбу ионов гидроксония в правой камере. Будучи положительно заряженными молекулами воды, ионы гидроксония отталкивают друг друга и хотят вырваться из правой камеры. Очевидным пунктом назначения является левая камера, в которой меньше положительных зарядов, поэтому она имеет более низкий электрический потенциал. Следователь-

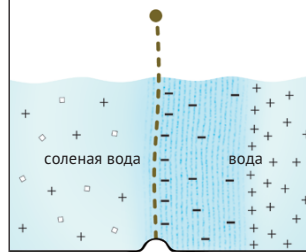


Рис. 11.5. Стандартный осмотический эксперимент с зонами исключения и протонами, распределенными асимметрично вокруг разделительной мембраны

но, протонированные молекулы воды должны течь влево, создавая осмотический поток, который должен продолжаться до исчезновения градиента заряда.

Вышеописанный сценарий описывает роль мембраны в осмотическом дисбалансе и показывает, как асимметрия создает поток протонированной воды. Тем не менее мембрана не является единственным движущим агентом; молекулы соли сами способствуют выравниванию потенциалов, и я через минуту вернусь к этому вопросу.

Между тем из данной модели следуют далеко идущие выводы относительно энергетики процессов. Поглощенная лучистая энергия питает строительство исключочающей зоны, которая, в свою очередь, разделяет заряды, приводящие в движение поток. Следовательно, *явление осмоса обусловлено внешней энергией*. Этот вывод резко контрастирует с утверждением всех конкурирующих теорий, что осмос является пассивным процессом, совершенно не требующим притока энергии. Осмос нуждается в энергии. Получение чего-то даром – это то, чего не может себе позволить даже природа.

11.4. ДЫРЯВЫЕ ПЛОТИНЫ

Что касается осмотического потока, мы все еще не ответили на вопрос о том, как ионы гидроксония проходят через, казалось бы, непроницаемый EZ-барьер.

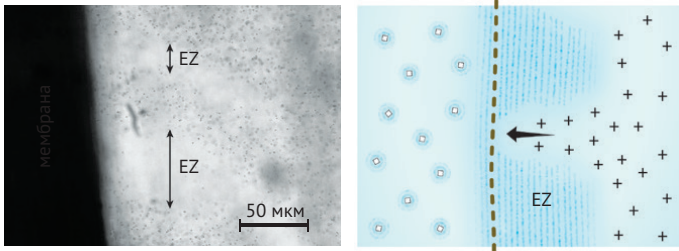
Прямое проникновение маловероятно из-за малого размера пор в исключочающей зоне. Размера стандартного шестиугольника едва хватает, чтобы пропустить молекулу воды; размер ячейки сита, которым является исключочающая зона, еще меньше, потому что смежные слои исключочающей зоны взаимно смещены (рис. 4.15), тем самым сужая проходное сечение сетки примерно в три раза. Молекула воды не должна проходить через исключочающую зону.

Небольшая авария подтвердила это предположение. Студент-старшекурсник, проводивший эксперимент по осмосу с использованием установки наподобие изображенной на рис. 11.5, однажды утром вернулся в лабораторию и обнаружил, что накануне вечером забыл слить жидкости из установки. Соленая вода вытекла из камеры из-за плохой герметичности; однако камера с другой стороны мембраны оставалась полной. Разделительная мембрана не позволила чистой воде вытечь. Сначала это нас удивило, потому что вода спокойно проходит через мембрану во время обычного эксперимента по осмосу.

Последующие эксперименты подтвердили тот же результат: притом что сторона солевого раствора была пустой с самого начала, а другая сторона была заполнена чистой водой, мы не видели, чтобы вода просачивалась через мембрану. Даже когда мы наклонили установку на 90° , чтобы нам помогла сила тяжести, вода не просочилась сверху вниз (рис. 11.6).

Парадокс никуда не делся: хотя очевидно, что сетка исключаяющей зоны слишком мелкая, чтобы пропускать воду, вода во время осмоса явно перетекает из одной камеры в другую. Мы были совершенно сбиты с толку.

Нам удалось разрешить парадокс благодаря визуальному наблюдению (рис. 11.7). В то время как исключаящие зоны обычно покрывают всю площадь мембраны, в эксперименте по осмосу они этого не делают: исследование при помощи микроскопа обнаружило удивительно большие дефекты [6]. Эти неоднородности представляют собой порталы, через которые легко проходят молекулы воды – точно так же, как вода может проникать через отверстия в плотине. Парадокс разрешен.



Что создает эти нарушения? Локально формирующиеся исключаящие зоны выделяют протоны. Эти протоны возвращаются обратно через те участки мембраны, в которых исключаящие зоны еще не начали строиться, и проникают в левую камеру (рис. 11.7, справа). Этот поток препятствует росту исключаящих зон в упомянутых участках; следовательно, построение EZ-слоев остается неоднородным, что мы и наблюдаем.

Наличие дефектов у исключаящих зон не является уникальным для осмоса. Мы наблюдаем их также в зонах, прилегающих к определенным металлам (см. главу 12); предположительно они существуют вокруг клеток, где молекулы должны проходить через EZ-оболочку туда или обратно. В самом деле, градиенты заряда, существующие на границе между клеткой и средой, могут управлять потоком молекул точно так же, как они управляют потоком при осмосе.

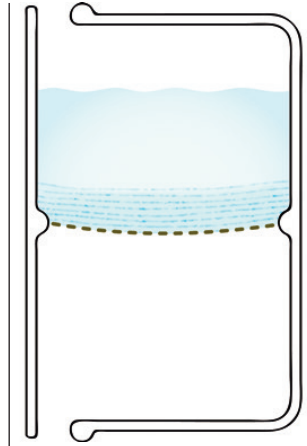


Рис. 11.6. Вода не проникает в исключаящую зону

Рис. 11.7. Дефекты исключаяющей зоны, наблюдаемые под микроскопом (слева). Положительные заряды вторгаются в отрицательно заряженные исключаяющие зоны, создавая локальные нарушения (справа)

11.5. ПРИТЯЖЕНИЕ МОЛЕКУЛ СОЛИ

Другая проблема – роль молекул соли. Вокруг молекул соли (или других растворенных молекул) образуются исключаяющие зоны. Возникает вопрос: какова роль этих зон в механизме осмотического потока?

Рассмотрим рис. 11.8. В тех местах, где справа от мембраны к ней подходят ионы гидроксония, слева от нее собираются частицы соли, потому что их исключаяющие зоны несут отрицательный заряд. Это вопрос банального электростатического притяжения. Отрицательно заряженные исключаяющие зоны остаются на месте; они не могут пройти через мембрану. Их присутствие вынуждает ионы гидроксония двигаться влево. Этот поток поддерживает дефекты в правой части исключаяющей зоны, обеспечивая протекание через них непрерывного потока гидроксония.

Следовательно, ионы гидроксония движутся справа налево не только потому, что электростатическое отталкивание вытесняет их из правой камеры, но также – и, возможно, главным образом – потому, что отрицательно заряженные исключаяющие зоны с другой стороны создают притягивающую силу. Это притяжение обеспечивает их движение влево.

Этот последний механизм дает нам общее понимание осмоса. В приведенном выше описании мы имели дело со стандартной экспериментальной установкой для изучения осмоса: мембрана, разделяющая камеры с низкой и высокой концентрацией соли. Такая конфигурация подразумевает обилие ионов гидроксония на одной стороне мембраны и значительный отрицательный заряд на другой стороне. Подобный градиент вызывает перетекание ионов гидроксония и повышение уровня воды на более соленой стороне (рис. 11.4).

Однако эта конкретная ситуация является лишь частным случаем механизма разделения зарядов. Любое обособленное скопление ионов гидроксония будет инициировать поток: положительно заряженные молекулы воды неизбежно будут перемещаться к отрицательно заряженным исключаяющим зонам. Это и есть осмотический поток.

Следовательно, мы можем обойтись без мембраны – она является лишь удобным средством для разделения положительных ионов гидроксония и отрицательного заряда. С мембраной или в ее отсутствие *главный герой осмоса – ион гидроксония, возникший при поглощении внешней энергии*. Ионы гидроксония всегда движутся к отрицательному заряду.

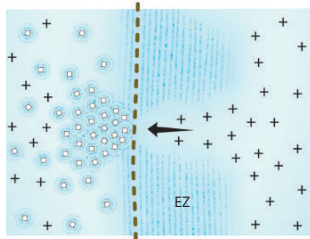


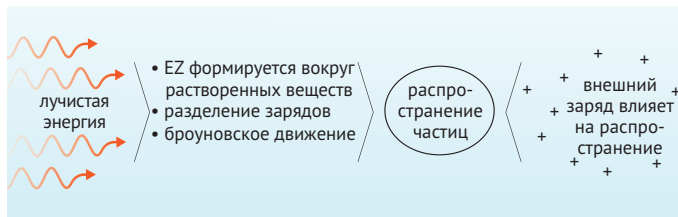
Рис. 11.8. Скопление EZ с левой стороны мембраны притягивает ионы гидроксония влево

Возникает вопрос: почему эти градиенты электрического заряда не были обнаружены раньше? Вы можете справедливо предположить, что за три столетия изучения осмоса хоть кто-то удосужился это сделать. Действительно, так и есть: в классических экспериментах, проведенных столетие назад [8], Жак Леб (Jacques Loeb) установил наличие разности электрических потенциалов между двумя сторонами осмотической мембраны.

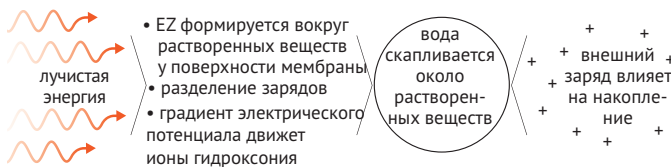
К сожалению, это ключевое открытие, судя по всему, было забыто в период экспериментов на молекулярном уровне. Разница электрических потенциалов явно присутствует в осмотической системе; как справедливо заметил Леб, она, безусловно, должна быть фактором, стимулирующим осмотический поток.

Следовательно, осмос работает почти так же, как диффузия (рис. 11.9). Потоки обоих типов приводятся в движение градиентами заряда – градиентами, возникшими вследствие поглощения лучистой энергии.

ДИФфуЗИЯ



OSMOSIS



11.6. Подгузники и гели

Мы постоянно встречаем осмос в повседневной жизни. Типичными примерами, иллюстрирующими вышеупомянутые принципы, могут послужить гели и подгузники.

Гели удерживают в себе невероятное количество воды. Желатиновые десерты содержат 95 % воды, в то время как некоторые лабораторные гели могут содержать до 99,95 % воды [9]. Подгузники обладают аналогичными свойствами. К нашему счастью, вес

Рис. 11.9. Краткий обзор механизмов диффузии и осмоса, иллюстрирующий общую природу этих явлений

Травма и отек

Осмос играет важную роль в жизнедеятельности клеток. Поскольку клетка заполнена отрицательно заряженными белками, цитоплазма должна вызывать осмотическое притяжение (обычно называемое осмотическим давлением), аналогичное осмотическому притяжению, возникающему в гелях, тканях и подгузниках. Физиологи знают, что это так и есть.

Однако особенностью клеток является их относительно скромное содержание воды. По сравнению с отношением 20:1 для многих обычных гелей отношение воды к твердым веществам в клетке составляет всего около 2:1. Многочисленные отрицательно заряженные макромолекулы клетки должны вызывать сильное осмотическое притяжение; и все же содержание воды в клетке остается небольшим. Это может быть следствием жесткости макромолекулярной сети: клеточные стенки обычно содержат сшитые трубчатые или многоцепочечные биополимеры. Возникающая вследствие этого жесткость препятствует растягиванию стенок клетки и полной реализации осмотического потенциала.

Однако если эти перекрестные связи будут нарушены, то осмотическое притяжение сможет развернуться в полную силу; в этом случае ткань может сильно расширяться. В экспериментах с одиночными мышечными волокнами нам слишком часто доводилось видеть это расширение: когда пинцет экспериментатора нечаянно соскальзывал, локальное повреждение создавало узел, который быстро увеличивался примерно до десятикратного диаметра остальной части волокна. Очевидно, возникало локальное нарушение структуры волокна,

и вода извне быстро проникала в ткань, вызывая набухание. В этот момент мы понимали, что эксперимент не удался.



Пример посттравматического отека

Отек при повреждении тканей организма, особенно при вывихах, возникает аналогичным образом. Травма разрушает волокнистые макромолекулы и поперечные связи, устраняя сдерживающие силы, которые держат осмос в подчинении; дальнейшее осмотическое расширение может протекать практически беспрепятственно.

Причина, по которой отек может быть настолько впечатляющим, заключается в том, что разрушение происходит лавинообразно. Разрыв одной поперечной связи приводит к увеличению нагрузки на соседние поперечные связи – разрушение развивается подобно застегке-молнии. Когда это случается, практически ничто не сдерживает осмотический приток воды в ткани, что часто приводит к быстрому возникновению огромного отека. Ткань вернется к нормальному состоянию только после восстановления поперечных связей, когда матрица ткани вновь образует прочную структуру.

поглощаемой жидкости может многократно превышать вес подгузников. Они обладают такой способностью, потому что вода исключаяющей зоны прилипает к внутренним гидрофильным поверхностям материала подгузников, и эти зоны могут иметь значительные размеры.

Впитывание начинается, когда сухая гидрофильная сетка геля (или подгузника) подвергается воздействию воды. Вода делает больше, чем просто заполняет открытые ячейки сетки, – она расширяет сетку. Через несколько секунд или минут сетка растягивается, иногда до внушительных размеров. Здесь явно не обошлось без осмоса, потому что вода течет в направлении твердого вещества.

Как зарождается этот обильный поток?

Когда сухой гель погружают в воду, поверхностные слои сетки и выступающие полимерные нити немедленно начинают увлажняться. Происходит формирование исключаяющих зон, за пределами которых скапливаются ионы гидроксония. Если матрица несет отрицательный заряд, то ионы гидроксония начнут устремляться внутрь, в саму матрицу.

Отрицательный заряд характерен для гидрофильных матриц. Для этого есть несколько причин: во-первых, потому что сами полимеры обычно обладают отрицательным зарядом; во-вторых, потому что даже «сухие» полимеры содержат некоторое количество прочно удерживаемой EZ-воды, которую практически невозможно удалить. Например, бумага (целлюлоза) обычно содержит 7–8 % воды; даже несколько дней сушки в духовке не помогают удалить эту воду. Таким образом, значительный отрицательный заряд матрицы втягивает ионы гидроксония внутрь, неизбежно увлекая за собой прилегающие дипольные молекулы воды. Итак, матрица начинает заполняться водой и ионами гидроксония. Это осмотический поток: ионы гидроксония движутся навстречу отрицательному заряду.

Постарайтесь представить дальнейшее развитие событий. Проникающая вода служит сырьем для формирования новых слоев исключаяющих зон; поскольку эти зоны образуются при участии внешней лучистой энергии, они вытесняют протоны; молекулы протонированной воды проникают глубже в отрицательно заряженную матрицу, увлекая за собой все больше воды, и так далее. Вскоре весь гель наполняется водой. К этому моменту все поверхности матрицы покрыты обширными исключаяющими зонами, а промежуточные карманы заполнены протонированной объемной водой.

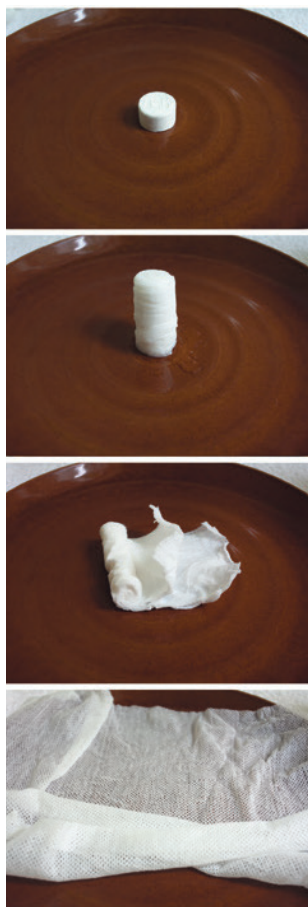


Рис. 11.10. Разбухание, вызванное гидратацией. Изначально сухая гидрофильная марля (верхний кадр). Добавление воды заставляет марлю разбухать (второй кадр сверху). Развернутая марля теперь готова для вытирания рук (нижние кадры)

Что окончательно останавливает осмотический поток? Конечно, не нейтрализация заряда матрицы, поскольку даже обильно заполненные гели сохраняют отрицательный заряд. Микроэлектроды, введенные в эти гели, обнаруживают отрицательный электрический потенциал (например, рис. 4.7). Следовательно, даже набухшие матрицы должны сохранять способность впитывать протонированную воду.

Услышав это, вы можете подумать, что гель способен бесконечно расширяться; однако его рост сдерживают механические ограничения. Эластичная сетка может вместить много воды до того, как будет достигнут предел упругости и поток остановится. Жесткая сетка быстрее ограничит впитывание воды. Точка предельного наполнения достигается в момент, когда механическая сила сопротивления материала сетки уравнивает осмотическую силу втягивания.

На этом этапе гель содержит много EZ-воды. Полости между этими зонами содержат протонированную воду. Эта вода притягивается к отрицательно заряженным исключаящим зонам и удерживается в геле, если ее не выдавить. Ваш желатиновый десерт устроен примерно так же, как и мокрый подгузник вашего ребенка.

Один забавный случай подтвердил природу осмотического впитывания. Во время недавней поездки в Пизу коллега повел меня в любимый местный ресторан. После того как мы сели, официантка решила продемонстрировать нам высший класс обслуживания. Она церемонно поместила маленькие белые цилиндрические капсулы на стоящие перед нами тарелки (рис. 11.10, вверху). Поскольку капсулы оказались на наших тарелках, я интуитивно предположил, что они съедобны – возможно, какие-то экзотические местные морепродукты. Они и впрямь были экзотическими – когда официантка поливала их водой, они оживали, словно вода была чудотворной, и волшебным образом увеличивались более чем в пять раз по сравнению с их первоначальным размером (рис. 11.10, второй кадр сверху).

На самом деле эти капсулы не были съедобными. Они оказались лентами из волокнистой сетки, спрессованными в плотные плоские таблетки. Разбухшая гидратированная лента – это всего лишь влажная ткань, предназначенная для вытирания грязных рук (нижние кадры). Материал, наподобие наполнителя для подгузников, был ловко упакован в компактную цилиндрическую капсулу, готовую к применению.

Последствия увлажнения марлевой сетки представляют особый интерес, потому что мы недавно начали исследовать гидратацию таких сеток с помощью инфракрасной камеры. Мы помещали каплю воды на плоскую сетку из кусочка ткани. По мере смачивания ткани инфракрасная камера всегда обнаруживала «горячую» зону на передней кромке пятна; другими словами, передний фронт гидратации излучает много инфракрасной энергии (рис. 11.11). Данное явление вполне поддается объяснению: движущиеся заряды испускают инфракрасное излучение. Продвигающиеся вперед ионы гидроксония – движущиеся заряды на переднем крае воды – обуславливают высокую инфракрасную эмиссию. Эти заряды прокладывают путь.

Таким образом, заряды способствуют проникновению воды в гидрофильные полимерные сети – так же, как они приводят к проникновению воды в растворенные вещества. Оба этих осмотических явления связаны с притяжением ионов гидроксония к отрицательному заряду. И то, и другое питается внешней энергией, которая разделяет заряд, ответственный за осмотическое притяжение.

11.7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общепринятое понимание природы осмоса заключается в том, что якобы «соль всасывает воду». Мы обнаружили, однако, что соль на самом деле не притягивает воду. Соль (и другие растворенные вещества или частицы) создает вокруг себя отрицательные исключительные зоны, привлекая тем самым положительно заряженные ионы гидроксония. Этот электрический градиент приводит в движение осмотический поток.

Следовательно, осмос – это прямое следствие поглощения падающей лучистой энергии. Эта энергия разделяет заряды, которые заставляют молекулы жидкости двигаться. Осмос не является фундаментальной силой природы, как это предполагает классическая формулировка броуновского движения (глава 9).

Как и осмос, диффузия – это процесс смешивания. Диффузия имеет дело с движением молекул растворенных веществ, а не с движением молекул растворителя. И вновь источником движения является внешняя энергия, разделяющая заряды. Эти разделенные заряды инициируют перемещения частиц, приводящие к смешиванию.

Можно сказать, что явления осмоса и диффузии схожи. И то, и другое требует энергии, а энергетиче-

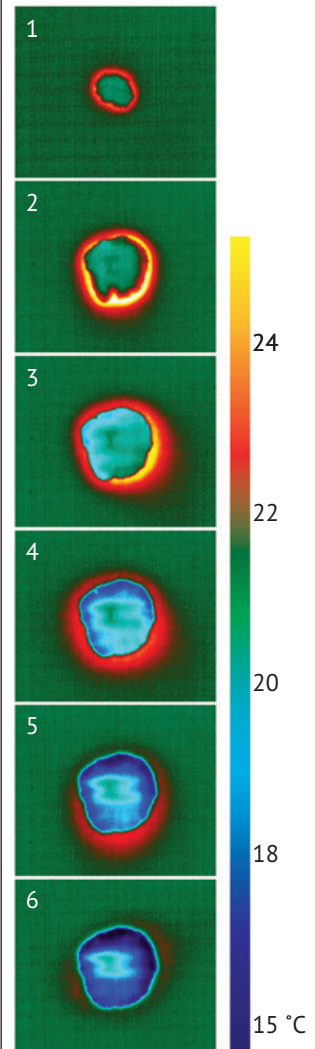


Рис. 11.11. Серия инфракрасных снимков капли воды, растекающейся по салфетке. Во время распространения воды внешний край содержит «горячую» область

ское разделение зарядов является ключевым аспектом для обоих типов движения. Осмос и диффузию можно рассматривать как естественные последствия поглощения солнечной энергии.

Если вас удивляет столь частое упоминание энергии и заряда на этих страницах, то вы совершенно правы. Следующий раздел продолжается в том же духе. Он начинается с обсуждения простых повседневных явлений например с того, почему лед скользкий, и заканчивается тем, почему ваши суставы не скрипят. Удивительно простые объяснения подобных явлений основаны на разделении зарядов.

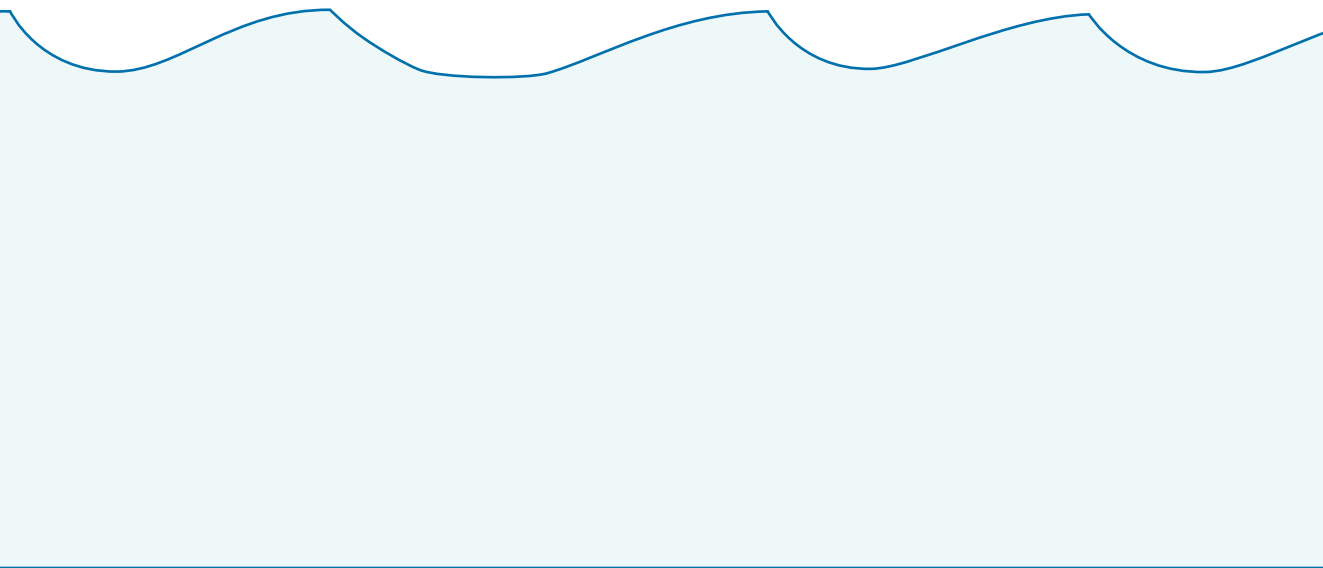
В разделе IV я опираюсь на общепринятые трактовки с учетом того, в какой степени ранее разработанные теории помогают нам найти объяснение повседневных явлений, начиная от энергии, накопленной в электрических батареях, до слияния пузырьков.

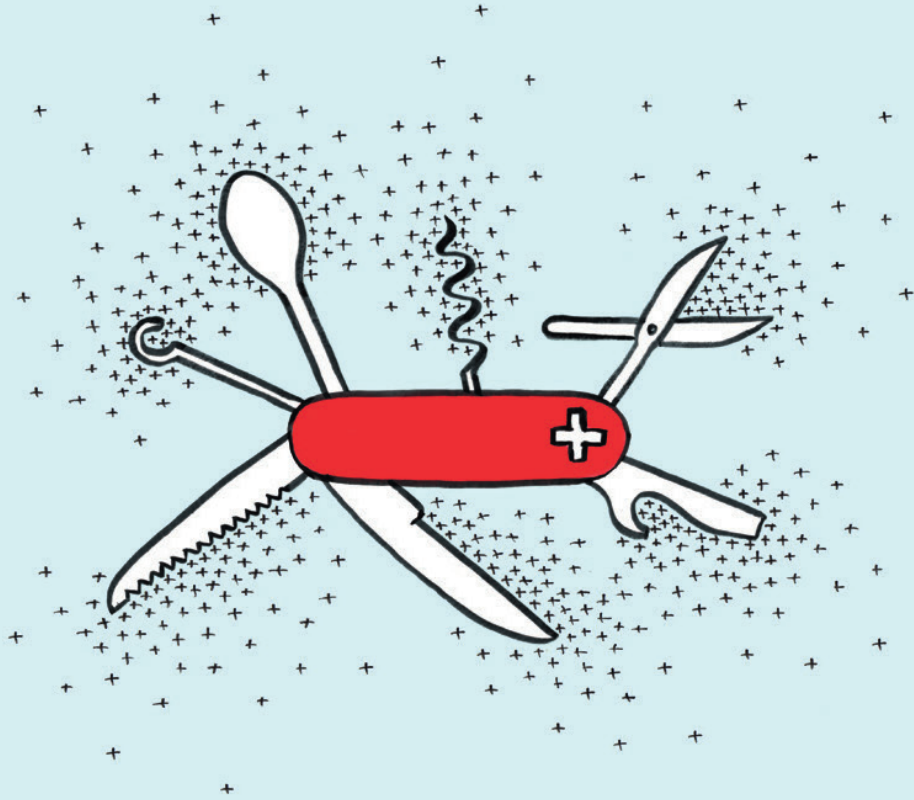
Многие из этих теорий подкреплены убедительными доказательствами, но некоторые идеи лишь обрисованы в общих чертах: территорию знаний покрывает настолько густая тьма, что новый свет не может проникнуть сразу во все углы. В тех случаях, когда мои выводы основаны лишь на предположениях, я буду помещать на полях предупреждение для читателей. Пример такого предупреждения вы можете видеть на рисунке ниже.



РАЗДЕЛ IV

Формы воды в природе





Глава 12

Энергия протонированной ВОДЫ

Погрузившись в полудрему на заднем ряду лекционного зала, я упустил важный момент в рассказе профессора-химика. В то время я был студентом, а темой лекции был протон.

Все знали, что протоны – это положительно заряженные частицы, плотно сгруппированные в центре атома, но профессор сказал нам, что они могут быть пожертвованы. По его словам, кислоты отдают протоны. Получается, что протоны должны обитать где-то на периферии атома – и с этим я еще мог согласиться; однако я не мог понять, как этот положительный протон, уже образовавший зарядовую пару с периферийным электроном, может так легко «покинуть» атом. Ведь очевидно, что противоположные заряды должны слипнуться, как магниты.

Далее профессор рассказал обо всех чудесных вещах, в которых непосредственно участвуют протоны, от химических реакций до электрических батарей. Но я все еще не мог понять логику. Не решаясь задать вопрос, чтобы не выглядеть глупцом, я держал рот на замке, обрекая себя на долгое невежество. Эх, не бывать мне химиком! Эти протоны, казалось, наделены всевозможными таинственными суперспособностями, но я никак не мог постичь природу этих способностей.

Наконец, спустя много лет семена знаний дали первые всходы. Теперь я лучше понимаю, что придает протонам их хваленую силу. Магия сводится к трем простым факторам: во-первых, их много – формирование исключаящей зоны высвобождает колоссальное количество протонов. Во-вторых, эти протоны быстро захватываются молекулами воды, образуя ионы гидроксония, полные потенциальной энергии. В-третьих, эти – теперь заряженные – молекулы воды подчиняются законам физики: они притягиваются к отрицательному заряду и отталкиваются от положительного.



Пожертвование на
благое дело

Итак, вся сила протонов – в электростатике. Электростатические силы играют ключевую роль в осмосе (глава 11). В этой главе мы расширяем простую электростатическую теорию и пытаемся дать объяснение полудюжине повседневных, но трудно объяснимых явлений, в терминах электростатического притяжения и отталкивания.

12.1. ОТТАЛКИВАНИЕ ПРОТОНОВ СНИЖАЕТ ТРЕНИЕ

Потрите одну ровную поверхность о другую. Вы ощутите заметное сопротивление, возникающее из-за неровностей – микроскопических выступов на визуальной гладкой поверхности. Выступы цепляются друг за друга, создавая трение (рис. 12.1).

Возьмем, например, всем знакомую наждачную бумагу. Если сложить два листа наждачной бумаги лицевыми сторонами, вы получите пример ситуации, изображенной на рис. 12.1. Песчинки на поверхности листов цепляются друг за друга, поэтому у такой пары высокий коэффициент трения. Однако наждачная бумага в контакте с гладкой древесиной имеет более низкий коэффициент трения; у влажного мыла в контакте с кожей коэффициент трения еще ниже.

Глядя на рис. 12.1, вы можете предложить простой способ уменьшить трение: раздвинуть соответствующие поверхности, чтобы пики не сталкивались друг с другом. Например, предположим, что соприкасающиеся поверхности изготовлены из гидрофильных полимеров. Поскольку нити полимера могут выступать с обеих поверхностей, как щетина щетки, коэффициент трения будет значительным; пряди обязательно будут цепляться друг за друга. Однако если между этими полимерными поверхностями окажется вода, они будут покрыты исключительными зонами, которые раздвигают поверхности. Возникающий при этом зазор способствует снижению трения.

История полимера и воды на этом не заканчивается. Каждая отрицательно заряженная исключительная зона будет вырабатывать ионы гидроксония (рис. 12.2). Эти ионы отталкиваются друг от друга, создавая силу, способную раздвигать соответствующие поверхности. Если позаботиться о том, чтобы ионы гидроксония не покидали зазор, то неровности могут полностью перестать цепляться друг за друга; в таком случае коэффициент трения станет исчезающе малым.

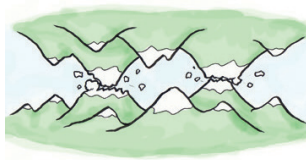


Рис. 12.1. Аналогия трения. Когда верхний «горный хребет» цепляется за нижний, механическое сопротивление создает трение

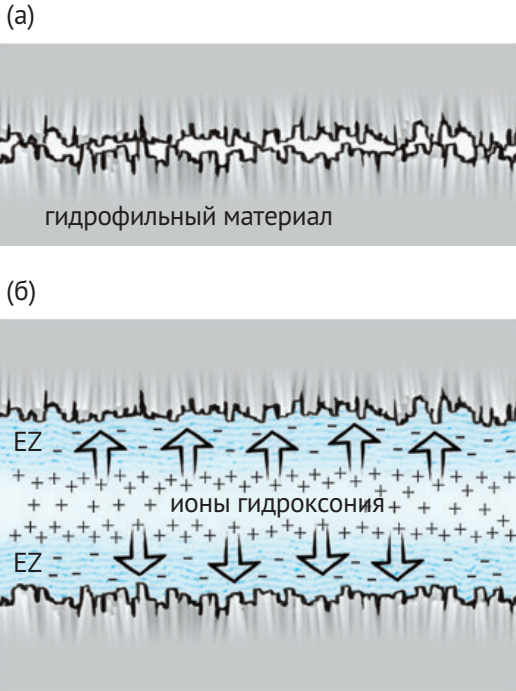


Рис. 12.2. Вода и трение: (а) гидрофильные поверхности могут иметь неровности, вызывающие трение; (б) когда между ними находится вода, поверхности раздвигаются за счет электростатического отталкивания между ионами гидроксония

Эти положительные заряды в совокупности действуют как подшипники с низким коэффициентом трения. Они препятствуют взаимодействию соответствующих поверхностей друг с другом, так же как силы магнитного отталкивания не дают шанхайскому магнитному поезду царапать рельсы вниз. Силы отталкивания здесь возникают из-за падающей лучистой энергии: до тех пор, пока она поддерживает исключаящую зону и разделение зарядов, ионы гидроксония будут заполнять зазор, и трение будет оставаться низким. Следовательно, смазка на водной основе обходится дешевле, чем масло, – практически бесплатно, если вы правильно используете лучистую энергию.

Однако нас подстерегает опасность потерять эти ионы гидроксония. Поскольку ионы гидроксония отталкиваются друг от друга, велика вероятность, что они покинут узкую прослойку. Если улетучится достаточное количество ионов гидроксония, то несколько оставшихся положительных ионов могут склеить отрицательные исключаящие зоны вместе, образуя кристаллическую структуру, простирающуюся от одной поверхности материала до другой. Такая непрерывная структура способна прочно скреплять поверхности между собой.

Этот механизм объясняет слипание стеклянных пластинок. Сложенные в пачку гладкие стеклянные пластинки легко отделяются друг от друга, если они сухие. Однако если между пластинками появляется тонкая прослойка воды, то для их разделения может потребоваться упряжка лошадей (хотя скольжение остается относительно легким). Столь существенное усилие, необходимое для разрыва прослойки, может быть следствием возникновения сплошной исключаяющей зоны, заполняющей зазор между пластинками, и наличия существенной силы (глава 4), удерживающей слои исключаяющей зоны вместе.

С другой стороны, эти пластинки можно было бы легко разделить, если бы достаточному количеству ионов гидроксония удалось застрять на полпути между соответствующими исключаяющими зонами. С конфигурацией стеклянного сэндвича добиться этого нелегко: открытые края позволяют ионам улетучиваться. Следовательно, для поддержания низкого трения необходимо удержать эти ионы гидроксония на месте, и водные системы с низким коэффициентом трения делают именно это.

На самом деле смазка на водной основе – явление далеко не экзотическое; мы встречаем ее на каждом шагу. Например, мокрые бревна скользкие, а мокрые полы более опасны, чем сухие. Водяная смазка была общепринятым средством до появления смазочных материалов на нефтяной основе. Сейчас она возвращается. Поиск в интернете по запросу «водяная смазка» даст множество применений, особенно в пищевой промышленности, где даже незначительное загрязнение продукции машинным маслом абсолютно недопустимо; с другой стороны, небольшая примесь воды в пище не имеет большого значения.

Современные полимеры наглядно демонстрируют эффективность водной смазки. Обычные вещества, скользящие друг о друга, обычно имеют коэффициенты трения порядка 1. Однако коэффициент трения гидратированных поверхностей снижается вплоть до 0,00001 [1]. Гидратация может уменьшить трение в несколько сотен тысяч раз.

Причины необычайной смазывающей способности воды долго оставались невыясненными. Теперь мы можем сделать вывод, что за снижение трения отвечают ионы гидроксония. Отталкиваясь друг от друга,

эти положительные ионы раздвигают неровности, которые обычно препятствуют сдвигу. Следовательно, поверхности могут скользить друг относительно друга практически без трения.

Почему наши суставы не скрипят

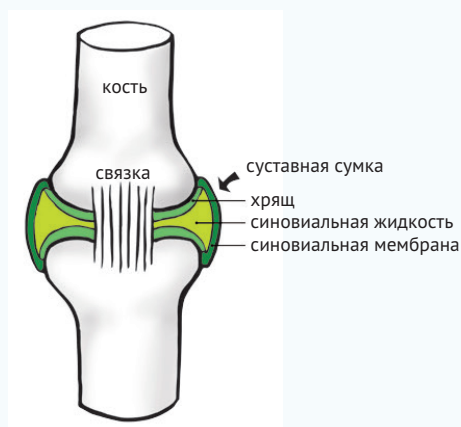
Наши кости давят на суставы с двух сторон. При этом суставы сохраняют способность вращаться, например, при приседаниях и отжиманиях. Может показаться, что вращение под давлением должно вызвать трение, сопровождаемое скрипом, но трение в суставах остается на удивление небольшим. Почему?

Концы костей выстланы хрящом. Эти хрящевые слои действительно испытывают сжатие. Следовательно, проблема трения в суставах сводится к взаимодействию хрящевых поверхностей и расположенной между ними синовиальной жидкости. Как эта система ведет себя под давлением?

Хрящ представляет собой классический гелеподобный материал: сочетание полимеров с высоким электрическим зарядом и воды; иными словами, хрящ – это гель. Поэтому хрящи, как и другие гели, формируют вокруг себя исключаяющие зоны, выделяя большое количество ионов гидроксония в прослойку синовиальной жидкости. Сама жидкость может вносить дополнительные ионы гидроксония за счет исключаяющих зон молекул, находящихся внутри этой жидкости. Таким образом, если две хрящевые поверхности лежат друг напротив друга, между ними будет находиться много ионов гидроксония. Сила взаимного отталкивания ионов гидроксония должна разделять поверхности хрящей – не-

которые ученые утверждают, что эти поверхности никогда не соприкасаются. Это разделение является причиной низкого трения.

Для того чтобы такой механизм отталкивания действительно работал, должно присутствовать какое-то встроенное ограничение, удерживающее ионы гидроксония на месте; в противном случае потеря заряда нарушит смазку. Природа обеспечивает эту страховочную сетку: суставная капсула окружает сустав. Ограничивая рассеивание ионов гидроксония, эта инкапсуляция поддерживает низкое трение. Вот почему ваши суставы обычно не скрипят.



Обволакивая сустав, суставная сумка предотвращает рассеивание ионов гидроксония, насыщающих жидкость. Высокая концентрация ионов гидроксония обеспечивает низкое трение.



Рис. 12.3. Раскалывание камней при помощи увлажнения древесины

12.2. РАЗДЕЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Это «протонное отталкивание» может не только уменьшить трение, но и раздвинуть поверхности, словно клин.

Возьмем, к примеру, пирамиды. Для строительства пирамиды требовались облицовочные блоки, вырезанные из монументальных гранитных плит, которые обычно находят в карьерах. Чтобы отделить блок нужного размера, египтяне использовали хитрый трюк: они вбивали деревянные клинья в трещины, а затем поливали эти клинья водой (рис. 12.3). Египетское солнце щедро дарит лучевую энергию, которая заставляет воду впитываться в древесные капилляры (глава 11). Затем растущие исключаяющие зоны высвобождают протоны. Давления, создаваемого растущими исключаяющими зонами и особенно высвобожденными протонами, очевидно, было достаточно, чтобы расколоть твердую породу.

Если вы сомневаетесь в правдивости этой древнеегипетской истории, подумайте о том, что может случиться, когда грунтовые воды раздувают корни деревьев под городскими тротуарами. Я вспоминаю деревья гинкго, которые мы с соседом посадили, чтобы украсить тротуар перед нашими английскими домами эпохи Тюдоров. Мы с Томом считали деревья украшением улицы. Но сотрудники муниципальной службы Сиэтла думали иначе и приказали немедленно выкорчевать деревья. Они объяснили, что корни гинкго развивают огромное давление, способное взломать тротуар. В детстве я видел, как деревья разрушают бетонные тротуары Бруклина, поэтому не стал спорить с властями – хотя я иногда с тоской думаю о том, какими красивыми могли бы стать эти гинкго, если бы им позволили вырасти.

Другой пример протонного давления можно найти в простом орехе. Орехи – это зародыши растений, которые должны расколоть скорлупу, напитавшись водой. Задача грандиозная: согласно авторитетным статьям по биологии растений [2], чтобы сломать скорлупу грецкого ореха, требуется давление в 600 фунтов на квадратный дюйм – примерно такое же давление оказывают три здоровых парня, прикладывающих свой общий вес на площадку размером с почтовую марку.

Зная о таком давлении, вы легче поверите в правдивость различных легенд: гранитные валуны раскололись от проросших желудей, попавших в трещины;

металлические емкости разорвала изнутри сушеная чечевица, впитавшая влагу из воздуха; корпуса парусных кораблей треснули, когда вода просочилась в их трюмы для перевозки риса. Во всех этих историях вероятными виновниками бед являются докучливые протоны. Пока лучистая энергия вызывает их высвобождение, эти протоны неизбежно будут создавать давление, достигающее поразительных величин.

12.3. ПОЧЕМУ ЛЕД СКОЛЬЗКИЙ

Протоны также могут ответить на вопрос, почему лед скользкий.

Мы привыкли думать, что лед – это твердое вещество. На самом деле на его поверхности лежит тонкая пленка воды. Майкл Фарадей впервые предположил наличие этой пленки в 1842 году, полагая, что вода может объяснить легкое скольжение по льду. С тех пор многие эксперименты подтвердили наличие водяной пленки. Вам будет легче кататься, если ваши коньки скользят по жидкой воде, а не по твердому льду.

Обилие протонов в этом водном слое сделало бы трение еще меньше. Похоже, что протоны там и в самом деле присутствуют: лед, как вы, возможно, помните из главы 4, состоит из слоев исключаяющей зоны, склеенных протонами. Следовательно, растаявший лед должен содержать исключаяющую зону и протоны; наличие структур исключаяющей зоны в талой воде подтверждено исследованиями [3]. Следовательно, должны присутствовать и протоны. Эти протоны должны уменьшать трение (рис. 12.4).

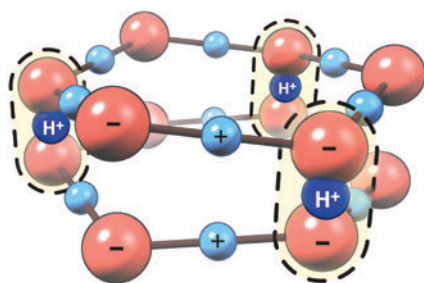
Однако это еще не вся история – и даже не основная история. Значительная часть дополнительных протонов возникает под давлением лезвий коньков. Весь вес фигуриста опирается на два узких лезвия, а чаще всего на одно. Это создает удельное давление, эквивалентное тому, как если бы вы стояли на полу с несколькими слонами на ваших плечах.

Под действием экстремального давления межплоскостные протоны могут покинуть лед (рис. 12.5а, б). Затем эти протоны окажутся на поверхности льда, оставляя под собой лед, свободный от протонов. (Этот лед без протонов практически не отличается от исключаяющей зоны; рис. 12.5в.) Чем выше давление, тем больше количество вытесненных протонов – полезное свойство, если вы хотите сохранить скольжение, как бы сильно вы ни давили.



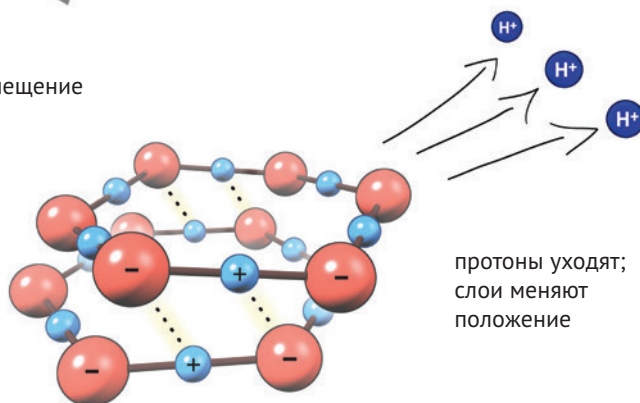
Рис. 12.4. Протоны отделяют лезвие конька от твердого льда. Отталкивающий заряд обеспечивает низкое трение

(а) Лед



начальное расположение
протонов (H⁺)

(б) Смещение



протоны уходят;
слои меняют
положение

(в) EZ-вода

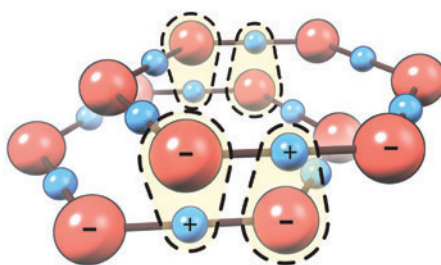


Рис. 12.5. Эффект давления на лед. Давление выдавливает протоны, которые превращают лед в воду исключяющей зоны

С другой стороны, если эти поверхностные протоны улетучиваются из-за испарения, указанная скользкость может исчезнуть вместе с протонами. Представьте себе кубик льда, который некоторое время находился на сухом воздухе. Если схватить этот кубик, он прилипнет к пальцам. Если протоны улетучились, то на поверхности льда останется только отрицательно заряженная исключаящая зона; этот отрицательный заряд вызовет одинаковый по величине и противоположный по знаку заряд на любой соседней поверхности – например, на ваших пальцах. Поэтому пальцы прилипают ко льду. Кроме того, если вода в вашей коже продолжит замерзать, тогда вы и лед будете прочно связаны – как ребенок, который осмелился на морозе прикоснуться языком к фонарному столбу (рис. 12.6).

Этот эффект прилипания напомнил мне историю, рассказанную молодой парой незнакомых друг с другом людей из Сиэтла, которые отправились на пикник. Они запланировали зимнюю поездку в близлежащие Каскадные горы, чтобы выпить в непринужденной обстановке в дружеской компании лыжников. Все прошло хорошо, но дорога домой заняла больше времени, чем предполагалось, и выпитая жидкость заявила о себе вполне естественными позывами. Когда зов природы стал нестерпимым, джентльмену ничего не оставалось, как свернуть на обочину дороги, чтобы позволить своей новой подруге сделать то, что должно. Он галантно отвел глаза, когда она спустила брюки, оперлась на холодную машину и принялась за дело. Это было долгожданное облегчение – пока она не сообразила, что ее задняя часть примерзла к боку машины.

Если эта история вызвала у вас усмешку, вы по достоинству оцените ее финал. Бедная девушка, очевидно, не могла просто остаться ночевать на обочине. Чтобы освободиться от неприличного рабства, ей требовалось быстро растопить лед, а для этого, в свою очередь, нужна была теплая жидкость. Догадываетесь, откуда ее спутник взял эту теплую жидкость?

Дело в том, что ледяные поверхности склонны к крайностям: они или очень липкие, или очень скользкие. Различие заключается в поверхностных протонах: их отсутствие позволяет веществам прилипать из-за электростатической адгезии; их присутствие создает силу отталкивания, которая раздвигает поверхности и обеспечивает сверхнизкое трение, позволяющее конькам практически летать по льду.

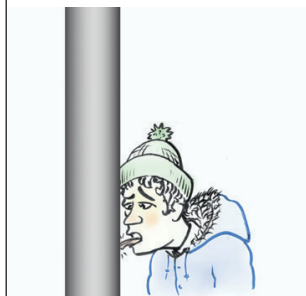
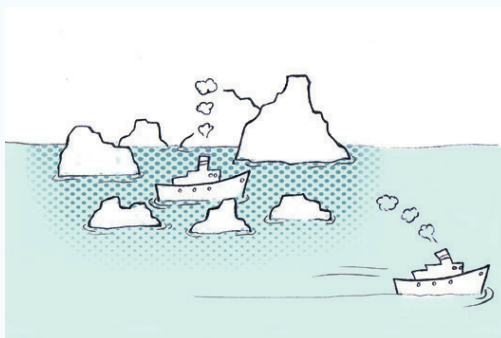


Рис. 12.6. Печальный результат эксперимента на морозе

Еще больше опасностей айсбергов

Суда, проходящие через окрестности тающих айсбергов, иногда теряют способность быстро двигаться. В некоторых случаях кораблям даже приходится остановиться [w1]. Такое сопротивление не обязательно исходит от столкновений, наподобие тех, что испытал Титаник. Скорее всего, свежая талая вода остается густой и вязкой. Вероятно, такая высокая вязкость может быть результатом огромных концентраций воды исключаяющей зоны, поступающей из только что растаявшего льда. Суда, проходящие через эту среду, могут испытывать повышенное сопротивление при движении.



12.4. КАК РАБОТАЮТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ БАТАРЕИ

Давайте перейдем от низменной функции мочеиспускания к более возвышенным сферам энергетики, в частности к электрическим батареям. Батареи вырабатывают электрическую энергию. Современные батареи работают просто потрясающе, и все же скромная картофельная батарея может выполнять почти ту же работу, хотя и менее эффективно: просто воткните два разных металлических электрода в большую картофелину (или в две поменьше), и вуаля! – энергии достаточно для питания цифровых часов (рис. 12.7).

Вас может удивить, что такие примитивные конструкции из подручных материалов способны на многое из того, что делают современные высокотехнологичные батареи. Конечно, простейшие устройства вырабатывают гораздо меньше энергии и намного менее долговечны. Тем не менее они генерируют энергию, используя аналогичные компоненты: разные электроды, один из которых является металлом с высокой реакционной способностью, например цинком.

Даже в первой батарее Вольты применялись такие же материалы. Батарея Вольты, построенная более двух веков назад, состояла из цинковых и медных дисков (позже из цинка и серебра), отделенных друг от

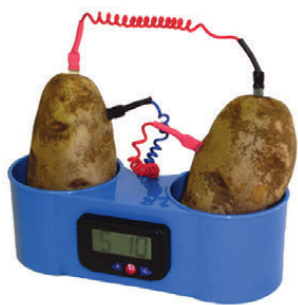


Рис. 12.7. Картофельная батарея. Помидоры работают так же хорошо, а если для овощей не сезон, то можно обойтись соленой водой

друга пропитанными соленым раствором прокладками из картона или ткани. Затем металлические пары складывали в стопку, которая получила название гальванической батареи, или вольтова столба (рис. 12.8).

Таким образом, у всех батарей, начиная от оригинального устройства Вольты и заканчивая картофельной батареей и современными щелочными батареями, есть много общего. Один электрод изготовлен из цинка или другого химически активного металла, а другой – из менее химически активного вещества. Между электродами находится содержащая ионы среда, которая может проводить электрический ток. Широко распространено мнение, что выработка энергии осуществляется за счет электрохимических реакций, происходящих на границах раздела металлов. Эти реакции якобы «проталкивают» заряды через содержащую ионы среду на клеммы, обеспечивая извлечение энергии из батареи.

Хотя на границе раздела сред, безусловно, происходят реакции, явления, рассмотренные ранее в этой книге, могут кое-что сказать нам о природе этих реакций. Мы неоднократно наблюдали, как поглощенная электромагнитная энергия разделяет заряды через механизм исключаяющей зоны. Батареи тоже разделяют заряд. Возникает закономерный вопрос: не лежит ли в основе разделения зарядов батареями уже известное нам разделение зарядов, имеющее отношение к исключаяющим зонам?

Этот вопрос приобрел важность, когда стало ясно, сколько энергии выдают обычные батареи. Возьмем, например, щелочную батарею. Эти батареи применялись в той или иной форме с тех пор, как Томас Эдисон изобрел их более века назад. Современная щелочная батарея типа AA в течение срока службы может обеспечивать ток до 1 мА в продолжение 1400 часов. Производство тока и времени дает 5000 кулонов; то есть батарея AA может обеспечить 5000 кулонов заряда. Обычная молния выпускает на волю 15 кулонов. Таким образом, миниатюрная батарейка типа AA теоретически содержит достаточно внутренней энергии, чтобы осуществить более 300 ударов молнии.

Может ли такой крохотный химический источник вместить в себя столько энергии? Возможно. Но часть этой энергии может поступать откуда-то еще – то есть через механизмы поглощения электромагнитной энергии, описанные ранее. Продукты реакции могут быть такими же, как и принято думать; но энергия,

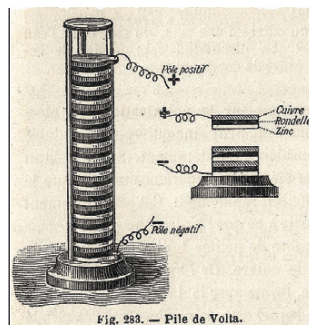
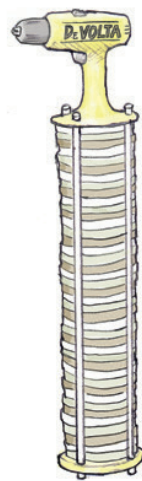


Рис. 12.8. Оригинальная батарея, разработанная Вольтой



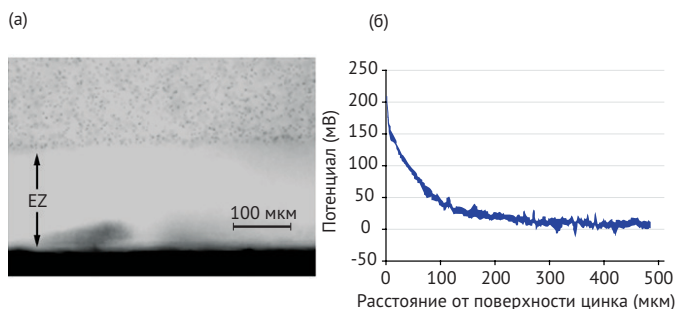
Таким мог бы быть первый беспроводной шуруповерт



Рис. 12.9. Свойства поверхности цинка [4]: (а) исключаящая зона, обнаруженная рядом с цинком; (б) электрический потенциал в пределах исключаяющей зоны

приводящая в движение эти реакции, будет исходить от поглощенной извне электромагнитной энергии. Видимый свет не может проходить через корпус батареи; однако это делает инфракрасное излучение. Инфракрасная энергия, поглощаемая корпусом, повторно излучается в рабочую часть батареи, и возникает вопрос, не вносит ли такая энергия свой вклад в выдающуюся выходную мощность батареи.

Чтобы узнать, появляются ли EZ-подобные области рядом с упомянутыми химически активными металлами, мы поместили кусок цинка в воду. Благодаря добавлению микросфер мы сразу же увидели большие исключаяющие зоны, формирующиеся на поверхности цинка (рис. 12.9а). Они выросли примерно до 200 мкм. Другие химически активные металлы показали аналогичный эффект. Вполне правдоподобно выглядело предположение, что одинаковые для многих батарей химически активные металлические поверхности могут разделять заряды почти так же, как и другие источники исключаяющих зон.



Мы удостоверились, действительно ли происходит разделение зарядов. Используя ту же самую установку с микроэлектродом, что и в предыдущих опытах, мы нашли сущий клад – обнаружили, что исключаяющие зоны действительно обладают зарядом. Исключаяющие зоны рядом с химически активными металлами были заряжены положительно (рис. 12.9б); pH-чувствительные красители подтвердили, что вода за пределами этих зон содержала свободные отрицательные заряды, предположительно в форме OH^- -групп [4].

Следовательно, рядом с поверхностями химически активных металлов происходило разделение зарядов, хотя полярность была менее распространенной. Нам удалось получить из этих разделенных зарядов значительные токи [5], в основном аналогичные токам, потребляемым из других EZ-систем. Этот результат

можно считать решающим: поскольку в батареях используются химически активные металлы и поскольку такие металлы демонстрируют разделение заряда на основе исключаяющих зон, данный результат подразумевает, что по крайней мере *часть* энергии батареи может поступать от внешнего источника.

Возник очевидный вопрос: *сколько* энергии поступает извне? Мы привыкли думать, что современные батареи хранят в упакованном виде внутри себя всю энергию, которую способны выдать, – замкнутое хранилище химической энергии. Учитывая феноменальную энергоемкость батарей, возникает вопрос, может ли это быть правдой. Батареи, безусловно, поглощают электромагнитную энергию, но используют ли они этот подарок или отвергают его? Вероятно, крохотная химическая фабрика, которую мы называем батареей, может производить свою электрическую энергию, используя по крайней мере часть поступающей извне электромагнитной энергии (рис. 12.10).

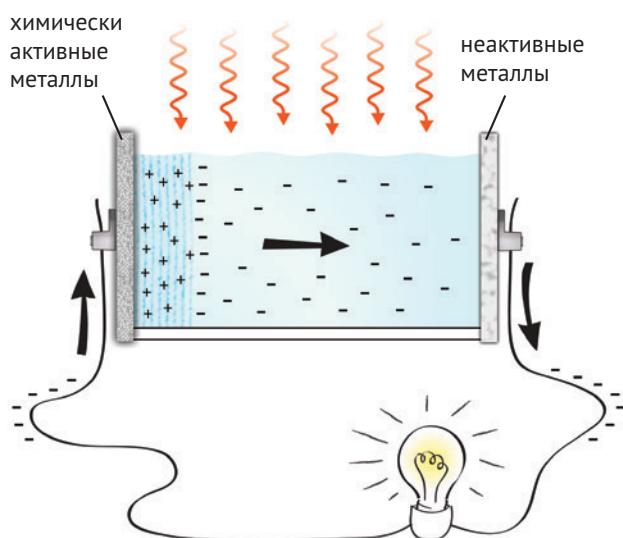


Рис. 12.10. Возможное производство электроэнергии на базе исключаяющей зоны в стандартных батареях. Поглощенная электромагнитная энергия разделяет заряды и тем самым способствует возникновению электрического тока

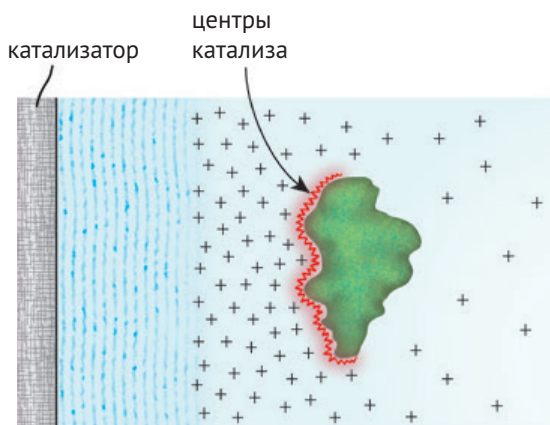
12.5. ПРОТОННАЯ ПРИРОДА КАТАЛИЗА

Катализ – это на первый взгляд загадочный процесс, ускоряющий химические реакции – иногда в миллионы раз. Катализатор не расходуется; он остается нетронутым и снова и снова совершает свои чудесные подвиги.

Среди катализаторов наиболее распространены так называемые кислотные катализаторы; они ускоряют

Рис. 12.11. Механизм катализа на основе исключяющей зоны. Поверхность катализатора вызывает рост исключяющей зоны, что приводит к высвобождению протонов (или OH^-). Протоны (или группы OH^-) ускоряют целевую реакцию

реакции, мобилизуя протоны. Другие катализаторы ускоряют реакции за счет мобилизации OH^- -групп. Мне было интересно, могут ли исключяющие зоны служить источниками этих групп зарядов (рис. 12.11). Исключяющие зоны обычно производят свободный H^+ и, реже, свободные OH^- . Таким образом, гидрофильные поверхности должны быть естественными катализаторами. Поверхности, у которых самый высокий заряд, должны обладать наиболее выраженными каталитическими свойствами. Мощная каталитическая активность нафiona соответствовала этим ожиданиям.



Катализ на основе исключяющей зоны не бывает бесплатным. Лучистая энергия создает исключяющие зоны, которые, в свою очередь, генерируют необходимые группы зарядов. Разумеется, такой механизм катализа потенциально полезен, но за это нужно платить энергией.

Если падающая лучистая энергия в конечном итоге вызывает каталитический эффект, то можно предположить, что свет является движущей силой по крайней мере некоторых каталитических процессов. Это действительно так. Хорошо известный пример – диоксид титана, который демонстрирует впечатляющее повышение каталитической активности при воздействии УФ-излучения.

Чтобы проверить, связано ли это свойство с исключяющей зоной, мы исследовали погруженные в воду пластины диоксида титана. При отсутствии падающего света (сверх скромного количества, используемого для наблюдения) исключяющая зона также отсутствовала; однако когда пластину предварительно облучали ультрафиолетом, при последующем погружении возника-

ли зоны исключения, которые выросли примерно до 200 мкм. Используя pH-чувствительные красители, мы подтвердили присутствие многочисленных протонов в воде за пределами исключавшей зоны. Таким образом, порожденные исключавшей зоной протоны были готовы к выполнению своей каталитической миссии. В конечном итоге эти каталитические протоны появлялись под действием падающего света.

Как завести автомобиль холодным зимним утром?

Нынче на улице особенно холодно. Из-за холода масло в двигателе вашего автомобиля имеет консистенцию арахисового масла. Двигатель борется с этим вязким комком, когда вы начинаете проворачивать стартер, но безуспешно. Машина не заводится. Попытка продолжить запуск только разряжает аккумулятор, и вскоре он перестает работать. Пора сдаться и вызвать эвакуатор.

Простая смена стратегии поможет вам избежать разочарования. Если вы перестанете заводить двигатель и терпеливо подождете, прежде чем повторить попытку, двигатель может быстро завестись, и вы поедете по своим делам. Кажется, что простое ожидание волшебным образом подзаряжает вашу батарею.

Почему ожидание имеет такое значение? Автомобильные аккумуляторы содержат воду и кислоту – комбинация, которая создает исключавшие зоны (рис. 10.9). Если энергия исключавшей зоны вносит свой вклад в энергию аккумулятора, то получение энергии от аккумулятора требует поддержания заряда исключавшей зоны.



Упомянутый заряд можно восстановить как минимум двумя способами: от переносного зарядного устройства эвакуатора или поглощением лучистой энергии, исходящей от слегка подогретого двигателя. Последний подход требует времени. Вот почему ожидание может пойти на пользу.

С исключавшими зонами, заряженными от поглощения лучистой энергии, и с арахисовым маслом, размягченным после предыдущей попытки запуска, ваш автомобиль наконец может завестись. Терпение вознаграждается; вдобавок можно сэкономить на эвакуаторе.

Платина, еще один распространенный катализатор, изначально не образовывала заметные исключавшие зоны, хотя нам удалось найти некоторые приповерхностные зоны с пониженной концентрацией микросфер [4]. Последующие исследования показали

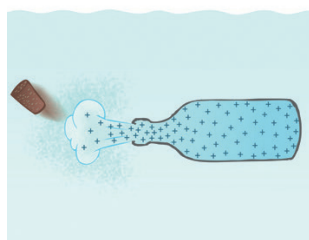


Рис. 12.12. Концентрированные ионы создают давление, которое может высвободиться, порождая поток.

светозависимые изменения в воде у поверхности платины [6], а также выраженные исключаяющие зоны, когда платина была электрически соединена с химически активным металлом [5]. Следовательно, заряды исключаяющей зоны влияют на каталитическую активность платины, хотя это предположение требует дальнейшего изучения.

Катализаторы также присутствуют в биологических системах в виде ферментов. Ферменты – это большие белки, которые ускоряют биологические реакции. Предполагается, что каталитический механизм основан на специфических для ферментов взаимодействиях с молекулами реагентов. Однако до начала XX века преобладала другая точка зрения: предполагалось, что ферменты вызывают изменения в окружающей воде, которые затем ускоряют реакции между оказавшимися поблизости молекулами. Поверхности ферментов обычно несут значительный отрицательный заряд (как и большинство поверхностей белков); следовательно, эти поверхности обволакивают слои исключаяющей зоны. Если это так, то механизм катализа в биологических системах может быть похож на механизм общего катализа, с учетом немного более высоких концентраций протонов, вырабатываемых исключаяющими зонами.

12.6. ПРОТОНЫ ПИТАЮТ ЭНЕРГИЕЙ ПОТОК ЖИДКОСТИ

Наконец, давайте подумаем о том, как эти универсальные протоны могут привести в движение жидкость.

Представьте себе закупоренную бутылку с водой, погруженную в большую ванну (рис. 12.12). Продолжая мысленный эксперимент, представьте, что у вас есть способ ввести протоны в закупоренную бутылку. Ионы будут отталкиваться друг от друга, создавая внутри давление. Если затем вынуть пробку, эти стесненные ионы гидроксония моментально вырвутся наружу – как воздух из надутого воздушного шара. Протонированная вода хлынет наружу, создавая интенсивный поток. Именно о таком потоке я и говорю.

Такой поток мог бы существовать бесконечно, если бы запасы протонов и воды непрерывно пополнялись. Если в деле участвует исключаяющая зона, то запас протонов пополняется естественным образом, поскольку протоны вырабатываются непрерывно до тех пор, пока хватает энергии окружающей среды для их

высвобождения. Протоны немедленно образуют ионы гидроксония. Эти заряженные молекулы воды затем перемещаются в области с более низким зарядом. Следовательно, устойчивый поток воды неизбежен практически в любой системе, где присутствуют исключаящие зоны и лучистая энергия.

Эксперименты подтвердили данный вывод: мы наблюдали устойчивые потоки воды в системах с исключаящими зонами и разными физическими конфигурациями объектов. Вы уже читали о некоторых из них (глава 7), но стоит сделать общий обзор.

- Первая конфигурация – это гидрофильная трубка (рис. 12.13), внутри которой образуется EZ-кольцо, выделяющее протоны в сердцевину трубки; эти протоны образуют градиент ионов гидроксония между серединой и отверстиями трубки, который, по-видимому, заставляет поток двигаться в ту или иную сторону.

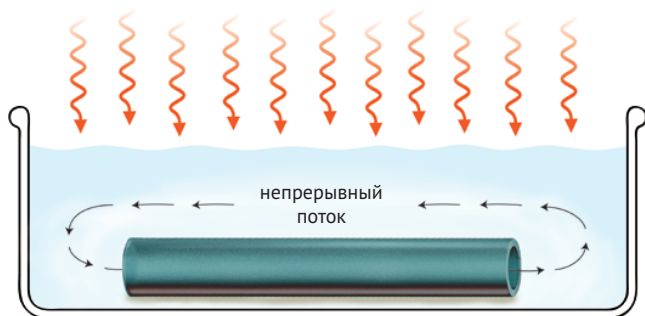
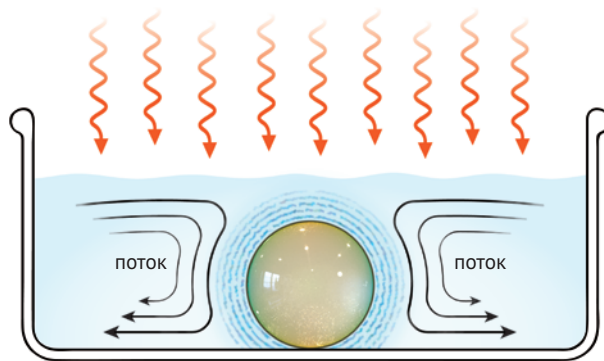


Рис. 12.13. «Самопроизвольное» движение воды через гидрофильные трубки

- Вторая конфигурация похожа на первую, но отверстие проделано в стенке трубки. Если в боковой стенке погруженной в воду гидрофильной трубки имеется небольшое отверстие, вода постоянно затекает через него внутрь (рис. 7.11). Похоже, что и в этом случае за движение потока отвечают градиенты концентрации ионов гидроксония [7].
- К третьей конфигурации, демонстрирующей обусловленные зарядами потоки жидкости, относятся гелевые шарики (рис. 7.12). Лежащий на дне емкости с водой гидрофильный шарик покрывается оболочкой исключаяющей зоны. За ее пределами находятся ионы гидроксония. Эти ионы гидроксония непрерывно движутся вниз, как показано на рис. 12.14. Движущей силой, по-видимому, является вертикальный гра-

диент ионов гидроксония, который может возникнуть из-за того, что верхняя часть суспензии получает больше лучистой энергии, чем нижняя. Нисходящий поток со всех сторон притягивает к шарiku воду верхнего слоя, замещая молекулы, потерянные при движении потока вниз. Как только нисходящие молекулы достигают дна, у них нет другого выбора, кроме как уйти от шарика. Таким образом вода циркулирует за счет вертикального градиента концентрации ионов гидроксония.

Рис. 12.14. Устойчивые потоки вокруг гидрофильного шарика



Итак, зарядовые потоки возникают при различных физических конфигурациях поверхности. Достаточно практически любой гидрофильной поверхности, погруженной в воду. В результате формирования исключительной зоны выделяются протоны; при этом неизбежно возникает градиент концентрации ионов гидроксония, который столь же неизбежно приводит к возникновению потока.

Фактически некоторые из потоков, которые ученые интуитивно приписывают градиентам плотности по причине разности температур, могут легко возникнуть из-за градиентов заряда. Электростатические силы *намного, намного* больше, чем силы, основанные на гравитации. Чтобы ощутить разницу, представьте себе протон и электрон, расположенные рядом друг с другом. Как вы думаете, какая сила преобладает во взаимодействии этих частиц: электростатическое притяжение или гравитационное притяжение масс? Конечно, вы ответите, что доминирует электростатическая сила, но вряд ли вы подозреваете, что она в 10^{38} раз больше, чем сила гравитации. Такие взаимодействия между зарядами могут играть ключевую роль в физике. Как мы только что видели (и еще раз увидим, когда будем

иметь дело с теплой водой в главе 15), небольшие градиенты заряда могут создавать большие потоки.

Поскольку все эти потоки приводятся в движение зарядом, вы можете считать их осмотическими (глава 11). Градиенты концентрации ионов гидроксония представляют собой мощную и универсальную движущую силу природы.

12.7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И РАЗМЫШЛЕНИЯ

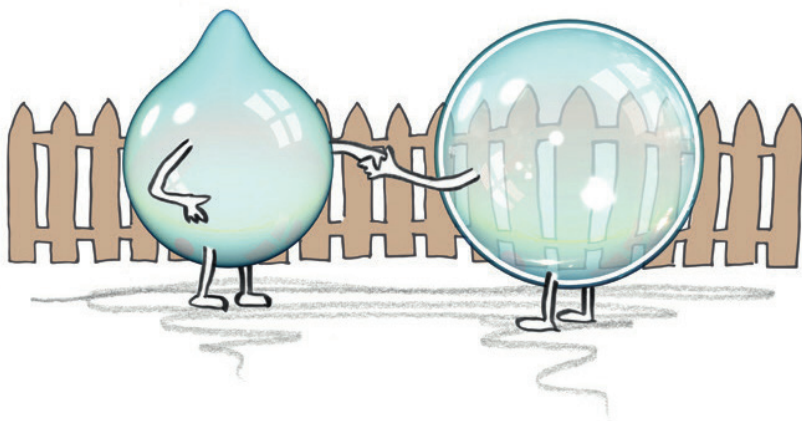
В этой главе основное внимание уделено протонированной воде – положительно заряженным молекулам воды, которые неизбежно возникают из-за наличия исключаяющих зон. Эти заряженные молекулы способны на многое. В их послужной список входит уменьшение трения, расклинивание поверхностей, скольжение по льду, электрические батареи, усиление катализа и потоки жидкости. У нас есть хорошие примеры того, что все эти процессы возникают, по крайней мере отчасти, из-за разделения зарядов, возникающего при строительстве исключаяющей зоны.

Я призываю вас сопоставить эту точку зрения с преобладающими взглядами на происхождение каждого из упомянутых явлений. Студенты, входящие в мою лабораторию, неизменно стремятся проверить догмы, чтобы ознакомиться с территорией, на которой они оказались. Многие из них уходят обратно сбитыми с толку сложностями интерпретации увиденного и чувствуют себя бесталанными из-за своей неспособности понять то, что, по их мнению, с легкостью понимают другие. Возможно, вам это удастся лучше, чем этим несчастным студентам.

Основная идея данной главы заключается в том, что все упомянутые явления могут возникать как прямое следствие формирования исключаяющей зоны. Каждым из этих явлений движет лучистая энергия. Растения, безусловно, используют лучистую энергию, но идея о том, что и другие водные системы могут использовать лучистую энергию схожим способом, осталась за рамками современного мышления, и я считаю, что эта узость взглядов объясняет, почему многие исследования не принесли осязаемых результатов. Поскольку исключаяющие зоны существуют, наша задача – оценить их влияние. Именно это мы пытались сделать.

Заряды исключаяющей зоны определяли ход нашей мысли во многих главах, но мы еще не закончили. Далее идут пузырьки и капельки. Вы не раз видели

пузырьки, возникающие в кипящей воде, но задумывались ли вы когда-нибудь о том, как они образуются? В следующих двух главах мы обсудим этот вопрос и покажем, что заряды, порождаемые исключаящими зонами, снова играют центральную роль. Пузырьки выглядят загадочными, почти романтическими объектами; если в следующих главах мне доведется развеять эту романтику, я заранее приношу свои извинения.



Глава 13

Капельки и пузырьки – братья и сестры в водной семье

Большинство пассажиров спали. Во время трансатлантического перелета я был, как обычно, занят своим ноутбуком, пока бортпроводники ходили по салону, старательно наполняя все стаканы водой. Обслуживающий персонал, похоже, спасал нас от обезвоживания. Я каждый раз кивал в знак признательности, делал несколько глотков и, наконец, блаженно погрузился в страну грез.

Проснувшись через несколько часов, я заметил, что мой до половины заполненный пластиковый стаканчик стал выглядеть иначе – за внутренние стенки цеплялись пузырьки (рис. 13.1). Я задумался о том, как эти пузырьки там оказались.

Конечно, пока я спал, в воде должно было раствориться много воздуха; этого растворенного воздуха должно было хватить для образования пузырьков. Правильно?

Это объяснение казалось адекватным, пока я не продолжил рассуждать: пузырьки, которые я видел, были миллиметрового размера, в то время как размер молекул газа, заполняющих пузырьки, измеряется в нанометрах. Чтобы создать пузырек, объем которого в 10^{18} раз больше, чем составляющие его молекулы газа, вам понадобятся эти молекулы в огромном количестве. Возникают очевидные вопросы: что направляет эти многочисленные молекулы газа именно к растущим пузырькам, а не в области между ними? Почему возникают несколько изолированных пузырьков вместо, скажем, одного огромного пузыря?

Сбитый с толку и все еще полусонный, я начал фантазировать. Я представил, что уменьшился до размеров протона, и огляделся по сторонам. Мне не составило труда вообразить молекулы растворенного газа вокруг меня; но мне было трудно представить, что могло бы направить эти молекулы преимущественно к растущему пузырьку поблизости. И если одна из этих газовых молекул смогла каким-то образом приблизиться к же-



Рис. 13.1. Пузырьки со временем собираются на стенках пластиковых стаканчиков с водой

ланному пузырьку поблизости, как она могла проникнуть через натянутую границу раздела вода–газ, чтобы попасть внутрь? Разве это не разрушит пузырь?

Продолжая подводную одиссею, я взглянул вверх, прямо над поверхностью воды. Там я увидел, как к стенке стакана прилипли другие пузырьки. Я тут же сказал себе, что, вероятно, это ошибка: над поверхностью воды за стенки стакана обычно цепляются капельки, а не пузырьки. Иногда они могут выглядеть ужасно похожими снаружи; но пузырьки наполнены газом, а капельки – жидкостью. Как я могу понять, что я вижу?

Вынырнув из мира фантазий, я понял, что ни у кого нет простых ответов на эти вопросы. Даже Эйнштейн, известный своими «мысленными экспериментами», возможно, зашел бы в тупик.

Что касается последнего вопроса о том, как отличить пузырек от капельки, по крайней мере, можно подумать, что ключ к разгадке находится в местоположении: пузырьки могут существовать под водой, а капли – нет. Как могут капельки существовать в толще воды?

Как это ни парадоксально, в воде действительно могут существовать капельки, и сейчас я приведу доказательства. Эти подводные капельки сыграют ключевую роль. Их свойства укажут путь к ответу даже на самый неприятный из перечисленных выше вопросов: как растущий пузырек наполняется газом?

13.1. Пузырьки и капельки:

БРАТЯ И СЕСТРЫ В СЕМЕЙСТВЕ ВЕЗИКУЛ

Все началось с еженедельных совещаний в лаборатории. Один сотрудник лаборатории все время ошибался: он так часто говорил «капелька», когда имел в виду пузырек (и «пузырек», если имел в виду капельку), что его ошибка стала привычным поводом для шуток: как отличить пузырек от капельки?

Путаница впервые возникла, когда мы рассматривали «пузырьки», которые часто образуются под водой на границе раздела нафийон–вода. Мы нередко наблюдали за их возникновением в ходе эксперимента. Поскольку это происходило под водой, мы интуитивно предположили, что появляются именно пузырьки.

Однако мы обнаружили, что эти предполагаемые пузырьки больше походили на капельки. При проникновении в них острого зонда чаще всего ничего не происходило. Проколы мгновенно разрушают натянутые воздушные пузырьки, но здесь этого не произошло.

Кроме того, на них удивительно слабо влияло очень сильное вытягивание или сжатие – эти многострадальные объекты оказались достаточно устойчивыми, чтобы быстро вернуться к своей приблизительно сферической форме. Эти «пузырьки» вели себя иначе, чем любые пузырьки, которые мы видели раньше.

Для более тщательной проверки мы использовали миниатюрную гильотину (рис. 13.2). Подводную капельку осторожно поместили на вогнутую тефлоновую поверхность, где она охотно заняла свое место. Затем мы разрезали «пузырек» острым ножом. По мере прохождения ножа – насквозь, так что тело было расчленено на две отдельные части, – предполагаемый пузырек возвращался к своему первоначальному состоянию: цельная неповрежденная капелька. Подводная капелька, судя по всему, не боялась обезглавливания.

Эта сущность была совершенно не похожа на обычный пузырек. Прокалывание, растяжение и сжатие давали лишь временный эффект; рассечение гильотиной в итоге ни к чему не приводило. То, что на первый взгляд казалось пузырьком – поскольку находилось под водой, – вело себя больше как липкий, гелеобразный сгусток или какая-то вязкая капля.

Этот неожиданный результат преподавал нам урок: без надлежащей проверки не всегда можно отличить пузырьки от капелек; реальность может оказаться противоположной тому, что вы ожидаете. Мы только что говорили про капельки под водой. Пузырьки, находящиеся на поверхности воды, на поверку тоже могут оказаться капельками – я уже говорил, что капельки воды способны долго оставаться на поверхности, не сливаясь с объемной водой (рис. 1.5). Если вы не знаете заранее, что это устойчивые капельки воды, то, вероятно, подумаете, что это пузырьки, но на самом деле это не так. Также обратите внимание на капельки на рис. 13.3. Так это капельки или пузырьки?

Вероятность путаницы очевидна. Пузырьки напоминают капельки, и наоборот. Можно сказать, что они похожи на членов одной семьи. Из-за их сходства мы начали использовать общий термин – мы называем оба объекта «везикулами». Мы определяем везикулы как сферические образования, внутри которых может находиться жидкость или газ. Позже мы предоставим доказательства того, что жидкость внутри везикул может переходить в газ.

На данный момент остановимся на том, что капельки и пузырьки поразительно похожи друг на друга.

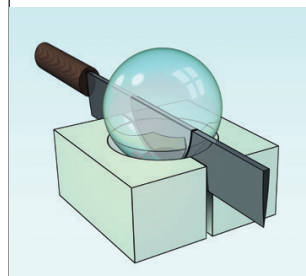


Рис. 13.2. Устройство гильотины для пузырьков. Попытки разрезать подводные «пузырьки» часто оказывались тщетными – они восстанавливали исходную форму



Рис. 13.3. Вода на горячей сковороде

13.2. ЧЕМ ПОХОЖИ ПУЗЫРЬКИ И КАПЕЛЬКИ?

Очевидная общая черта – упругая оболочка. Эта оболочка хорошо видна в пузырьках – например, возникающих при кипячении. Что касается капелек, мы предполагаем существование у них оболочки, потому что почти сферическую форму капли можно объяснить растянутой оболочкой, находящейся под внутренним давлением (рис. 13.4).

В отсутствие растянутой оболочки пузырьки и капли принимали бы неправильную форму, как у амёбы; повсюду выступали бы неровности и шишки. Поэтому ученые принимают наличие какой-либо оболочки как данность. Все пузырьки окружены упругими оболочками.

Менее очевиден источник внутреннего давления. Ученые обычно видят причину в упругой оболочке: они считают, что такая оболочка создает давление внутри пузырька; однако даже стальные оболочки не гарантируют наличия давления внутри. Пока мы не можем однозначно сказать, является ли основным источником внутреннего давления упругость оболочки или объемный материал, заключенный внутри. Источник давления еще предстоит выяснить, и мы сделаем это в ближайшее время.

В любом случае, почти сферическая форма капельки действительно подразумевает наличие какой-то оболочка. Этот вывод кажется достаточно простым. Однако ему противоречит результат использования гильотины: если натянутая оболочка сохраняет форму капельки, то разрушение этой мембраны должно иметь фатальные последствия – капелька должна растечься. Так почему же рассеченная капелька очень быстро восстанавливается?

Правдоподобное объяснение может заключаться в том, что некоторые капельки представляют собой кластеры более мелких капелек (рис. 13.5). Мини-капельки будут группироваться вместе, как пузырьки; впоследствии они могут повторно кластеризоваться после механического разделения. Действительно, подводные капельки иногда выглядели в микроскопе как кластеры, хотя нам еще предстоит получить более детальные изображения, чтобы удостовериться в этом.

Идея кластера получила распространение благодаря высокоскоростной видеозаписи падающих капель дождя. По мере того как падают капли дождя, многие из них распадаются на мириады мини-капелек [w1]. Эти мини-капельки могли впервые образовываться



Рис. 13.4. Форма капельки. Сила внутреннего давления уравнивает силу натяжения оболочки, придавая ей сферическую форму



Рис. 13.5. Рост капелек путем слияния. Несколько мини-капелек могут сливаться, образуя более крупные капельки

при падении, но они также могли существовать заранее, разделяясь при столкновении с препятствием во время их падения. Если это так, то капельки в целом могут напоминать кластер, показанный на рис. 13.5.

В этом контексте устойчивость капельки к рассечению гильотиной выглядит объяснимо. Приложенные силы могут разделить мини-капельки на подгруппы; но затем силы сцепления между их поверхностями могут соединить подгруппы обратно почти так же, как сливаются разделенные пузырьки.

Таким образом, капельки могут вести себя как пузырьки. Пузырьки могут образовывать кластеры; элементы кластера могут сливаться в один большой пузырь. То же самое можно сказать и о каплях: капля может состоять из группы мини-капелек, или же эти мини-капельки могли сливаться в одну массивную каплю. Все эти события слияния связаны со свойствами окружающей их оболочки.

Причина, по которой мы останавливаемся на этом вопросе, состоит в том, что поведение капельки на гильотине выходит за рамки нашего понимания. Мы понятия не имеем, как образуются капельки или пузырьки. Нам нужны идеи. Одну из таких идей мы можем извлечь из наших рассуждений: и пузырьки, и капельки содержат оболочки; если эти оболочки состоят из одного и того же материала, тогда возможен переход от капельки к пузырьку (или наоборот). Другими словами, *пузырьки могут возникать из капелек, жидкое содержимое которых превратилось в пар*. Капельки могут быть прародителями пузырьков.

Чтобы развить это предположение, нам нужно изучить соответствующие доказательства. Сначала мы должны ответить на вопрос, действительно ли эти две везикулярные структуры окружены оболочками. И если да, то из чего могут состоять эти оболочки? Если окажется, что они имеют одинаковый состав, значит, мы нашли хорошую отправную точку для изучения перехода от капельки к пузырьку.

13.2.1. EZ-оболочки вокруг капелек

Первое свидетельство, которое заставило нас серьезно задуматься о наличии оболочек у капелек, было получено в эксперименте с плавающей капелькой (рис. 1.5). Считается, что водяные капельки, падающие на поверхность объемной воды, мгновенно с ней сливаются, но мы заметили, что эти капельки могут сохраняться в течение многих секунд [1]. Что-то явно



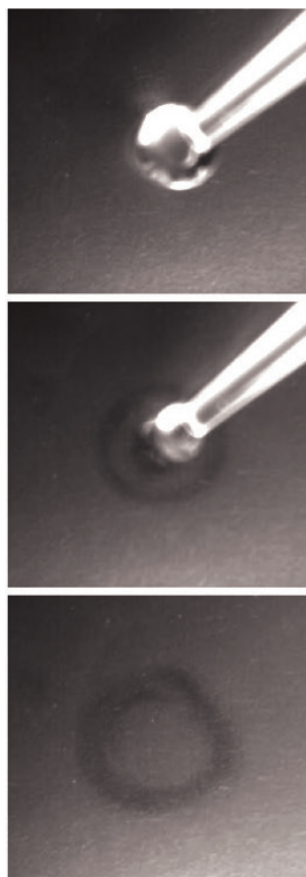


Рис. 13.6. Микроскопическое изображение растворения капельки. Капля воды объемом десять микролитров была выпущена на поверхность воды, содержащей 1 мкм карбоксилатные микросферы. Кольцевая прозрачная зона соответствует EZ-оболочке вокруг капли

замедляет их коллапс, и упругая оболочка казалась нам логичной кандидатурой.

Общепринятым объяснением замедленной коалесценции (слияния) является наличие невидимой воздушной пленки, зажатой между упавшей каплей и поверхностью. Однако мы опровергли это предположение, заметив, что капли могут сохраняться даже после того, как укатятся за пределы предполагаемой подушки из захваченного воздуха. На самом деле укатывание продлевает существование отдельных капель [1]. Очевидно, причиной этого был не захваченный воздух, а что-то иное, и мы посчитали оболочку капельки наиболее вероятным кандидатом. Оболочка должна раствориться, чтобы случилось слияние, а растворение требует времени.

Что касается природы этой оболочки, ответ казался нам достаточно очевидным. Капли содержат только воду. Следовательно, любая внешняя оболочка должна состоять из воды. Двумя очевидными вариантами были объемная вода и EZ-вода; вторая выглядела более естественным кандидатом для объяснения наблюдаемой стойкости.

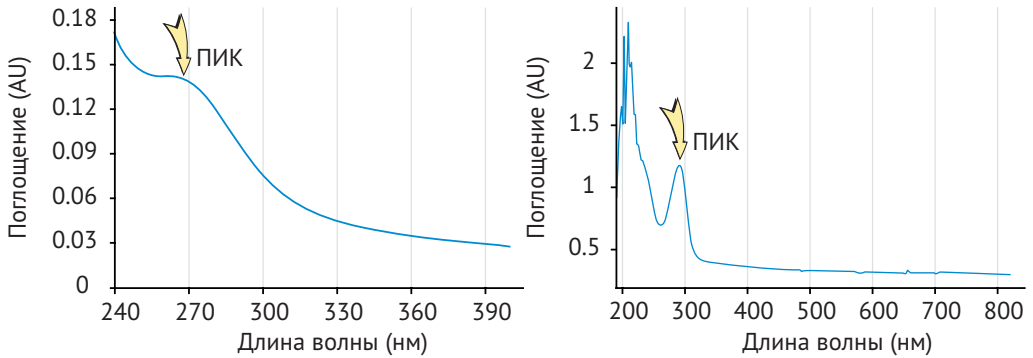
EZ-оболочка также имеет функциональное назначение. Такая оболочка может вырабатывать протоны. Если эти протоны накапливаются внутри капельки, то силы отталкивания могут создавать давление, необходимое для поддержания сферической формы. Это весьма элегантное объяснение. Кроме того, EZ-оболочка имеет и теоретический смысл. Обширные теоретические и экспериментальные исследования привели ученых к заключению, что отрицательно заряженная оболочка подобного рода является минимальным условием для существования капли [2]. EZ-оболочка, безусловно, выполняет это условие.

Исходя из этих подсказок, мы приступили к экспериментальным поискам EZ-оболочки. Мы нашли три подходящих доказательства.

- Первые доказательства были получены в результате экспериментов, проведенных с суспензией микросфер. На поверхность этой мутной суспензии мы выпускали капли воды. Мы рассудили, что EZ-оболочка может вести себя иначе, чем внутренняя часть капли: в то время как вода внутри капли может проходить через брешь в оболочке и непосредственно в мутную суспензию под ней, оболочка капли – нет; EZ-оболочка может остаться на поверхности суспензии. Микроскопический снимок (рис. 13.6) подтвержда-

ет наличие свободной от микросфер области. Прозрачная зона появляется в месте касания капли и расширяется наружу, пока происходит слияние содержимого капли с водой суспензии. Кольцевая форма и прозрачность визуальнo соответствовали остаткам EZ-оболочки.

- Второе свидетельство существования EZ-оболочки – результаты измерения оптического поглощения. Если капли содержат исключаяющие зоны, то они должны демонстрировать характерное EZ-поглощение при длине волны 270 нм. Для измерений мы собирали капли дождя. Мы тестировали образцы дождевой воды на спектрометре UV-VIS. Рисунок 13.7 подтверждает наличие характерного пика поглощения в пробах, отобранных в два разных дня.



- Признаки наличия EZ-оболочки также проявляются в третьем явлении: высыхании капель воды на предметных стеклах. Мой коллега Георг Шрёкер (Georg Schröcker) изучает эти капли в качестве хобби. Высохшие капли воды из разных источников оставляют кольцевидные остатки (рис. 13.8). Обычно центральная часть пуста, а значит, вода оттуда полностью испарилась. Однако центральную зону окружает кольцо неполного испарения; на гидрофильной стеклянной поверхности остается осадок – такого рода осадок могла бы оставить прилипшая EZ-оболочка. Кроме того, этот кольцевидный осадок флуоресцирует в основном сине-фиолетовым светом, почти так же, как флуоресцирует исключаяющая зона [3]. Вдобавок остаток иногда выглядит сло-

Рис. 13.7. Спектры поглощения УФ-излучения каплями дождя, собранными в два разных дня. На характеристических нисходящих кривых виден пик около 270 нм

истым, как исключаящая зона, хотя масштаб больше молекулярного. Следовательно, оболочки высушенных капель в основном имеют те же свойства, что и предполагаемые EZ-оболочки.

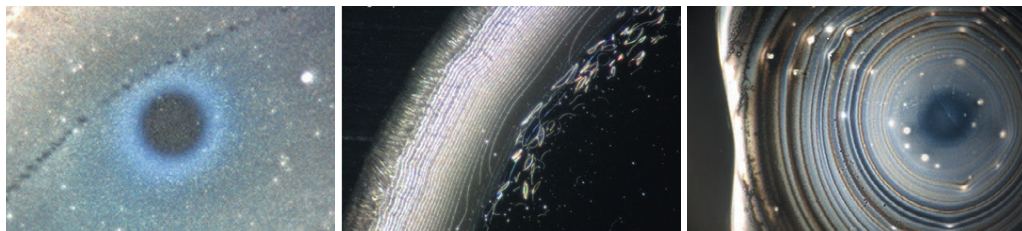


Рис. 13.8. Засохшие капли при темнопольном освещении. Слева – родниковая вода; в середине – гомеопатический препарат; справа – капля росы. Обратите внимание на синий цвет и концентрические наслоения оболочки

Эти результаты полностью соответствуют предположению, что капли обладают EZ-оболочкой. Они не служат его доказательством, но убедительно свидетельствуют в его пользу. Если протоны исключаящей зоны заперты в пределах такой оболочки, то это объясняет сферическую форму капель, поскольку отталкивание протонов создает давление (глава 12).

13.2.2. EZ-оболочки вокруг пузырьков

Затем мы проверили наличие EZ-оболочки у пузырьков. Пузырьки обладают своего рода мембранной оболочкой, которая проявляется как полусферический колпачок при закипании воды. Оставалось неясным, обладают ли стенки этих колпачков свойствами исключаящей зоны.

Для проверки мы снова измерили пик поглощения при 270 нм. Мы медленно нагревали емкости с водой почти до температуры кипения. На дне образовывались маленькие пузырьки, но большинство из них лопалось внутри воды. Спектроскопическое тестирование воды на предмет наличия в остатках лопнувших оболочек компонентов исключаящей зоны подтвердило их присутствие – все образцы показали пик поглощения 270 нм (рис. 13.9).

С другой стороны, образцы, доведенные до полного кипения, так что пузырьки лопались на поверхности, не содержали такого пика (красная кривая на рис. 13.9). Пик не обнаруживается и в воде, не подвергавшейся нагреванию. Следовательно, оболочки пузырьков содержат компоненты исключаящей зоны.

Чтобы подойти к вопросу об EZ-оболочке совершенно с другой стороны, мы исследовали взаимодействия пузырек–пузырек.

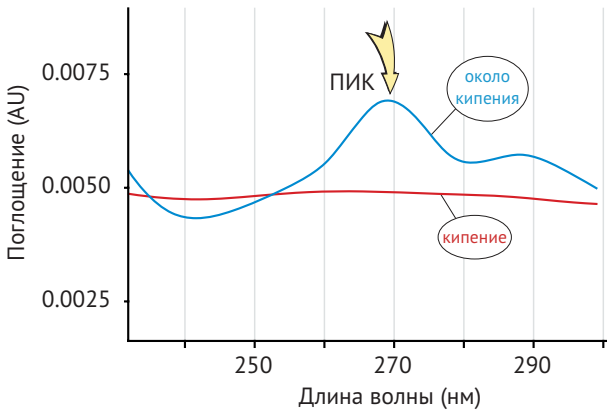


Рис. 13.9. Спектр поглощения воды, предварительно нагретой до температуры чуть ниже кипения и оставленной для охлаждения до 60 °С (синяя кривая). Красная кривая получена аналогично, но сначала вода была нагрета до кипения

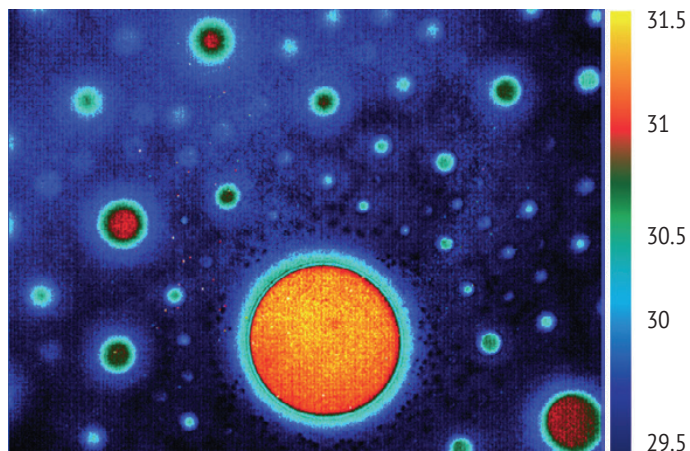
Если пузырьки содержат EZ-оболочки, то взаимодействия пузырек–пузырек должны напоминать взаимодействия капелька–капелька, поскольку те и другие должны содержать EZ-оболочки. Еще в главе 8 мы рассматривали «социальную жизнь» частиц: силы притяжения типа «подобное тянется к подобному» объединяют одноименно заряженные частицы в упорядоченные массивы, а иногда и в кластеры. Мы рассудили, что пузырьки с EZ-оболочкой должны делать то же самое. Пузырьки должны притягиваться друг к другу, упорядочиваться и, возможно, сливаться.

Взаимное притяжение пузырьков обычно наблюдается в только что налитом горячем кофе или горячей воде. Пузырьки имеют тенденцию группироваться, оставляя между кластерами области без пузырьков. Иногда кластеры меньшего размера превращаются в большие. Притяжение пузырьков можно увидеть и под водой. Это явление обычно изучают в высоких водяных столбах, где пузырьки, поднимающиеся со дна, можно отслеживать на больших расстояниях по мере их подъема. Во время всплытия пузырьки взаимно притягиваются, некоторые сливаются в более крупные пузыри. Это явление хорошо изучено, хотя его причина оставалась непонятной [4].

При наличии достаточного времени силы притяжения между пузырьками могут выстроить упорядоченную структуру. Пример такой структуры показан на рис. 13.10. Порядок на этом рисунке несовершенен, по-видимому, из-за различных размеров пузырьков на поверхности. Однако некоторые области с пузырьками одинакового размера имеют регулярный интервал.

В этой структуре агенты, которые подавляют притяжение подобного к подобному, должны подавлять и кластеризацию. Возьмем, к примеру, соль.

Рис. 13.10. Пузырьки на поверхности имеют тенденцию к упорядоченному расположению. Пузырьки создавались прокачкой воздуха через водный раствор мощного средства (TWEEN 20). Шкала в градусах Цельсия



Соль уменьшает размер исключавшей зоны [5], тем самым уменьшая количество разделенных зарядов. Следовательно, соль должна уменьшать притяжение подобного к подобному. Добавление достаточного количества соли должно полностью предотвратить слияние пузырьков – и это подтверждено экспериментально: в присутствии соли маленькие пузырьки, выходящие со дна колбы, больше не сливаются в более крупные пузырьки [6]; они остаются разделенными.

Возможно, наиболее своеобразным ожидаемым поведением EZ-оболочки является ее притяжение к свету: как вы помните, частицы с EZ-оболочкой неуклонно движутся к источнику света (глава 9). Пузырьки ведут себя аналогично. Они движутся навстречу свету как в инфракрасном [7], так и в видимом диапазоне длин волн [8]. Исследователи приписывают это притяжение эффекту «термокапиллярной миграции», хотя до сих пор не установили причину данного эффекта. Вполне логично, что свет притягивает как пузырьки, так и частицы. Если разделение зарядов на основе исключавшей зоны является причиной притяжения частиц к свету (глава 9), то оно, вероятно, отвечает и за притяжение пузырьков. Другими словами, притяжение пузырьков к свету означает, что они должны содержать EZ-оболочки.

Толщину оболочки пузырька довольно трудно оценить. Многие типы пузырьков проникают через поверхность жидкости и накрыты оболочкой в виде крышки. Обычно такие крышки имеют толщину в сотни нанометров, но нередко можно встретить толщину порядка 1000 нанометров [9]. Пленка исключавшей зоны толщиной 1000 нанометров будет содержать около 40 000 молекулярных слоев. Даже меньшего количества слоев было бы достаточно, чтобы образовать довольно прочную оболочку.

Наконец, стоит отметить, что EZ-оболочки естественным образом приспособляются к изменениям объема. Исключающие зоны состоят из множества слоев. При достаточном растягивающем давлении эти слои могут смещаться относительно друг друга, позволяя оболочке расширяться (и, следовательно, становиться тоньше). Таким образом, оболочки могут безнаказанно расширяться под действием значительного внутреннего давления. С другой стороны, чрезмерное истончение может привести к разрушению оболочки, и это, возможно, происходит при кипении.

Итак, пузырьки, как и капельки, обладают EZ-оболочками. Подтверждено характеристическое поглощение исключаяющих зон при 270 нм; «социальное» поведение пузырьков соответствует ожиданиям, основанным на свойствах исключаяющей зоны; свет притягивает пузырьки так же, как частицы с EZ-оболочкой; а слоистая структура исключаяющей зоны естественным образом учитывает изменения объема.

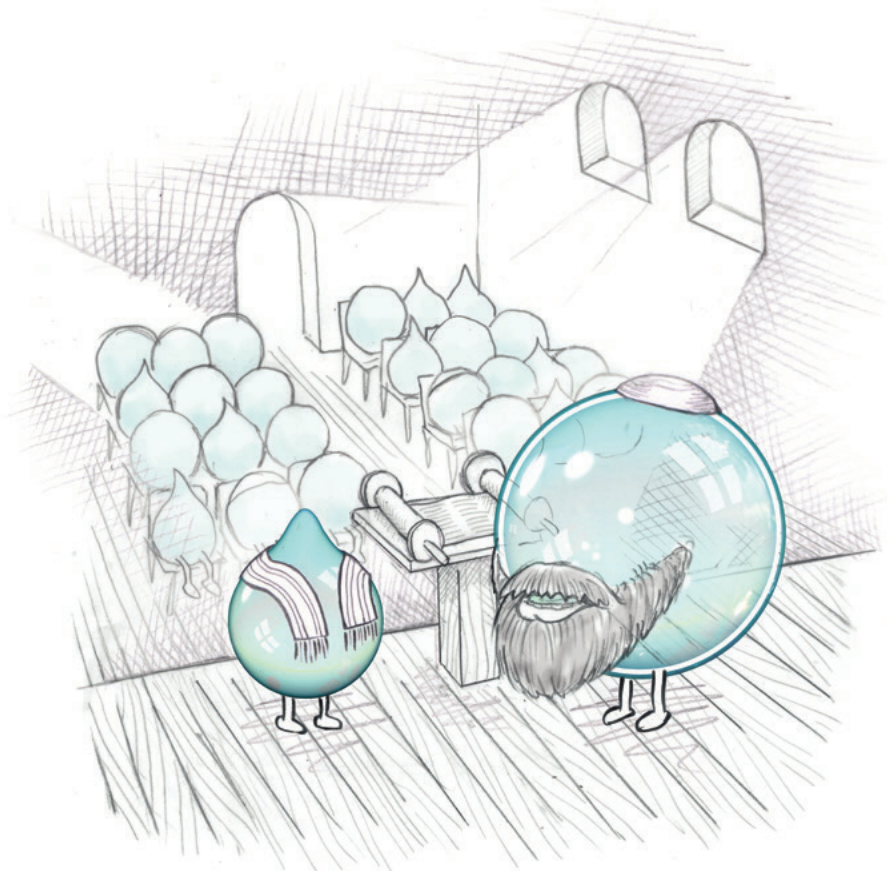
Следовательно, мы укрепились во мнении, что пузырьки и капли имеют похожую структуру, хотя ядро капельки содержит жидкость, а ядро пузырька содержит газ. Это структурное сходство окажется важным, когда мы продолжим изучать, как образуются пузырьки.

13.3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Капельки и пузырьки похожи друг на друга. Оба объекта имеют характерную сферическую форму и прозрачность; и оба могут существовать над или под поверхностью воды. Мы предположили, что эти общие свойства могут возникать из-за наличия упругой оболочки. Мы нашли доказательства наличия такой оболочки в обоих типах везикул и обнаружили, что эти оболочки содержат компоненты исключаяющей зоны.

Рост исключаяющей зоны высвобождает протоны, запертые внутри везикулы и отталкивающие друг друга. Тем самым протоны могут создавать внутреннее давление, необходимое для поддержания сферической формы везикул. Эти протоны могут существовать как в жидкости капли, так и в паре внутри пузырька.

Для накопления протонов требуется внешняя энергия. Возрастание притока внешней энергии должно вызывать повышение давления и, как следствие, расширение везикул. Это расширение может иметь последствия, о которых мы поговорим в следующей главе. Вы бы поверили в превращение жидкости в пар?



«Сегодня, Капелька, ты станешь Пузырьком»

Глава 14

Рождение пузырька: от зародыша к зрелости

Зима в Сиэтле обычно нагоняет тоску. Серые облака заслоняют небо, проливая свое содержимое настолько часто, что у местных старожилов, кажется, выросли перепонки между пальцами ног. Иногда облака рассеиваются, пропуская солнечные лучи, и наступают ободряющая передышка. В такие периоды ночная температура обычно опускается практически до нуля.

Когда я подхожу к своей машине холодным и ясным зимним утром, я часто замечаю конденсат, скопившийся на боковом окне. Он выглядит как иней, но состоит из мелких капелек жидкости, которые можно вытереть салфеткой. Как ни странно, конденсат появляется только на стороне водителя, а не на стороне пассажира. Эта разница озадачивала меня годами.

Страна пассажира обращена к дому моего соседа, а со стороны водителя открытое небо. Я понял, что пустое и холодное открытое пространство означает потерю тепла, а это может вызвать конденсацию влаги. Тем не менее я долго не мог понять нюансы этого явления: почему конденсация происходит в виде капель; почему эти капли так прочно прилипают к окну; и, самое главное, почему капли никогда не образуются на другой стороне. Возможно, этому мешает сияющая аура моего добродетельного соседа?

В этой главе я рассказываю о каплях, но в более общем смысле речь пойдет о *везикулах*: то есть о каплях и пузырьках. Я начну с того, на чем остановился в предыдущей главе: сходство капель с пузырьками. Исходя из этого, мы попытаемся выяснить, имеет ли сходство функциональное значение. Я утверждаю, что *мелкие капли (дроплеты) служат прародителями пузырьков*.

Далее мы рассмотрим следующие ключевые вопросы:

- Как мелкие капли могут образоваться в сосуде с водой?
- Как несколько мелких капель сливаются в более крупные капли?

- Как эти крупные капли могут превратиться в содержащие пар пузырьки?
- Как слияние нескольких пузырьков может привести к кипению?

Эта глава также связывает теоретические основы с повседневными фактами: почему чайник издает громкий шум во время нагревания воды? Почему этот шум прекращается, когда раздается знакомый свисток чайника? И почему вы чувствуете запах готовящегося супа, когда входите в кухню?

14.1. КОНЦЕПЦИЯ ЗАРОДЫШЕВОГО ПУЗЫРЬКА

Пузырьки содержат газ. Чтобы понять, как образуются пузырьки, мы должны знать, откуда берется этот газ (или пар).

Я помню, как размышлял над этим вопросом несколько лет назад, когда ехал на скоростном поезде из Вены в Грац. Мои вопросы о пузырьках, первоначально возникшие во время трансатлантического перелета (см. главу 13), все еще преследовали меня. Как можно представить себе механизм привлечения всех этих молекул газа к определенным местам, чтобы сформировать отдельные пузырьки? И если молекулы газа оказались внутри пузырька, то как им удалось проникнуть сквозь его натянутую мембрану так, что он не лопнул?

Убаюканный проносящимися за окном пасторальными пейзажами, я наконец-то пережил момент озарения. Предположим, что молекулам газа на самом деле *не нужно* «добираться» до пузырька. А что, если процесс, который создал EZ-оболочку, также создает и газ внутри? Тогда эти проблемы теряют смысл: молекулам газа, возможно, не нужно проникать через натянутую оболочку, и им не нужно искать путь к растущему пузырьку.

И хотя эта идея потенциально решает обе проблемы, сначала она показалась мне надуманной: какой процесс может построить сферическую EZ-оболочку из воды? И как этот процесс может создать газ внутри пузырька – предположительно водяной пар? Это весьма непростые вопросы. Тем не менее идея выглядела многообещающей, потому что она аккуратно устраняла все проблемы, вызывающие путаницу, и заслуживала хотя бы того, чтобы отложить ее на будущее.

Затем пришло второе озарение: и зародышевые капли, и пузырьки изначально имеют EZ-оболочки.



Из-за этого сходства одна сущность предположительно может перейти в другую. Предположим, что капля возникла первой. Капля может образоваться, если на какой-нибудь гидрофильной поверхности в воде зародится EZ-слой; если этот слой каким-то образом свернется в сферу, то у нас будет капля в EZ-оболочке. Этот первый этап выглядит правдоподобным.

Затем наступает второй этап – превращение капли в пузырек: если капля поглотила достаточно лучистой энергии, то, по-видимому, вода внутри капли может перейти в пар. Капля станет пузырьком.

К тому времени, когда мой поезд прибыл на вокзал Граца, я был настолько опьянен этой новой, почти головокругительной идеей, что не мог дожидаться, пока найду время, чтобы еще раз подумать о том, как капля может стать зародышем пузырька.

14.2. СОЗДАНИЕ ЗАРОДЫШЕВОЙ СТРУКТУРЫ

Для создания EZ-оболочки требуется порождающая EZ (гидрофильная) поверхность. Инициаторы образования зародышей, присутствующие в стакане воды, несколько отличаются от тех, что мы рассматривали до сих пор. Во-первых, вода неизбежно будет содержать растворенные вещества и взвешенные частицы; даже условно «чистая» вода содержит много включений, потому что она является универсальным растворителем. Эти нежелательные молекулы остаются растворенными/взвешенными *именно потому*, что вокруг них возникает EZ-слой (см. главу 8). Следовательно, практически вся вода содержит центры образования зародышей.

Дополнительным инициатором образования зародышей может служить сам сосуд: если сосуд изготовлен из гидрофильного стекла, то его внутренняя поверхность может создавать EZ-зародыши, особенно в местах локальных неоднородностей (см. ниже). Если поверхность гидрофобная, то она теоретически непригодна к образованию исключаяющей зоны, однако находящиеся в воде заряженные частицы могут известным способом индуцировать противоположный заряд на стенке сосуда, а затем прилипнуть к ней. Прилипшие частицы являются неоднородностями, вокруг которых возникает исключаяющая зона.

При наличии достаточного количества инициаторов EZ строится как обычно – слой за слоем. Эти слои также могут расти в боковом направлении: мы регу-

лярно наблюдаем боковой рост в лаборатории при работе с небольшими плоскими инициаторами, погруженными в воду (рис. 14.1, слева). Мы видим, что слои не только укладываются перпендикулярно поверхности инициатора, но также растут в боковом направлении – часто простираясь далеко за края инициатора.

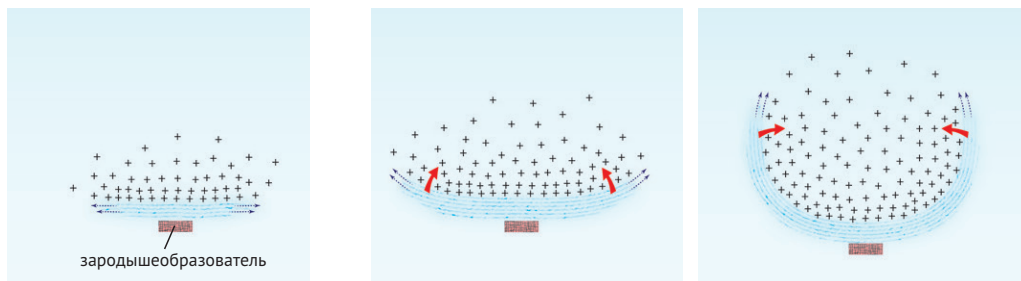


Рис. 14.1. Этапы образования пузырьков. **Слева:** EZ растет слой за слоем, а также в стороны (стрелки). Протоны создают область с положительным зарядом вблизи EZ. **Посередине:** слои EZ изгибаются из-за притяжения к положительному заряду. Красные стрелки указывают направление отклонения. **Справа:** продолжающееся отклонение формирует везикулу

Такие EZ обычным способом генерируют протоны, которые быстро превращаются в ионы гидроксония. Некоторые из этих ионов рассеиваются, потому что положительные заряды отталкиваются; такие ионы гидроксония теряются. Остальные ионы гидроксония остаются близко к поверхности из-за их притяжения к отрицательно заряженной EZ (см. главу 5). Это притяжение создает встречные эффекты: положительные ионы гидроксония движутся к отрицательно заряженной исключаяющей зоне, а эта зона – тонкая и гибкая на начальных стадиях – сгибается навстречу к ионам гидроксония. Следовательно, боковые поверхности EZ должны непрерывно притягиваться к области высокой концентрации положительного заряда (рис. 14.1, посередине). Мы экспериментально подтвердили отклонение отрицательно заряженного EZ-слоя в сторону положительных ионов гидроксония (см. рис. 9.9).

Такое непрерывное отклонение неизбежно приводит к загибанию слоев EZ (рис. 14.1, справа). По мере накопления ионов гидроксония и бокового роста слоев вновь построенные краевые области EZ будут продолжать отклоняться в сторону ионов гидроксония, находящихся в центре. Края EZ должны в конечном итоге соединиться, создав замкнутую структуру. Конечно, реальная структура является сферической, а не круглой, как схематически показано на рисунке. Сферические структуры должны закрываться естественным образом (рис. 4.11). Эти замкнутые сферические структуры представляют собой крошечные капельки.

Каждая такая мини-капелька будет состоять из отрицательно заряженной EZ-оболочки, которая обволакивает жидкую воду и ионы гидроксония. Последние отталкиваются друг от друга, а поскольку они пытаются разбежаться в разные стороны, то оказывают давление на EZ-оболочку, придавая ей округлую форму (рис. 14.2). Сферический пузырь еще не родился, но был зачат крошечный эмбриональный пузырек, готовый начать свое развитие к зрелости.

Стоит отметить, что сумма внутренних положительных зарядов не обязательно должна равняться сумме отрицательных зарядов оболочки. Такой баланс интуитивно ожидаем, поскольку он обеспечивает общую электронейтральность. Тем не менее некоторые ионы гидроксония неизбежно будут утеряны во время формирования везикулы из-за рассеивания, вызванного их отталкиванием друг от друга (рис. 14.1). Следовательно, везикула *не* является нейтральной. *Замкнутая везикула должна обладать избыточным отрицательным зарядом.* Мы вернемся к этому заряду позже.

14.3. ОТ КАПЛИ К ПУЗЫРЬКУ

Описанная выше структура зародышевых капель будет предметом дальнейшего обсуждения. Но, прежде чем мы продолжим, давайте сначала посмотрим, является ли эта везикула достаточно прочной, чтобы выжить. На самом деле маленькие везикулы не особенно стабильны.

Поглощенная энергия может изменить везикулу. Предположим, что везикула поглощает лучистую энергию. Происходит формирование EZ-оболочки. По мере роста оболочки растёт внутреннее давление. EZ-оболочка может выдержать это повышенное давление до определенного уровня; если давление превышает некоторый критический порог, то слои исключаяющей зоны, скорее всего, начнут сдвигаться друг относительно друга, тем самым позволяя везикуле расширяться (рис. 14.3).

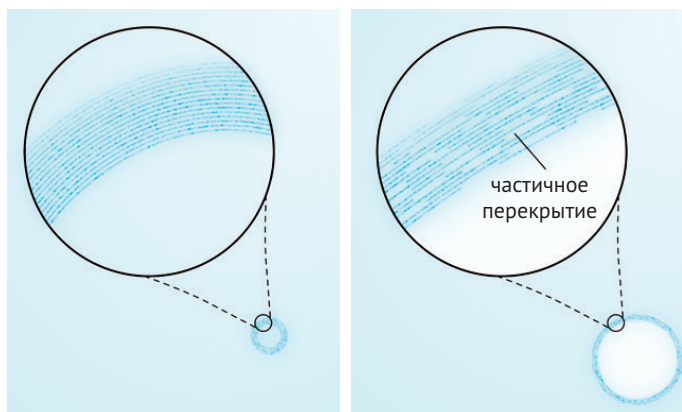
Расширение везикулы не обязательно приводит к разрушению; оно может происходить постепенно. Наружный слой должен сначала уступить место для расширения других слоев под давлением изнутри. Как только внешний слой разрывается, его сегменты могут проскользнуть за следующий слой, обосновавшись в одном из множества мест, где они могут закрепиться на противоположных зарядах. Там они стабилизируют



Рис. 14.2. Сферическая капля. Ионы гидроксония создают давление, распирая EZ-оболочку. Это давление способствует шарообразности

Рис. 14.3. Расширение везикулы. Чтобы скомпенсировать расширение, вызванное внутренним давлением, слои EZ скользят друг относительно друга, частично перекрываясь

ются. Затем тот же процесс происходит со следующим слоем и т. д. Таким образом, везикула может расширяться постепенно, и не обязательно разрушаясь (хотя это может случиться). Этот механизм может обеспечить значительный рост везикулы.



Пузырьки в бокале шампанского

Для того чтобы сделать танец пузырьков в бокале более эффектным, производители шампанского специально вытравливают узорные неоднородности на внутренней стороне своих бокалов. Пузырьки в первую очередь возникают в местах травления. Дефекты также могут быть вызваны выпуклостями на поверхности стекла. Все эти неоднородности создают бесконечные вереницы пузырьков, как показано на снимке справа.

В случае шампанского (или газированной воды) пузырьки содержат не только водяной пар, но и CO_2 . Однако это не меняет причину рождения игристых пузырьков: на дефектах поверхности возникают EZ-области. Ассоциированные с ними протоны притягивают отрицательно заряженные ионы HCO_3^- , которые образуются из растворенного CO_2 . В результате мы видим, как от неоднородностей поднимаются пузырьки, наполненные CO_2 .

Если на поверхности бокала искусно вытравлен рисунок, то очаровательный узор из пузырьков может побудить вас купить больше шампанского.



14.4. Что происходит дальше?

Рассмотрим молекулы воды внутри везикулы. Эти молекулы воды как безучастные наблюдатели присутствуют среди распределенных ионов гидроксония, выполняющих работу по расширению оболочки. Молекулы воды испытывают давление, потому что оболочка везикулы давит на них так же, как стенки баллона давят на газ внутри. Если оболочка везикулы внезапно расширяется, то это давление внезапно уменьшается – молекулы воды внутри везикулы испытывают снижение давления.

Изменение давления может вызвать изменение фазы. Например, повышение давления пара может превратить этот пар в жидкость; снижение давления может превратить жидкость обратно в пар. Этот общий принцип применим и здесь: поскольку везикула расширяется и уменьшает давление на воду внутри, жидкая вода может превратиться в пар.

В результате этого фазового перехода капля превращается в пузырек (рис. 14.4).

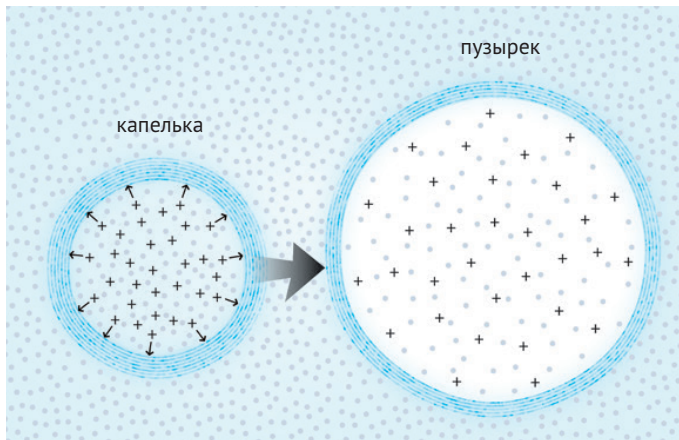


Рис. 14.4. Переход от капли к пузырьку. Давление ионов гидроксония расширяет везикулу; молекулы воды испытывают падение давления, что может вызывать переход жидкости в пар

Кажется, мы достигли некоторого прогресса, по крайней мере теоретически. Мы начали с неизбежного образования EZ-областей в емкостях с водой. Далее последовало образование капель. Затем произошел качественный переход между каплей и пузырьком: если капля поглощает достаточно лучистой энергии, то внутренний заряд повышает давление до тех пор, пока капля не расширится, что приведет к переходу воды в пар и возникновению пузырька. Таким образом рождается пузырек.

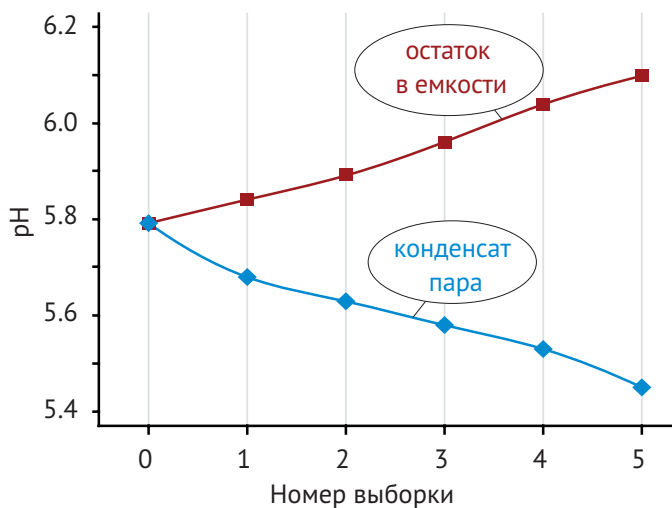
Возникает вопрос: стоит ли за этим логически неизбежным развитием нечто большее, чем просто

развитое воображение? Происходят ли эти события на самом деле? В предыдущей главе мы определились с одним из двух необходимых условий предполагаемого процесса, EZ-оболочкой, и теперь можем перейти ко второму вопросу: действительно ли эти сферические оболочки содержат внутри положительные заряды?

14.5. ДЕЙСТВИТЕЛЬНО ЛИ В ВЕЗИКУЛАХ ПРИСУТСТВУЮТ ПРОТОНЫ?

Наиболее очевидная стратегия исследования везикул проста: собрать их содержимое, чтобы узнать, присутствуют ли там протоны. Мы реализовали эту стратегию, используя кипение. Когда вода закипает, пузырьки лопаются на поверхности воды, и их содержимое выделяется в виде пара. Мы собирали этот пар, конденсировали его в жидкость и измеряли pH жидкости. pH постепенно уменьшался со временем кипения. Это означало, что внутренности лопающихся пузырьков содержали положительный заряд (рис. 14.5, синяя кривая).

Рис. 14.5. Результаты экспериментов с кипением. Синяя кривая показывает pH образцов пара, собранных через различные промежутки времени. Красная кривая показывает pH воды, оставшейся в емкости после кипения



Между тем, поскольку вода в емкости теряет положительный заряд, эта потеря должна быть отражена в остатке; pH остаточной воды должен постепенно увеличиваться. Это ожидание подтвердилось (рис. 14.5, красная кривая). Следовательно, протоны переместились из воды в пар – предположительно когда пузырьки лопнули и выпустили наружу свое содержимое.

Во втором тесте для выявления протонов использовали инфракрасные снимки. Если внутри пузырька содержится обычная вода без протонов, то излучение этой воды не должно сильно отличаться от излучения воды вокруг пузырька. Однако содержимое пузырька испускает инфракрасное излучение значительно сильнее, чем окружающая вода (рис. 14.6). Дополнительная лучистая энергия подразумевает активное движение зарядов (глава 10) – вполне ожидаемое явление, если накопленные протоны дрожат внутри пузырька.

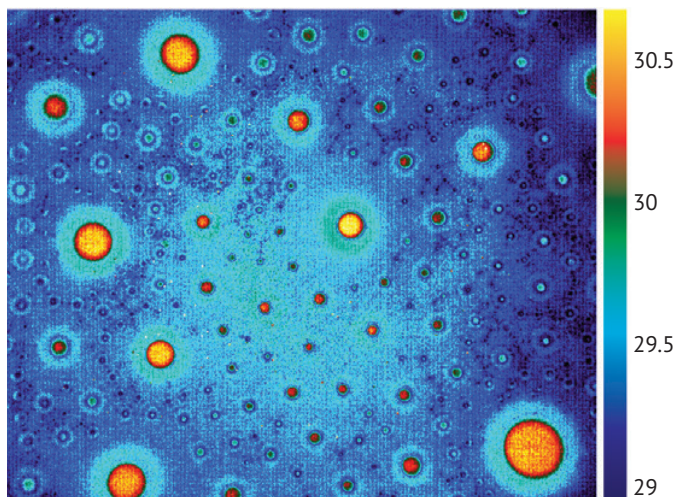


Рис. 14.6. Инфракрасное изображение пузырьков на поверхности воды. Пузырьки создавались продувкой воздуха через раствор поверхностно-активного вещества (TWEEN 20/вода). Содержимое пузырька (оранжевый цвет) испускает больше инфракрасной энергии, чем окружающая среда (синий цвет). Вполне ожидаемо выглядят темные тонкие границы пузырьков – EZ-оболочки генерируют мало инфракрасной энергии. Шкала в градусах Цельсия

Третий тест на наличие внутренних протонов заключается в проверке того, вызывает ли разрушение пузырька рассеивание протонов. Если источником внутренней энергии являлся какой-то артефакт эксперимента, а не протоны, то излучение должно исчезнуть при разрушении пузырька. С другой стороны, если излучение исходило от ионов гидроксония, находящихся в пузырьке, то при разрушении пузырька эти ионы должны рассеяться в окружающей жидкости. Риснок 14.7 подтверждает рассеивание. После разрушения пузырька «горячая» зона расплывается и в конечном итоге, когда протоны смешиваются с водой, исчезает. Похоже, что лучистая энергия исходит от реального источника внутри пузырька.

Из результатов приведенных выше опытов ясно следует, что ионы гидроксония присутствуют внутри пузырька. Для предполагаемого механизма наличие этого положительного заряда является ключевым: он является важным компонентом для создания внутреннего давления и перехода от капли к пузырьку.

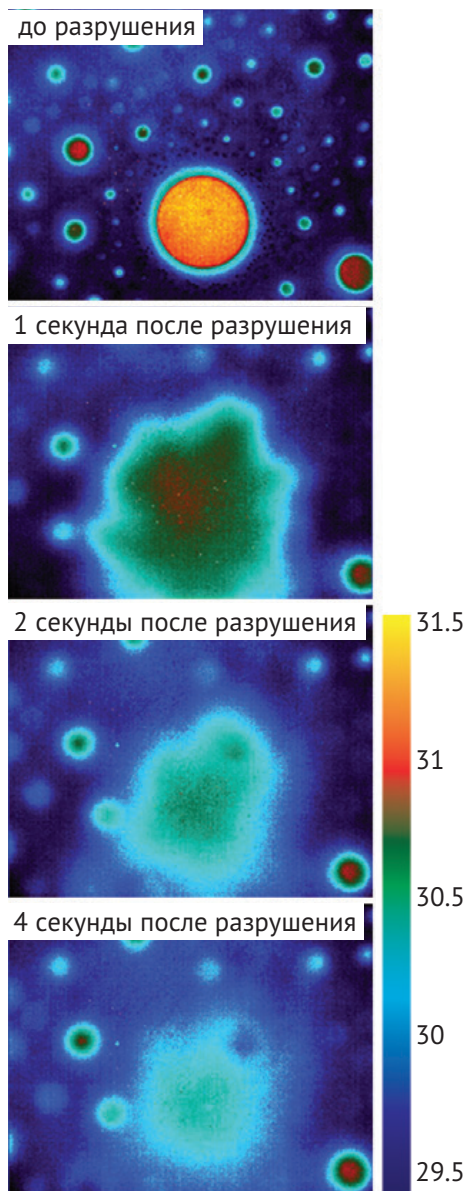


Рис. 14.7. Разрушение пузырька. Изображение аналогично рис. 14.6, за исключением того, что данный пузырек самопроизвольно лопается. Обратите внимание на рассеивание зоны с высоким излучением. Шкала в градусах Цельсия

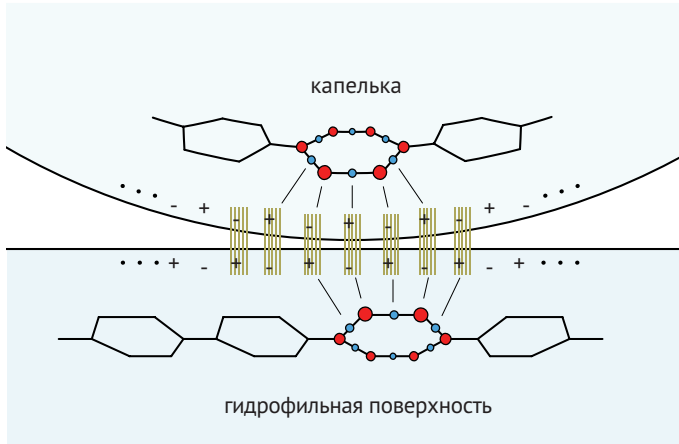
14.6. СЛИЯНИЕ ВЕЗИКУЛ: МЕХАНИЗМ ЗАСТЕЖКИ

Убедившись в наличии положительного заряда внутри EZ-оболочки, мы переходим к рассмотрению промежуточных стадий в предлагаемом процессе образования пузырьков – как везикулы сливаются друг с другом.

Слияние везикул должно быть неотъемлемой чертой процесса образования пузырьков, поскольку капли микронного размера не могут переходить непосредственно в пузырьки сантиметрового размера; разница размеров слишком велика. Требуется поэтапный рост, и именно здесь вступает в дело *коалесценция*. Нарастающее слияние меньших везикул в новые, более крупные везикулы в конечном итоге приводит к появлению сантиметровых пузырьков, наблюдаемых во время кипения.

Чтобы понять принципы, лежащие в основе такого слияния, рассмотрим сначала, что происходит в более простой ситуации, когда одиночная капля встречает гидрофильную поверхность. На большинстве гидрофильных поверхностей уже присутствует некоторое количество слоев EZ, образовавшихся из влаги, находящейся в воздухе (глава 11); следовательно, слои EZ должны уравнивать кривизну капли и гидрофильной поверхности. Взаимодействие капля–поверхность сводится к взаимодействию между изогнутым и плоским EZ-слоем.

Предположим, что капля падает на гидрофильную поверхность. По мере приближения капли самую важную роль начинают играть положительные и отрицательные заряды в составе соответствующих слоев EZ (рис. 14.8). Противоположные заряды будут притягиваться, слегка подталкивая EZ-слои капли к выравниванию вдоль EZ-слоев поверхности. Капля прилипнет к поверхности под действием силы притяжения противоположных зарядов.



Первоначально прилипание происходит только в ограниченной области из-за кривизны капли (рис. 14.8). С другой стороны, эта ненадежная связь является лишь отправной точкой: заряды, окружающие точку связи, продолжают притягивать противоположные заряды другого EZ-слоя; соответствующие поверхности будут, таким образом, соединяться вместе, как застежка-молния (рис. 14.9). Слияние EZ-слоев образует плоскую зону прилегания.

Степень смыкания застежки зависит от давления внутри капли. Давление способствует округлости, в то время как застежка стремится быть плоской. EZ-слои будут продолжать смыкаться, пока выпрямляющая сила притяжения не будет уравновешена силой давления, поддерживающей округлость капли. Результат будет выглядеть примерно так, как показано в нижней части рис. 14.9.

Механизм застежки, по сути, противоположен механизму, который генерирует пузырьки. В механизме застежки сферическая EZ становится плоской (рис. 14.9). В механизме генерации пузырьков плоская EZ становится сферической (рис. 14.1). Два процесса выглядят симметричными.

Застежка-молния – это механизм, с помощью которого могут сливаться EZ-оболочки. Все везикулы имеют такие оболочки. Следовательно, механизм застежки поможет нам понять, как две оболочки объединяются, чтобы произвести одну большую везикулу, – или, по крайней мере, первый шаг этого процесса.

Рис. 14.8. EZ-слой капли взаимодействует с EZ-слоем поверхности. Противоположные заряды притягиваются и смыкаются

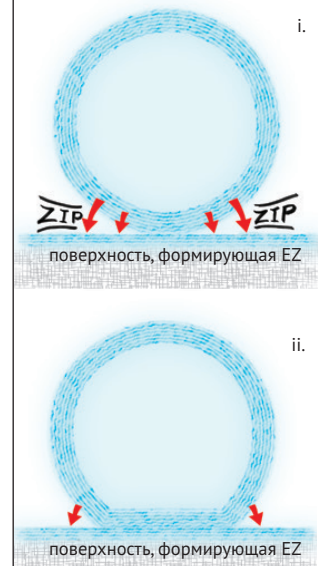


Рис. 14.9. Прилипание капли за счет механизма застежки-молнии. Благодаря локальным силам взаимного притяжения EZ-слой капли соединяется с EZ-слоем поверхности, образуя плоское дно

Гидрофильно-гидрофобный парадокс: насколько вы любите свою везикулу?

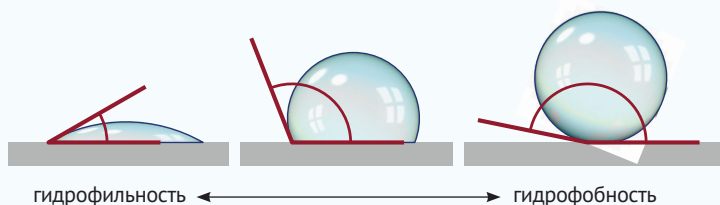
К настоящему времени вы, вероятно, усвоили терминологию: поверхности, по которым растекается вода, называют гидрофильными, или любящими воду: вода сливается с ними, как влюбленные в объятиях. Напротив, поверхности, которые превращают воду в капли, называются гидрофобными, или отталкивающими воду: они ненавидят воду. Иногда они испытывают настолько сильное отвращение к воде, что чистая вода буквально отскакивает от них, собираясь в полностью сферические капли. Классическим примером такой поверхности является лист лотоса: вода, упавшая на листья лотоса, собирается в сферы, которые тут же скатываются, оставляя лист сухим.

Чтобы различать поверхности, ученые используют признак, основанный на форме капли. Если капля остается сферической, то поверхность классифицируется как гидрофобная; если капля растекается (образуя EZ-слои), то поверхность классифицируется как гидрофильная. Это достаточно просто. Однако настоящая проблема заключается в том, что форма капель чаще всего лежит где-то между этими двумя крайностями (см. рисунки внизу). Капля, как правило, сохраняет приблизи-

тельно сферическую форму, но с некоторым растеканием и уплощенным дном (средний рисунок).

Общепринятое решение проблемы заключается в определении степени гидрофильности геометрическим методом: дно везикулы уплощается относительно поверхности; уплощение позволяет легко построить касательные, что, в свою очередь, дает возможность измерить угол контакта. Маленькие углы контакта обозначают высокую гидрофильность (слева); большие углы обозначают высокую гидрофобность (справа).

Теперь вы легко поймете, почему угол контакта является обоснованным показателем гидрофильности. Если материал является очень гидрофильным с сильно заряженным EZ-слоем, его способность формировать застежку будет высокой; капля будет максимально растянута, давая небольшой угол контакта (слева). Если EZ-заряды менее сильны, то скромная сила вытягивания приведет к более ограниченному уплощению капли (в центре). И если материал является гидрофобным и EZ вообще не образуется, то уплощение не происходит – в этом случае угол контакта будет большим



Форма капли для чрезвычайно гидрофильной поверхности (слева), промежуточной поверхности (в середине) и чрезвычайно гидрофобной поверхности (справа). Угол контакта часто используется как мера гидрофильности поверхности

(справа). Таким образом, классификация поверхностей по углу контакта естественным образом вытекает из понимания основ EZ.

Это объяснение относительной гидрофильности подразумевает один аспект, который полезно запомнить: гидрофобность – это не что иное,

как отсутствие гидрофильности; т. е. гидрофобные поверхности не способны заметно взаимодействовать с водой с образованием EZ. Поэтому гидрофобность не является характеристикой сама по себе; она просто отражает отсутствие другой характеристики.

14.7. СЛИЯНИЕ ВЕЗИКУЛ

До сих пор мы имели дело с выпуклой EZ-оболочкой, которая соприкасается с плоской EZ-поверхностью. В более общем смысле обе взаимодействующие поверхности могут быть выпуклыми. Две капли могут слиться в одну большую каплю, или два пузырька могут слиться в один большой пузырь.

Такие слияния, по-видимому, представляют собой тот же тип застежки EZ-EZ, о котором мы только что говорили. Слившиеся EZ-поверхности образуют граничную плоскость, которая разделяет два пузырька. Чтобы из этого слияния возник одиночный большой пузырь, сначала должна исчезнуть граничная плоскость.

Чтобы исследовать процесс слияния, мы использовали высокоскоростное видео. Мы покрыли внутренние поверхности двух стеклянных пластин материалом, у которого угол контакта с каплями воды близок к 90° . Закрепив две стеклянные пластины параллельно на небольшом расстоянии, мы поместили в зазор между ними две капли воды. Небольшое расстояние между пластинами с покрытием заставило воду образовать диски с прямыми краями, сводя к минимуму оптические искажения. Это позволило нам отслеживать слияние двух сплюснутых капель (рис. 14.10).

Последовательность кадров на рис. 14.10 показывает, что две EZ-оболочки действительно сливаются. Объединившиеся оболочки быстро образуют прямую границу между двумя везикулами, предположительно по механизму застежки. Кажется, что граница существенно утолщается; однако утолщение может быть иллюзорным: любой наклон граничной плоскости может создать эффект утолщения из-за большой оптической глубины резкости. Главное, что две EZ-оболочки сливаются вдоль одной перегородки.

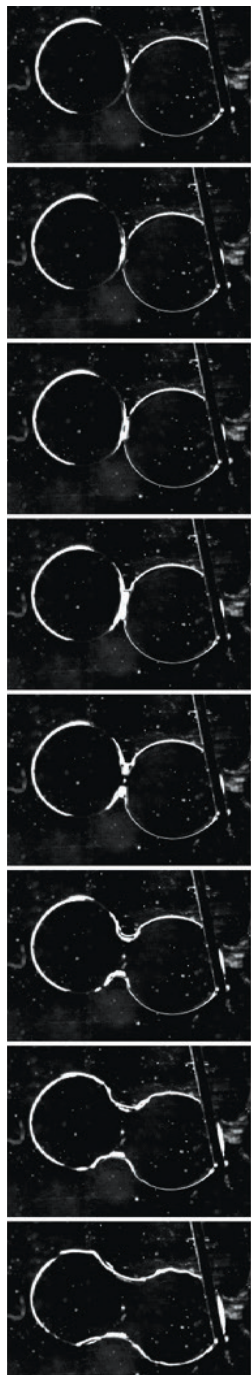


Рис. 14.10. Скоростная видеосъемка процесса слияния капель. См. описание в тексте

Затем, внезапно, эта перегородка разрывается. Разрушение обычно начинается вблизи средней точки граничной плоскости; материал перегородки стягивается к периферии.

Разрушение, вероятно, является результатом чрезмерного натяжения. Чтобы понять, как это может произойти, рассмотрим уравнение, описывающее натяжение тонкой пленки. Для сферических оболочек с тонкими стенками натяжение определяется отношением Лапласа $T = Pr/2$, где T – натяжение оболочки, P – перепад давления на оболочке, а r – радиус кривизны. Когда изогнутая поверхность уплощается, радиус кривизны r стремится к бесконечности.

Числитель уравнения может быть очень большим. Даже небольшая разница давлений P между оболочками создаст огромное натяжение перегородки. Такой перепад давления может возникнуть, если, скажем, один из двух соседних пузырьков получит немного больше лучистой энергии, чем его сосед. Подобная разница давления может создать огромное натяжение. И тогда... бац! – разрыв перегородки.

Видеосъемка подтверждает, что материал перегородки стягивается к краям граничной плоскости; можно наблюдать, как остатки перегородки накапливаются по краям. Сейчас нам не совсем ясно, что станет с этим материалом, но мы можем сделать некоторые предположения. Поскольку слои EZ слились между собой, этот притянутый к краям материал перегородки, вероятно, будет встроен в существующую EZ-оболочку. Поэтому соответствующие области оболочек пузырьков должны утолщаться и становиться более жесткими. Это утолщение может объяснить, почему некоторые ранее округлые сегменты стенки пузырька уплощаются после разрушения границы (рис. 14.10, последний кадр).

В результате указанной последовательности событий две везикулы сливаются в одну. В основе процесса слияния лежит взаимодействие между оболочками. Содержимое везикул имеет значение, но главным образом для повышения давления в пузырьке и тем самым ограничения роста разделительной перегородки. Кроме того, фазовое состояние содержимого не имеет большого значения; с равным успехом оно может быть жидкостью или паром, процесс слияния практически одинаков. Следовательно, один и тот же общий механизм должен объяснять слияние капель и пузырьков.

Эта механистическая универсальность может объяснить любопытное явление: капли застряли внутри

пузырьков, а пузырьки застряли в каплях (рис. 14.11). Существование таких составных структур можно объяснить типичными процессами формирования застеежек.

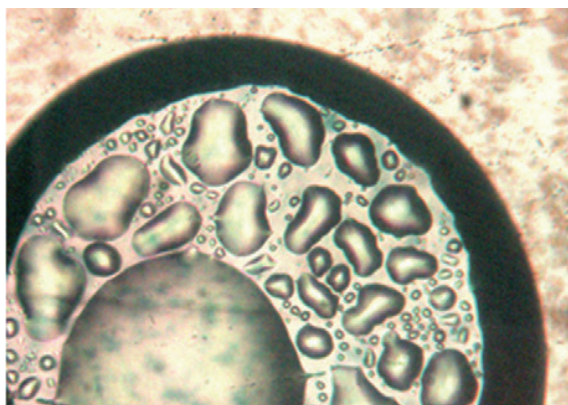


Рис. 14.11. Составные везикулы: капли внутри пузырька. Большая капля в левом нижнем углу является результатом слияния более мелких капель. Наблюдаемые вогнутости можно объяснить наличием не полностью слившихся капель

Хочу еще раз подчеркнуть, что механизм молнии может объяснить слияние везикул. Как только два пузырька соприкасаются, слияние становится практически неизбежным, и пузырьки сливаются в один более крупный пузырь. Последовательные слияния, таким образом, объясняют, как крошечные пузырьки могут в конечном итоге вырасти в большие капли или пузырьки, которые мы обычно наблюдаем.

14.7.1. Слияние обеспечивает стабильность и долговечность

Слияние столь важно не только потому, что оно способствует росту, но и потому, что *способствует долговечности*. Причина чисто геометрическая. Когда везикулы одинакового размера сливаются в одну большую везикулу, масса оболочки увеличивается примерно вдвое. С другой стороны, площадь поверхности оболочки увеличивается меньше чем в два раза (попробуйте посчитать) – это означает, что оболочка должна стать толще. Новая везикула должна иметь более толстую оболочку, чем ее предшественники, что должно сделать новую, более крупную везикулу более прочной: она должна выдерживать более высокое давление, не разрушаясь. Более крупная везикула должна быть более устойчивой.

Можно возразить, что более прочные стенки не повысят устойчивость, если давление внутри новой везикулы будет выше, чем у ее предшественников. Однако это не так. Давление должно зависеть от концентрации заряда. Когда две везикулы с равной плотностью

заряда сливаются, плотность заряда не меняется: объем увеличивается в два раза, как и количество зарядов. Следовательно, давление внутри везикулы остается неизменным.

Хотя новая, более крупная везикула не испытывает изменения внутреннего давления, ее стенки становятся толще, что стабилизирует ее. Согласно этой логике, долговечность везикул продолжает расти с каждым последующим слиянием. Это может объяснить, почему маленькие везикулы могут быть недолговечными (и поэтому их трудно обнаружить), в то время как более крупные везикулы постоянно перед глазами. Чем крупнее везикула, тем лучше она противостоит внешним воздействиям. Везикулы большего размера более прочные.

Это утверждение справедливо как для капелек, так и для пузырьков. Сливаясь, маленькие капельки и маленькие пузырьки становятся прочнее. Все слияния увеличивают долговечность, а это, в свою очередь, увеличивает вероятность дальнейших слияний. В соответствующих условиях (см. ниже) рост на основе слияния должен быть неизбежен – более мелкие везикулы всегда сливаются в более крупные.

14.8. ЗАКИПАНИЕ ВОДЫ

Как вы увидите, слияние – это то, что делает возможным кипение. Если внимательно наблюдать, как огонь нагревает кастрюлю с водой, вы увидите последовательность стадий роста пузырьков, которые в конечном итоге приведут к кипению.

Сначала вы можете видеть случайные маленькие везикулы, которые, кажется, таинственным образом исчезают; предположительно они лопаются в воде. Затем начинают появляться везикулы большего размера. Вскоре они становятся достаточно прочными и оформленными, чтобы дожить до слияния в более крупные везикулы. В конце концов, эти более крупные везикулы превращаются в пузырьки, которые могут прорваться через поверхность и выпустить пар в воздух. По этому признаку мы определяем, что вода закипела. Событие знакомое, но наблюдение за его развитием создает свежее ощущение таинственности – как будто ведьмы готовят секретное зелье.

- И все же, каким образом капельки микрометрового размера превращаются в сантиметровые пузырьки? Отношение диаметров составляет около 10 000, и, следовательно, отношение объемов со-

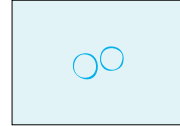
ставляет 1 000 000 000 000 – очевидно, слишком много для одного перехода. Рост должен происходить поэтапно. Здесь в игру вступает фактор устойчивости. Поскольку слившиеся везикулы более устойчивы, чем их предшественники, с большей вероятностью выживут более крупные экземпляры. Чем больше становятся везикулы, тем больше вероятность того, что они достигнут стадии перехода в пузырек, не лопнув по пути.

- Достигнет ли везикула в итоге этой критической точки, зависит от условий окружающей среды. Поскольку достижение критической точки зависит от более ранних слияний, а более ранние слияния зависят от концентрации везикул, то процессу роста должно способствовать одновременное формирование большого количества везикул. Это зависит от энергии окружающей среды.
- Лучистой энергии должно хватать для роста большого количества везикул. Речь идет не только о ранних этапах нагрева, когда энергия поступает лишь от источника тепла. По мере продолжения нагрева лучистая энергия начинает поступать не только от нагревателя, но и от горячей воды. Оба источника вносят свой вклад. Когда суммарный поток энергии становится достаточно высоким, система преодолевает энергетический порог: везикулы становятся довольно многочисленными, чтобы происходили их последовательные слияния и успешные превращения в пузырьки. Далее пузырьки тоже могут сливаться, образуя более крупные пузырьки, и вскоре начинается кипение (рис. 14.12).

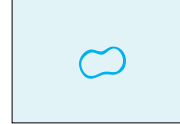
Из этих соображений можно сделать вывод, что критической переменной в уравнении кипения является не температура; более значащим фактором выступает концентрация везикул. Просто обычно случается так, что концентрация везикул достигает порога при температурах, близких к 100 °С, но это не обязательно так [1].

Заинтересовавшись возможностью нагрева воды до очень высоких температур без кипения, мой ученик Чжэн Ли взял стеклянный стакан с полированными стенками и наполнил его лабораторной дистиллированной деионизированной водой. В такой воде очаги зарождения исключающих зон встречаются редко или вообще отсутствуют. Затем он включил нагреватель. Даже когда вода была нагрета до температуры, намного превышающей обычную температуру закипа-

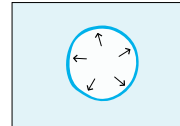
i. Везикулы встречаются



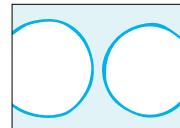
ii. Везикулы сливаются; EZ-оболочка утолщается. Множественные слияния увеличивают объем



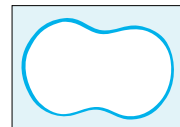
iii. Везикулы растут от притока энергии и превращаются в пузырьки с паром внутри



iv. Пузырьки сливаются; слияния



v. Пузырьки сливаются; слияния увеличивают объем



vi. Наполненные паром пузырьки прорываются через поверхность

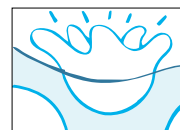


Рис. 14.12. Процессы, приводящие к кипению при высоком притоке лучистой энергии

ния, кипение не начиналось – пока он не бросил туда немного песка. Добавление этих центров зародышеобразования привело к мгновенному закипанию. Тот же результат он получил, вставив палочку для перемешивания, – мгновенное закипание.

Из этих экспериментов очевидно следует, что температура не может быть решающим фактором. Добавление примесей в горячую воду должно было снизить температуру воды, но вызывало мгновенное закипание. Должно быть, введение этих центров зародышеобразования позволило образоваться везикулам, которые затем вызвали кипение. Итак, формирование необходимого количества везикул представляется более важным, чем температура.

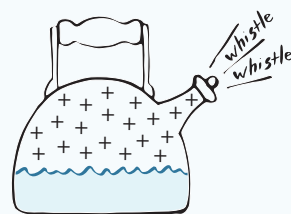
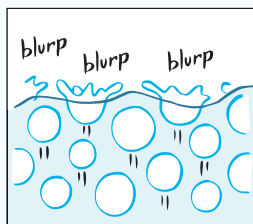
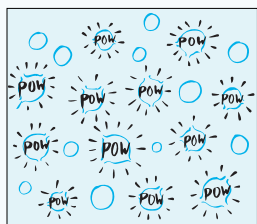
Этот вывод согласуется с любопытным наблюдением, сделанным относительно чесночного супа. (Если вы не пробовали чесночный суп, могу вас заверить, он неожиданно вкусный – густой, сливочный и сытный.) Мы разлили кипящий горячий суп из кастрюли в несколько керамических мисок с грубой текстурой поверхности. Суп сразу стал остывать; однако он продолжал пузыриться. Пузырьки продолжали возникать, даже когда суп остыл до комфортной температуры. Можно предположить, что неровности на шероховатых стенках керамических мисок способствовали зарождению достаточного количества везикул, чтобы они сливались в более крупные пузырьки, характерные для кипения, – даже при температурах намного ниже предполагаемой стандартной температуры кипения.

То, что температура должна играть лишь второстепенную роль, вполне логично, если вспомнить, о чем говорилось в главе 10. Температура – это неоднозначное понятие. Учитывая эту неоднозначность, было бы удивительно, если бы критическая точка кипения была однозначно ограничена некоторым фиксированным значением температуры.

14.9. КАПЛИ НА ОКНАХ АВТОМОБИЛЕЙ И СИЯНИЕ МОЕГО СОСЕДА

В начале этой главы я упоминал о конденсации влаги на поверхности холодных автомобильных стекол. Наличие конденсата зависело от того, куда смотрит окно. Теперь, когда у нас есть некоторое представление о поведении капелек, я возвращаюсь к этому вопросу, чтобы выяснить, действительно ли зависимость

Звуки кипения воды



Включите горелку под кастрюлей с водой и прислушайтесь. Когда вы видите, что на дне кастрюли начали образовываться пузырьки, одновременно с этим вы услышите звук. По мере нарастания количества пузырьков громкость увеличивается, и в конечном итоге звук становится похожим на грохот. Затем, когда вода приближается к кипению, грохот загадочным образом превращается в характерный низкочастотный булькающий звук – словно духи воды, протестующие против адской жары, наконец сдались, и их вопли превратились в рыдания.

Мы слышим эти звуки так часто, что наш мозг игнорирует их присутствие. Хороший способ освежить память – нагреть небольшое количество воды в тонкостенном металлическом чайнике. Тонкие стенки усиливают звук. Тогда обычный шум кипения превращается в настоящий грохот, который трудно игнорировать без защитных наушников. Звук может быть оглушительным.

Как возникают эти характерные звуки?

Источником звука являются механические колебания. Когда вода нагревается, начинают формироваться везикулы. Эти везикулы могут либо сливаться, либо разрушаться. В любом случае возникают механические колебания. Разрушение везикул будет производить особенно громкие хлопки, похожие на звук лопнувшего воздушного шарика. Мы воспринимаем эти резкие перепады дав-

ления как звуки. С увеличением частоты появления везикул звуки становятся более частыми и, следовательно, кажутся громче. Иными словами, чем сильнее нагревается вода, тем громче будет шум.

Как только везикулы перестают лопаться, шум стихает. Это происходит, когда везикулы начинают достаточно быстро сливаться воедино, превращаясь в пузырьки. Когда пузырьки пробиваются через поверхность и выходят в воздух, они издают более тихий звук. Лопающиеся пузырьки создают характерный булькающий звук.

И наконец раздается свист. Если вода закипает в чайнике со свистком, то со временем раздастся знакомый высокий звук; ваша вода готова для приготовления чая. Как ни странно, свист не возникает даже тогда, когда вода очень близка к кипению; он начинает звучать только тогда, когда вода закипает по-настоящему. Это чрезвычайно удобно, но почему так происходит?

Когда пузырьки лопаются, они выпускают протоны. Эти протоны немедленно создают внутри чайника избыточное давление за счет отталкивания. Возникшее давление выталкивает пар через свисток на высокой скорости (иногда можно увидеть струю пара, выходящего из носика чайника), производя звук так же, как его издает кларнет. Эти протоны не появляются до тех пор, пока не начнется кипение. Поэтому, когда вы слышите свист чайника, вы можете быть уверены, что вода действительно кипит.

от ориентации окон может быть вызвана особым сиянием моего соседа.

Все дело в природе влажности воздуха. Хотя этот вопрос рассматривается в следующей главе, позвольте мне забежать вперед и предположить, что влага в воздухе существует в основном в виде везикул. Эти маленькие везикулы нельзя увидеть, потому что они рассеивают очень мало света. Однако об их наличии можно сделать вывод, когда они конденсируются в виде облаков.

Эти рассеянные в воздухе везикулы также могут конденсироваться на гидрофильных поверхностях. Конденсация возникает, когда слипаются EZ-оболочки везикул (рис. 14.8). Именно это происходит с холодным автомобильным стеклом и, возможно, также с зеркалом в ванной, когда вы дышите на него утром до того, как включилось отопление. Везикулы прилипают к поверхности. Если присмотреться, можно увидеть мириады капелек, каждая из которых прилипла к поверхности стекла.

Для удаления этих капелек с поверхности требуется лучистая энергия. Она способствует строительству исключаящих зон, которые генерируют внутренние протоны; в свою очередь, протоны создают давление, благодаря чему капельки становятся более округлыми. Увеличение округлости приводит к уменьшению размера области сцепления. Как только эта область уменьшается до нуля, везикула больше не может прилипать – она возвращается в атмосферу, и окно становится сухим.

Исходя непосредственно из этих соображений, можно найти объяснение ситуации с окнами автомобиля. Окно со стороны водителя смотрит в открытое пространство, где холодный космос не дает ощутимого излучения. Таким образом, везикулы остаются прилипшими – по крайней мере, до тех пор, пока утреннее солнце не поднимется достаточно высоко, чтобы согнать их с места. Противоположная сторона машины получает непрерывный поток лучистой энергии из дома моего соседа, в котором всю ночь тепло и уютно. Таким образом, любые везикулы, которые могут прилипнуть к боковому стеклу, быстро покидают поверхность.

Следовательно, в некотором смысле сияние моего соседа действительно оказывает воздействие, хотя и не так, как ему хотелось бы.

Почему наш нос чувствует запах супа

Если кто-то варит чесночный, луковый или куриный суп, вы почувствуете его аромат, едва приблизившись к кухне. Почему это происходит? Мы привыкли думать, что при нагревании кастрюли молекулы супа улетучиваются вместе с испаряющейся водой; затем эти молекулы достигают вашего носа и позволяют вам ощутить запах супа.

Однако нечто подобное происходит даже там, где нет тепла, – на берегу моря. Часто вы знаете, что находитесь на берегу моря, потому что чувствуете запах соли в воздухе. Соли удается покинуть морскую воду, предположительно за счет испарения. Улетучивающаяся соль часто поднимается до облаков. Фактически этого количества молекул достаточно, чтобы заставить ученых предположить, что соль действительно может послужить «затравкой» для образования облака.

В обоих примерах что-то покидает объемную воду и оказывается в отдаленном месте. Первый пример связан с нагреванием; второй нет. Если существует единый механизм носителя запаха, то он не должен быть связан с парообразованием, вызванным высокой температурой. Общим носителем может быть везикула. В кипящем супе на неровностях обязательно образуются везикулы. Везикулы также существуют в бурных морских волнах в виде капель, уносимых ветром.

Могут ли эти везикулы переносить молекулы запаха?



Давайте рассмотрим, как работает этот механизм, на примере супа. По мере образования везикул EZ-оболочки будут захватывать любую жидкость, оказавшуюся поблизости. Обычно эта жидкость представляет собой воду (с протонами); однако рядом с вновь образовавшейся исключительной зоной могут оказаться ингредиенты супа. В этом случае везикулы будут содержать молекулы супа.

Выросшие из везикул, содержащих суп, зрелые пузырьки затем лопаются на поверхности и могут высвободить ароматические молекулы. Как следствие вы почувствуете запах супа. Или молекулы могут просто оставаться внутри улетучившихся везикул, которые вы затем вдыхаете. Даже когда суп (или любая другая еда) остывает, вы все равно можете почувствовать запах, если везикулы продолжают улетучиваться (глава 15). Везикулы переносят запах.

14.10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой главе речь идет в основном о слиянии везикул с другими везикулами. Наш главный механистический герой – застежка-молния. Исключающие зоны везикул соединяются этой застежкой, создавая плоские границы между сферами.

Такая плоская граница должна легко лопаться, что приводит к образованию единой более крупной везикулы с утолщенными стенками. Более толстые стенки делают новую везикулу прочнее. Прочность увеличивается с каждым последующим слиянием, повышая вероятность того, что более крупная везикула проживет достаточно долго, чтобы произвести еще более крупные везикулы. Этот повторяющийся процесс способствует росту пузырьков.

На определенном этапе жидкое содержимое везикулы может превратиться в пар. Это происходит, если везикула поглощает достаточное количество лучистой энергии. Поглощенная энергия увеличивает количество ионов гидроксония внутри везикулы, что приводит к повышению внутреннего давления. Если давление возрастет достаточно сильно, то оболочка может разрушиться, что приведет к расширению пузырька. Когда это произойдет, то содержащиеся в нем молекулы воды испытают резкое снижение давления, что приведет к переходу жидкости в пар. Везикулы, заполненные паром, всплывают на поверхность, и начинается кипение.

Критический порог кипения скорее зависит от концентрации везикул, чем от температуры. Когда везикулы образуются в достаточно высокой концентрации, как это бывает в сильно нагретой воде, слияние пузырьков происходит часто. Слившиеся везикулы становятся все более прочными. В какой-то момент дальнейший рост становится практически неизбежным. Тогда большие пузыри могут прорваться через поверхность, создав эффект кипения.

Механизм застежки-молнии, который лежит в основе слияния везикул, имеет и другое применение. Когда капля лежит на плоской поверхности, ее дно уплощается за счет того же механизма. Чем гидрофильнее подстилающая поверхность, тем сильнее уплощена капля и тем ниже ее профиль. Изменение профиля капли, измеряемое по так называемому краевому углу, позволяет легко оценивать степень гидрофильности поверхности.

Везикулы играют важную роль не только при кипении, но и при испарении. В следующей главе я покажу, как это происходит, сопровождая рассказ удивительными и, возможно, даже ошеломляющими доказательствами.



Глава 15

Облака из кофе: поразительная природа испарения

Первую чашку кофе сварили не в кофейне Starbucks. Согласно легенде, эта честь принадлежит эфиопскому пастуху XIII века по имени Калди. Пастух однажды заметил, что его козы выглядят неестественно возбужденными; они только что съели несколько ярко-красных ягод. Калди сам разжевал несколько таких ягод, быстро убедившись в их мощном бодрящем действии.

Гордый своим открытием, Калди принес пригоршню ягод местному мусульманскому священнику. Но священника не обрадовало это открытие. Напротив, он выразил свое осуждение, сердито бросив ягоды в огонь. Нечего тут выдумывать!

Вскоре, однако, от обгоревших ягод начал доноситься заманчивый аромат. Каким-то образом Калди смог тайком спасти несколько сгоревших ягод. Он принес их домой, перемолол зерна, заварил порошок в горячей воде – и вуаля! – вот вам первая в мире чашка кофе.

Горячий кофе воздействует на все наши чувства, включая зрение. Пар поднимается, словно кобра из корзины заклинателя змей (рис. 15.1). Изображение на рис. 15.1 вас не удивит, хотя должно: согласно общепринятому мнению, пар не должен быть видимым, поскольку вещества в газообразной форме обычно не видны.

Что должно случиться, чтобы объект стал видимым? Видимость зависит от рассеяния света. Пары кофе видны, потому что везикулы, составляющие пар, рассеивают падающий свет; ваши глаза улавливают этот свет. Количество рассеянного света зависит от размера везикулы: для заметного рассеяния диаметр везикулы должен быть не меньше длины волны падающего света, или примерно полмикрона. Следовательно, каждая везикула, составляющая пар, должна содержать миллиарды молекул воды.

Есть еще кое-что. Если вы посмотрите на рис. 15.1, то заметите, что пар поднимается неравномерно; он состоит из последовательных «сгустков». Кажется, что поверхность периодически выпускает клубы пара.



Рис. 15.1. Пар поднимается чередой клубов и тонких струй

Каждый сгусток пара состоит из множества везикул, и каждая везикула состоит из огромного количества молекул воды. Следовательно, с каждым выбросом пара увеличивается астрономическое количество молекул воды в воздухе.

С поверхности теплой жидкости также поднимаются узкие струйки пара (видны справа на рис. 15.1). Эти струйки выглядят как тонкие пряди спагетти, вынутые из жидкости; они сохраняют свою форму по мере подъема. Поскольку эти нити видны, они тоже должны содержать множество светорассеивающих элементов, возможно, наполненные водой везикулы.

Эти отчетливые узоры пара возникают не только над поверхностью горячего кофе. Один мой студент заметил похожие узоры в ванной на открытом воздухе в Азии. Прямо из теплой воды один за другим быстро поднимались клубы пара. На самом деле такие клубы не редкость: они поднимаются над любым горячим напитком. Отдельные клубы поднимаются друг за другом и практически не взаимодействуют между собой.

Принято считать, что жидкость теряет по одной молекуле за раз: случайная «порция» кинетической энергии отделяет оказавшуюся на поверхности молекулу от жидкости. Затем эти молекулы, собравшись в достаточно большом количестве, могут «конденсироваться» в видимые облака, которые поднимаются в более прохладный воздух наверху. Однако остается неясным, что заставляет эти разреженные молекулы так быстро конденсироваться, когда они попадают в воздух, и почему конденсация принимает форму отдельных сгустков, а не одного длинного сплошного облака.

В этой главе мы пересмотрим процесс испарения, применяя новые знания о природе воды. Сначала мы исследуем анатомию облаков, поднимающихся из теплых жидкостей, и постараемся понять, что у них внутри. Затем, поскольку облака выходят прямо из жидкости, мы посмотрим, наследуют ли такие облака свойства структур воды. Если так, то почему облака поднимаются последовательными клубками, а не сплошной лентой? И что происходит с везикулами облака после того, как оно рассеивается?

Короче говоря, мы изучим фундаментальную природу испарения.

15.1. АНАТОМИЯ ВОСХОДЯЩЕГО ПАРА

Для исследования пара в лаборатории мы использовали лазерную подсветку. Призма разворачивала лазерный луч в горизонтальную световую плоскость, которую мы расположили параллельно и как можно ближе к поверхности горячей воды, но не касаясь ее. Это позволило нам запечатлеть на видео пар, поднимающийся с поверхности воды [1].

Я вспоминаю эмоционального молодого студента, который шумно ворвался в мой кабинет, чтобы показать мне результаты этого эксперимента. Я был ошеломлен. Кадры видеосъемки показали, что зарождающиеся облака (рис. 15.1) не были аморфными; их горизонтальные сечения содержали отчетливые упорядоченные фрагменты (рис. 15.2). Одни кольцевые структуры примыкали к другим кольцевым структурам, образуя мозаику, похожую на крендель. Остальное пространство было пустым – без пара. Границы мозаики содержали всю испаряющуюся воду.

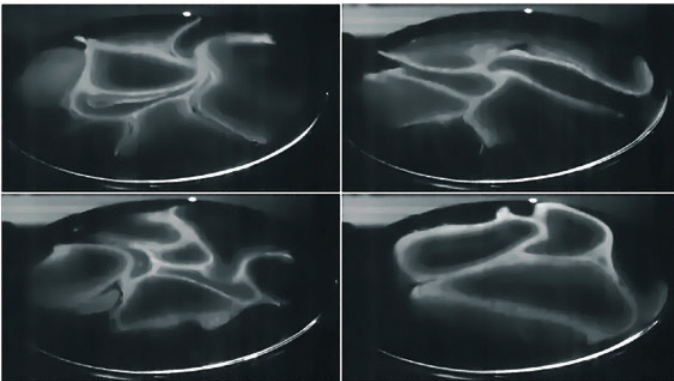


Рис. 15.2. Примеры узоров пара, поднимающегося из теплой воды. Белые кольца представляют собой области с высокой концентрацией везикул, которые образуют видимый пар

Хотя на отдельных снимках эта мозаика выглядит плоской, последовательный набор кадров говорит о другом. Похожие на крендель завитки, видимые в одном кадре, с небольшими вариациями наблюдаются в нескольких кадрах, обычно в течение одной или двух секунд. Затем завиток исчезает. Позже появляется совершенно другой завиток, снова сохраняющийся в течение секунды или двух, пока облако пара поднимается над световой плоскостью.

Эти наблюдения показали, что каждый завиток должен вытягиваться вертикально, как стопка кренделей. Другими словами, облако пара имеет вид связки плотно упакованных трубок, вертикально поднимающихся из теплой жидкости.

Рисунок восходящего пара неустойчив. При движении вверх его трубчатая структура неизбежно деформируется под воздействием локальных конвективных потоков. Издалека эта структура может выглядеть как бесформенное облако, но, приглядевшись, можно заметить пустоты, которые выглядят как темные дыры (например, слабо видны в нижнем облаке на рис. 15.1).

Дельфины кольца



На видеороликах можно видеть, с каким удовольствием играют дельфины [w1]

Кольца из пароподобных структур обнаружены и в других местах. Например, их выдыхают дельфины. Затем дельфины долго играют с парообразными кольцами, по-видимому, для развлечения. Когда кольца, наконец, разрушаются, они превращаются в мириады крошечных пузырьков.

Глубоко удивленные этими открытиями, мы были похожи на впервые познающих мир детей, которые с нетерпением ждут еще больших сюрпризов. И мы их нашли. Вскоре мы заметили, что трубки поднимаются только из ограниченных участков поверхности. Одна область может выпустить облако или нитевидную струйку, в то время как соседние области могут вообще ничего не производить – никакого заметного испарения. Зоны испарения могут со временем смещаться, но в любой момент времени облако может появляться только из определенных участков поверхности.

Эти наблюдения нас поразили. Мы знали, что пар должен содержать везикулы значительного размера, которые заметны невооруженным глазом; мы также почувствовали, что кое-что поняли о структуре пузырьков (глава 14). Однако изображения намекали на нечто большее. Эти пузырьки, казалось, сами по себе собирались в большие трубки, уже сформированные к моменту, когда они отрывались от поверхности воды. Несколько трубок, очевидно, могут сохранять форму, пока поднимаются в воздух, хотя множество везикул,

составляющих трубки, по-видимому, рассеиваются, образуя видимое облако над жидкостью.

Трубчатые структуры пара не возникают по волшебству. Поскольку они поднимаются непосредственно из воды, можно предположить, что вода содержит шаблоны соответствующих структур, которые затем формируют узоры из пара. Нас охватило любопытство: существуют ли такие водные структуры?

15.2. ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ШАБЛОНЫ В ЖИДКОСТЯХ

Вы много раз смотрели на поверхность теплой воды. Она выглядит идеально ровной и безликой. Однако экспериментальные наблюдения говорят о другом. Например, инфракрасные снимки, сделанные сверху над теплой водой, показывают кольцевые мозаичные структуры, очень похожие на структуры, наблюдаемые в паре. На рис. 15.3 показан пример таких структур. Позже (рис. 15.11) мы представим доказательства того, что эти кольца являются вершинами трубчатых структур, которые уходят далеко в глубину воды.

Темные границы на снимках воды соответствуют светлым границам на снимках пара (сравните рис. 15.2 и 15.3). Те и другие границы содержат воду. Если бы несколько смежных темных колец, видимых в воде, могли каким-то образом ускользнуть в воздух наверху, они бы образовали узоры пара, подобные тем, которые мы наблюдали. Конечно, вода в емкости внизу существует в виде жидкости, а над ней витает в виде пара – проблема, которую мы должны решить. Тем не менее сходство между структурами жидкости и пара кажется слишком очевидным, чтобы игнорировать его.

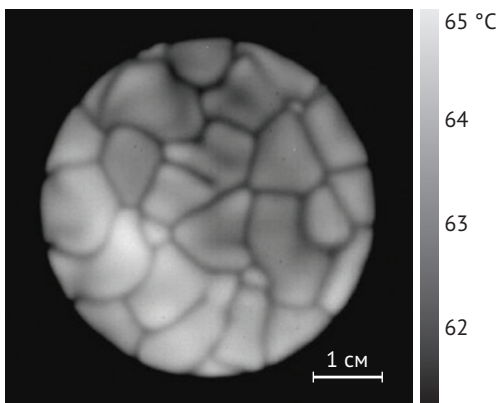
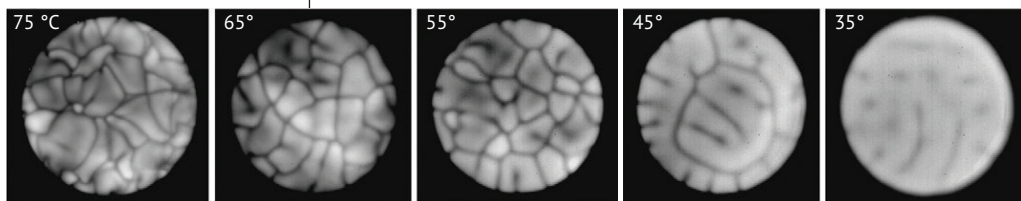


Рис. 15.3. Инфракрасное изображение блюда с теплой водой, снятое сверху. Справа шкала эквивалентной температуры

Рис. 15.4. Последовательные снимки инфракрасной камерой фрагментов водной поверхности при различных температурах



Мы также видели несколько относительно небольших граничных колец (например, вверху справа, рис. 15.3); если такие крохотные кольца вырвутся из жидкости, они могут образовать нити, похожие на спагетти, которые также состоят из пара (рис. 15.1).

Таким образом, характерные структуры, присущие пару, присутствуют и в воде. Это соответствие справедливо в широком диапазоне температур. При более высоких температурах ячейки в жидкости меньше, динамичнее и многочисленнее (рис. 15.4). Эти свойства можно объяснить: более высокая скорость испарения при повышенных температурах означает большее количество везикул, испаряющихся из воды, и, следовательно, большее количество более динамичных пузырьков внутри воды. Таким образом, структура пара и воды взаимосвязана.

15.3. ПРОИСХОЖДЕНИЕ МОЗАИКИ В ВОДЕ

Каким образом в воде возникают характерные узоры мозаики?

Мы наблюдали эти узоры с помощью инфракрасной камеры. Более темные части изображения представляют собой области, излучающие меньше инфракрасной энергии. Это означает, что границы излучают меньше инфракрасной энергии, чем окружающие их области. Можно сказать, что границы «холоднее».

Действительно, традиционная интерпретация инфракрасных изображений основана на температуре. Эта интерпретация стала настолько привычной, что производители ИК-камер предоставляют удобные шкалы температуры, наподобие тех, что показаны справа на рис. 15.3. Согласно этой шкале, температура границ мозаики на изображении составляет около 62 °С, а более светлые внутренние зоны будут ближе к 64 или 65 °С. Эталонная шкала дает нам удобное толкование – хотя и может ввести в заблуждение, о чем я сейчас расскажу.

Такие узоры, как те, что показаны на рис. 15.3 и 15.4, на самом деле хорошо известны узким специалистам как ячейки Рэлея–Бенара. Такие ячейки были иссле-

дованы во многих жидкостях и, в меньшей степени, в воде [2].

Обычно считается, что эти ячейки возникают вследствие резких перепадов температуры. Аргумент таков: нагретая вода на дне емкости имеет меньшую плотность, чем вода наверху; следовательно, придонная вода должна подняться. Когда вода достигает вершины и испаряется, приповерхностные молекулы воды охлаждаются, поскольку испарение – это процесс охлаждения. Охлажденная, более плотная вода стремительно опускается. Снижение происходит на периферии каждой ячейки, образуя холодные (темные) граничные кольца. Как видите, обычное толкование дает нам вполне обоснованное понимание происходящего. Действительно, здесь видны направленные вверх и вниз потоки.

Однако возможны и другие интерпретации, особенно с учетом неоднозначности понятия температуры (глава 10). Одна из правдоподобных альтернатив заключается в упорядочивании. Более упорядоченный материал границ может излучать меньше, чем область, которую он охватывает. Заряды меньше перемещаются в упорядоченной зоне, и это ограничение подвижности зарядов приводит к уменьшению инфракрасного излучения.

В подтверждение данной точки зрения прошу вас вернуться к инфракрасному снимку на рис. 3.14. Исключающая зона темнее, чем прилегающая объемная вода, потому что ее упорядоченная структура излучает меньше инфракрасной энергии. То же самое можно сказать и здесь. Темная граница мозаики может состоять из материала исключавшей зоны, который излучает меньше инфракрасной энергии из-за его упорядоченной жидкокристаллической структуры.

Чтобы определить, какой вариант ближе к истине, мы применили простую стратегию. Мы проверили, можно ли увидеть узоры мозаики в обычном видимом свете. Камеры, снимающие в видимом свете, создают изображения на основе оптических, а не тепловых характеристик. (На самом деле температура немного влияет на оптические свойства воды, но этот эффект незначителен в интересующем нас диапазоне в несколько градусов.) В любом случае, если можно увидеть мозаику невооруженным глазом или запечатлеть ее с помощью обычной камеры, это противоречит объяснениям, основанным на температуре, и укрепляет версию, основанную на свойствах исключавшей зоны.

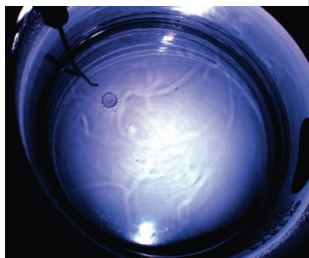


Рис. 15.5. Мозаичный узор в горшочке с теплой водой (вверху) и в чашке с теплой водой (внизу). Фотографии сделаны обычными фотоаппаратами



Рис. 15.6. Рисунок мозаики при освещении поверхности воды видимым светом под малым углом

Снимки на рис. 15.5 подтверждают, что узоры прекрасно обнаруживаются в видимом свете. Эти узоры выглядят менее контрастными, чем те, что получены с помощью ИК-камеры, но зато вы можете увидеть их невооруженным глазом или сделать снимок с помощью обычной камеры.

Фотоснимок на рис. 15.6 дает нам еще более четкую картину. Мы получили это изображение кастрюли с теплой водой, осветив ее обычным видимым светом под очень малым углом падения. Контрастный рисунок создан лучами света, рассеянного поверхностными пузырьками, концентрация которых в светлых и темных областях, очевидно, существенно различается. Полученные таким способом изображения мозаики по существу идентичны изображениям, полученным аналогичным образом, но в инфракрасном диапазоне [1].

Очевидно, границы, видимые на всех этих изображениях, представляют собой нечто, сильно отличающееся от объемной воды. Хороший кандидат – вода исключаяющей зоны. Оптические свойства такой воды отличаются от свойств объемной воды, по крайней мере, по двум параметрам. Во-первых, отличается поглощение света [3]. Во-вторых, отличается показатель преломления – коэффициент преломления исключаяющей зоны примерно на 10 % выше, чем у объемной воды [4, 5]. Такая разница оптических свойств вполне может послужить причиной отчетливого контраста между не EZ- и EZ-областями.

Интерпретация на основе исключаяющей зоны выглядит уместной. Однако один вопрос остался без ответа. Помните вертикальные потоки? Эти потоки были жизненно важны для общепринятой интерпретации, и они, безусловно, существуют. Укладываются ли эти потоки в рамки новых объяснений? Если да, то что их создает и какую роль они могут сыграть?

15.3.1. Вещество исключаяющей зоны и вертикальные потоки

Чтобы собрать информацию о вертикальных потоках, мы изучили мозаики, наблюдаемые в различных жидкостях, содержащих воду. Для этой цели хорошо подошли супы, потому что взвешенные частицы пищи часто отчетливо видны и, следовательно, их можно отследить. Особенно подходящим оказался теплый суп мисо, поскольку он демонстрирует отчетливые линии мозаики, подобные тем, что мы видели раньше (рис. 15.7).

Наблюдение за узорами мозаики в супе мисо стало главным занятием нашей лаборатории. Все углубились в поиски и вскоре выявили две важные особенности. Во-первых, границы были более прозрачными, чем внутренние области; материал границ, по-видимому, исключает частицы супа, которые остаются взвешенными внутри ячеек. Это характерное свойство немедленно навело нас на мысль о том, что граница состоит из некоего EZ-материала.

Второе наблюдаемое явление заключалось в том, что частицы супа постоянно движутся – вверх внутри каждой ячейки и вниз по ее периферии. Потоки напоминают циркуляционные ванны. Границы мозаики явно не участвуют в этих потоках; они просто ограничивают каждую циркулирующую область. Так что предсказанные классическим объяснением восходящие и нисходящие потоки действительно присутствуют; однако, насколько мы могли судить, *эти потоки не затрагивают границ*. Визуально «холодные», плотные, достигающие дна границы никуда не текут.

Эти границы достаточно четкие, их можно увидеть даже без вертикальных потоков. На рис. 15.8 показана смесь коровьего и миндального молока в соотношении 50:50, причем каждый компонент перед смешиванием взят из холодильника. Рисунок очень устойчив. Мы не обнаружили никаких восходящих и нисходящих потоков даже после нескольких попыток. По крайней мере, в некоторых жидкостях *восходящие и нисходящие потоки не являются обязательным условием образования мозаики*. Потоки – это второстепенное явление, которое наиболее заметно проявляется при более высоких температурах.

Различные жидкости, за которыми мы наблюдали, не только поддерживали нашу точку зрения, но и утоляли нашу жажду понимания. Простые наблюдения показали, что ключевую роль играет мозаика, а потоки вторичны. Кроме того, прозрачность жидкости между ячейками, наблюдаемая в супе мисо, говорит о том, что материал границ действительно исключает частицы.

Хотя потоки выглядели вторичными по отношению к мозаике, их интенсивность заставляла предположить, что они тоже играют некую роль. В частности, мы хотели понять, как потоки вписываются в общий процесс в случае более горячих жидкостей, которым присущи наиболее выраженные потоки и наибольшее испарение.

Однако сначала мы хотели определить точную природу EZ-материала, из которого состоят границы мозаики.

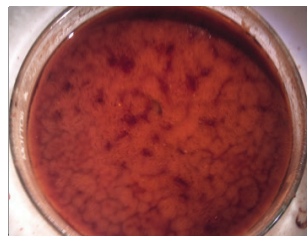


Рис. 15.7. Теплый суп мисо с хорошо заметными линиями мозаики

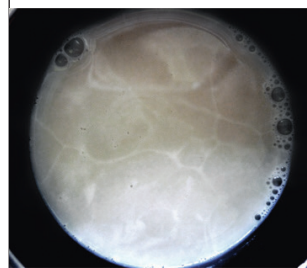


Рис. 15.8. Мозаика, наблюдаемая в холодной смеси коровьего молока (1 % молочного жира) и миндального молока

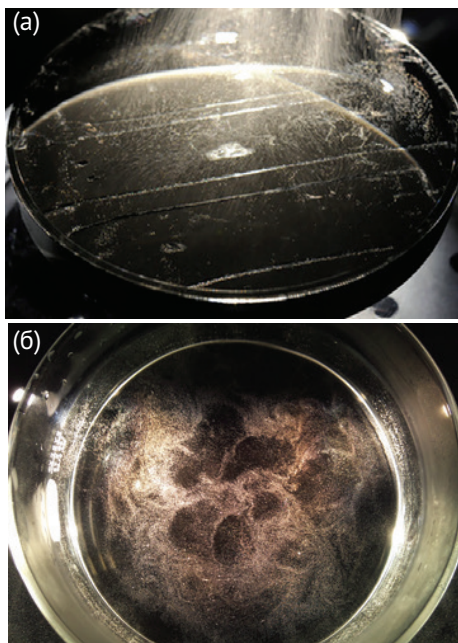
15.3.2. Состав границ водной мозаики

Одним из вариантов материала границы является стандартная исключаящая зона – разновидность структуры, которая покрывает гидрофильные поверхности. Выбор этого варианта кажется почти инстинктивным; однако стандартные исключаящие зоны обычно не образуют большие кольцевидные мозаики, которые мы видели. Так что пока оставим этот вариант про запас.

Второй вариант – мозаика, состоящая из множества везикул, похожая на мозаику пара. Обернутые в слой исключаящей зоны везикулы могут использовать механизм притяжения подобного к подобному для самообъединения в большие массивы, даже в сети. Такие сети будут исключать примеси. Сырье, необходимое для строительства, всегда есть в наличии, так как теплая вода содержит множество везикул (глава 14). Очень горячая вода содержит скопления везикул, и именно в ней возникают наиболее многочисленные мозаики. Так что вариант с везикулами выглядит многообещающим.

На самом деле в мозаике можно различить отдельные везикулы. На рис. 15.9а показаны ранние стадии образования мозаики в теплой воде; видны отдельные везикулы. Везикулы также видны на рис. 15.9б, где показана теплая вода из водопроводного крана. В обоих случаях кольцеобразные границы мозаики, по-видимому, построены из близко расположенных везикул.

Рис. 15.9. Зарождение мозаичных узоров: (а) в емкость налита теплая вода. При внимательном изучении верхней правой части изображения видно, что кольца мозаики сформированы из отдельных везикул; (б) водопроводная вода с температурой 60 °С медленно налита в прозрачную миску. Черная ткань под миской усиливает контраст. Везикулы скапливаются у границ, оставляя ячейки относительно пустыми



Как мы уже говорили, скопления везикул также образуют границы узоров пара. Эти везикулы, обычно называемые аэрозольными каплями, рассеивают свет и делают пар видимым. Рисунок 15.10 подтверждает, что пар состоит из везикул: правильно подобранное освещение позволяет видеть отдельные везикулы, которые образуют границы пара.

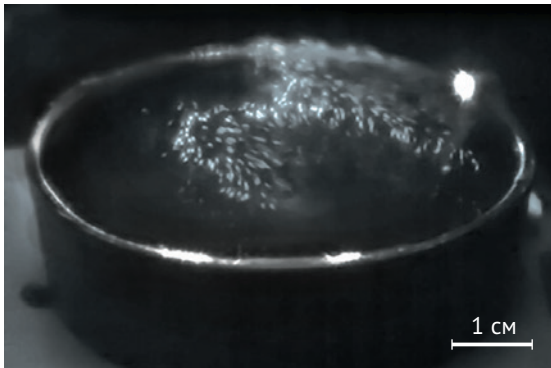


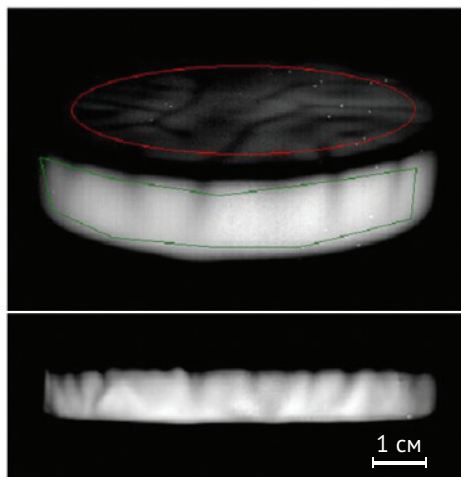
Рис. 15.10. Пар над теплой водой. Благодаря правильно подобранному освещению видна везикулярная структура пара

Следовательно, мозаики из жидкости и пара имеют схожую структуру. Те и другие содержат скопления везикул, расположенных в виде кольцевых структур. Отсюда напрашивается вывод о том, что мозаичные массивы, расположенные в воде, при испарении могут формировать аналогичные массивы в воздухе. Это предположение подтверждено видеозаписями. Они показывают слои везикул, поднимающихся от границ водной мозаики и формирующих границы паровой мозаики [1]. *Следовательно, мозаика воды дает начало мозаике пара.*

15.4. ГЛУБОКИЕ МОЗАИЧНЫЕ СТРУКТУРЫ И ЦИРКУЛЯЦИЯ

Облако испаряющейся воды имеет структуру, вытянутую по вертикали; оно состоит из поднимающихся вверх трубок. Если паровая мозаика возникает из водной мозаики, то водная мозаика также может иметь вертикальную протяженность, поскольку тогда одна структура может легко переходить в другую. Другими словами, водная мозаика может уходить в глубину от поверхности. Снимки на рис. 15.11 подтверждают это предположение. Темные линии границ водной мозаики простираются вниз от поверхности, создавая в воде трубчатые мозаичные структуры, очень похожие на структуры пара.

Рис. 15.11. Вид под углом и сбоку на теплую воду, полученный с помощью инфракрасной камеры. Видны направленные вниз линии



Эти вертикальные линии довольно подвижны. В быстро испаряющейся воде они могут изгибаться или волнообразно ондулировать (колебаться) в направлении дна, как если бы низ линий достаточно свободно перемещался относительно верха. Там постоянно что-то происходит. На видео можно разглядеть подсказку: там виден некий поток, направленный вниз вдоль этих вертикальных линий.

Этот нисходящий поток почти наверняка состоит из везикул. Поскольку емкость в этом эксперименте содержала только чистую воду, именно она должна служить рабочим материалом потока. Везикулы, обильно наполняющие теплую воду, – единственные приемлемые кандидаты. Поэтому кажется очевидным, что везикулы движутся вниз вдоль границ, создавая динамичную систему.

Мы можем сделать вывод о природе этого потока везикул из наших наблюдений за супом мисо (рис. 15.12). Мы обнаружили, что суп движется вверх внутри тела мозаичной ячейки и вниз рядом с ее границами. Предположим, что везикулы в чистой воде следуют аналогичной схеме. Везикулы, образующиеся на дне емкости с теплой водой или рядом с ним (глава 14), будут захвачены потоком. Везикулы могут даже служить движущей силой потока, если интенсивная инфракрасная энергия испаряет их жидкое содержимое и снижает их плотность. Эти близкие по свойствам к пузырькам везикулы должны подниматься вверх. Фактически поднимающиеся везикулы создают заметные холмики в центре верхней части каждой ячейки – вы можете видеть эти холмики в горячем супе мисо. Поверхность жидкости напоминает холмистый ландшафт.

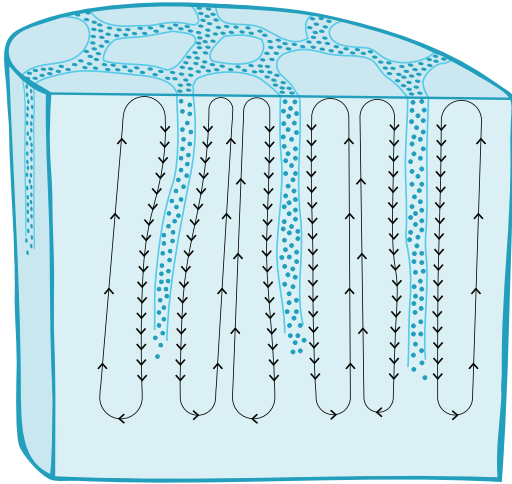


Рис. 15.12. В горячей воде наблюдаются замкнутые потоки. Нисходящие части потоков расположены у границ мозаики

Достигнув вершины, везикулы должны куда-то уйти. Испарение в воздух – это один из возможных путей, но структура пара говорит о том, что этот вариант маловероятен, поскольку мы видим, что испарение происходит только с границ, а не из ячеек. Причина того, что верхние везикулы не испаряются, может заключаться в том, что они охлаждаются из-за близости к прохладному воздуху. Превращаясь обратно в заполненные жидкостью везикулы, они не могут улететь.

Другой вариант для этих везикул – вернуться вниз. Стремясь к границам за счет механизма притяжения подобного к подобному, везикулы сначала будут двигаться радиально. Достигнув границ, они будут опускаться вниз, возможно, подталкиваемые другими везикулами, которые выстроились в очередь за ними. Этот нисходящий поток возникает рядом с граничными стенками – точно так же ведут себя частицы в супе мисо. На снимках ясно видны эти нисходящие везикулы, потому что они собираются около границ.

Нисходящие везикулы играют решающую роль: *они пополняют везикулы мозаики*. Поскольку материал мозаики постоянно теряется в виде пара, его необходимо заменить. Эту роль могут выполнять нисходящие везикулы; привлеченные механизмом притяжения подобного к подобному, они соединяются с существующей стенкой из везикул. При надлежащем пополнении мозаика может поддерживать себя, и испарение не ослабевает. Эти потоки нужны мозаичной структуре для поддержания своего существования.

Вертикальные потоки также имеют смысл с энергетической точки зрения. Вода сначала становится теплой, потому что поглощает лучистую энергию. Эта поглощенная энергия выводит воду из равновесия с окружающей средой. Чтобы вернуться к равновесию, вода должна отдать энергию. Она может добиться этого, излучая энергию или выполняя работу. Потоки делают и то, и другое. Молекулы воды действительно работают, поскольку они преодолевают трение молекул, чтобы течь; это требует затрат энергии, выраженных в работе. Поток также может генерировать лучистую энергию, так как заряженные везикулы быстро перемещаются через воду. Таким образом, вертикальные потоки служат механизмом высвобождения избыточной энергии – еще один пример роли воды как преобразователя энергии (см. главу 7).

Из этих соображений вытекают два вывода. Во-первых, водная мозаика – это трехмерная сущность, как и мозаика из пара; они обе представляют собой композиты из вертикальных трубок. Во-вторых, трубки водной мозаики постоянно возобновляются: по мере того как содержимое трубок поднимается вверх, чтобы создать пар, новые везикулы, стекающие вниз по стенке ячейки, пополняют это содержимое. Пополнение позволяет продолжаться процессу испарения.

15.5. ПРОЦЕСС ИСПАРЕНИЯ

Что же тогда вызывает образование клубов пара?

Этот вопрос заставляет нас вернуться к более общему вопросу: какая энергия вызывает испарение? Поскольку вода испаряется быстрее всего под воздействием тепла или солнечного света, хорошим кандидатом должна быть лучистая энергия. В предыдущей главе мы рассмотрели правдоподобный сценарий: лучистая энергия создает исключаящие зоны везикул; эти зоны выделяют внутрь везикул протоны, которые повышают внутреннее давление; повышенное внутреннее давление может затем расширить везикулы, превратив их жидкое содержимое в пар; наполненные паром везикулы затем улетучиваются. Итак, лучистая энергия вызывает испарение.

Но что заставляет везикулы подниматься в воздух? Везикулы, заполненные паром, безусловно, менее плотные, чем везикулы, заполненные жидкостью; возможно, их заставляет подниматься низкая плотность. Однако уменьшение внутренней плотности не служит исчерпывающим объяснением, поскольку везикулы имеют оболочки. Оболочка состоит из плотного материала исключаяющей зоны, более плотного, чем жидкая вода. В зависимости от соотношения масс оболочки и внутренней части везикулы вполне могут оставаться более плотными, чем воздух. Похоже, что для продвижения везикул вверх необходимо нечто более существенное, чем уменьшение плотности.

Этой движущей силой вполне могут быть заряды. Поясню свою мысль с небольшим отступлением.

Представьте себе испарившиеся везикулы, поднимающиеся высоко в атмосферу. Такие везикулы, часто называемые аэрозольными частицами, могут со временем конденсироваться с образованием облаков. Вода, содержащаяся в этих облаках, может быть очень тяжелой – мой коллега, изучающий атмосферу, оценивает вес облаков не в килограммах, а в более простых для понимания единицах: слонах. В большом кучево-дождевом облаке общий вес аэрозольных частиц может достигать пятнадцати миллионов слонов. Все эти слоны висят над нами в небе (и это отличный повод иметь при себе прочный зонт).

Такое гигантское количество воды в конечном итоге обрушивается на землю, когда идет дождь. Кажется, у облачных везикул есть два очевидных варианта – упасть или не упасть. Падение означает, что уменьшилась некая сила, которая поддерживала частицы высоко в небе. Что, если это та же самая сила, которая заставляет везикулы подниматься от поверхности воды?

Эта подъемная сила может быть электростатической, т.е. основанной на зарядах. Как вы помните, везикулы обладают отрицательным зарядом (глава 14). Сам по себе отрицательный заряд не может объяснить подъемную силу; однако Земля также несет отрицательный заряд (см. главу 9). Отрицательный заряд Земли может отталкивать везикулы, толкая их вверх. Эта восходящая сила может способствовать повышению уровня испарения (рис. 15.13).



Рис. 15.13. Отрицательно заряженные везикулы отталкиваются от поверхности Земли

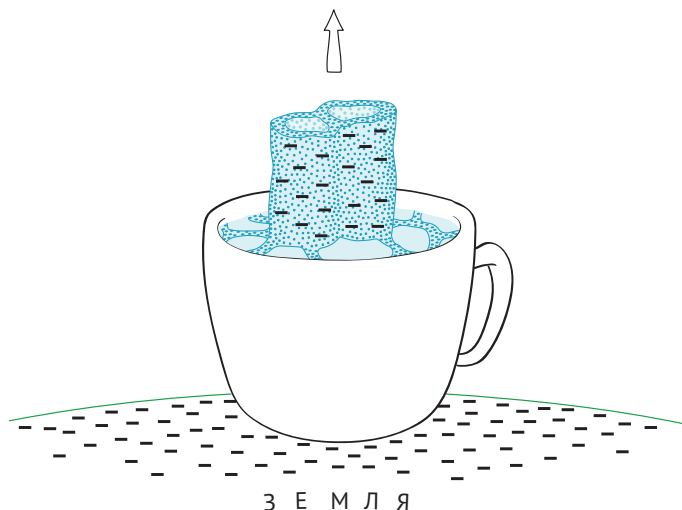


Рис. 15.14. Ниагарский водопад [w2]. Обратите внимание на постоянно поднимающееся вверх облако капель воды

Широко известный пример этой электростатической подъемной силы можно увидеть в водопадах. Падающая вода создает туман из капель, которые поднимаются вверх, образуя облака. Такие облака могут подниматься над вершинами водопадов (рис. 15.14). Поскольку капли не могут механически отскокнуть *выше* уровня, с которого они упали, их заставляет подниматься какая-то другая сила, и хорошим вариантом является электростатический заряд. Подъемная сила, возникающая из-за отрицательного заряда капель, может иметь ту же природу, что и подъемная сила, которая удерживает облака с их слоновьим весом, и, возможно, такая же сила толкает трубчатые структуры вверх. Этим трубчатым структурам просто нужно накопить достаточно отрицательного заряда, чтобы облегчить подъем.

Опираясь на механизм, обусловленный зарядами, мы можем понять, почему пар поднимается отдельными клубами. Мозаичные трубки обладают отрицательным зарядом, потому что составляющие их везикулы несут отрицательный заряд. Протоны, расположенные между везикулами, ослабляют отталкивание отрицательных зарядов; тем не менее аттракторы типа «подобное стремится к подобному» представляют собой локальные связи, вносящие лишь скромный положительный заряд. Поэтому трубки в целом сохраняют отрицательный заряд. По мере того как адсорбируется все больше и больше везикул, отрицательный заряд увеличивается, а внутреннее отталкивание усиливается. Когда внутренняя сила отталкивания превышает

ет критический порог, трубка буквально разрывается на части в самом слабом месте. Затем верхняя часть может подняться вверх, отталкиваясь от отрицательно заряженных везикул внизу, а также, в конечном счете, от отрицательно заряженной земли.

Этот процесс, основанный на заряде, создает отдельные сгустки пара. Процесс *катастрофичен*; то есть он происходит из-за нестабильности скоплений заряда, которая заставляет некоторую часть мозаичной матрицы покидать поверхность. Затем процесс может повториться, образуя знакомую последовательность клубков пара – подобных тем, которые поднимаются от чашки горячего кофе.

15.6. ЗАВЕРШЕНИЕ ЦИКЛА ИСПАРЕНИЯ

Облака пара, поднимающиеся от горячего кофе, в конце концов исчезают; они растворяются в воздухе, поднимаясь наверх. Возникает справедливый вопрос, почему это происходит и как растворяются облака. Что происходит дальше?

На ум приходят два возможных объяснения исчезновения облаков: распадается совокупность везикул или разрушаются сами везикулы. Мы можем представить разрушение везикул, но физический механизм этого явления не так уж очевиден. Распад скоплений везикул проще представить, потому что положительные заряды, связывающие везикулы, могут легко рассеиваться в воздухе. Везикулы будут освобождены, но не повреждены.

После освобождения везикулы должны расплыться. Одиночные везикулы легко ускользают от обнаружения: хотя отдельные везикулы действительно рассеивают свет, вы можете не заметить небольшое количество света, рассеянного сильно рассредоточенными везикулами. Однако во влажном летнем воздухе картина иная. Везикулы в более высоких концентрациях должны заметно рассеивать свет, что объясняет часто наблюдаемую в этот сезон дымку. Этот рассеянный свет размывает виды вдаль, словно мы пытаемся смотреть сквозь тонкое облако.

Рассеивание пара наводит нас на другую мысль: рассредоточенные везикулы готовы образовывать облака. Везикулам просто нужно собраться вместе (как в теплой воде). Этот процесс несложен – он не требует ничего, кроме наличия некоторого положительного заряда, – но в интересах краткости я приведу подробное описание этого процесса в другой раз.

Заряд везикулы и капельница Кельвина



Щелк! Электрический разряд проскакивает между двумя металлическими стаканами, заполненными водой из одного источника. Выглядит странно – но это демонстрация капельницы Кельвина (глава 1). Наблюдаемый разряд свидетельствует о способности падающих капель переносить заряд.

Вот как работает эта установка. Предположим, что первая падающая капля содержит лишь незначительный заряд, скажем отрицательный. Если эта капля упадет в левый стакан, то он получит некоторый отрицательный заряд.

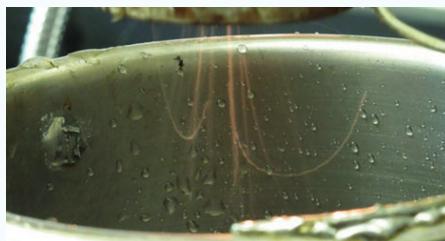
В эксперименте Кельвина все стаканы и кольца металлические; они проводят электричество. Если левый стакан приобретает отрицательный заряд, то правое кольцо также будет заряжено отрицательно (см. рисунок сверху). Отрицательный заряд правого кольца – ключевой момент – индуцирует равный по величине и противоположный по знаку заряд на зарождающейся капле воды, висящей чуть выше. (Индукция противоположного заряда относится к основным законам электростатики.) Кончик этой капли воды, которая вот-вот упадет, приобретет положительный заряд. Когда капля упадет в правый стакан, он приобретет некоторый положительный заряд.

Положительный заряд правого стакана, в свою очередь, придаст положительный потенциал левому кольцу, что приведет к индуцированию отрицательного заряда левой капли. Таким образом, следующая капля слева будет нести отрицательный заряд.

Итак, каждая капля, попадающая в левый стакан, будет добавлять отрицательный заряд, в то время как каждая капля, попадающая в правый стакан, будет добавлять положительный заряд. По мере накопления заряда в каждом стакане и, следовательно, в каждом кольце эффект индукции будет усиливаться. В конце концов, стаканы накапливают такую разность потенциалов, что между ними происходит электрический разряд.

Помимо впечатляющего щелчка, наблюдается интересный побочный эффект, связанный с поведением капель в движении. Капли ощущают возрастающий заряд и начинают отклоняться от стакана. Капли могут даже подниматься вверх и часто не попадают в нужный стакан (см. рисунок внизу). Это говорит о том, что электростатические эффекты могут быть достаточно сильными, чтобы противостоять гравитации.

Данное наблюдение подтверждает предположение о том, что подъем везикул из теплой воды может быть вызван электростатическим взаимодействием. Очевидно, электрические силы могут толкать капельки жидкости вверх.



Капли, попадающие в стакан установки Кельвина, светятся красным светом. Когда вода в стакане приобретает достаточный заряд, падающие капли отталкиваются вверх

Мы видели, что везикулы обеспечивают непрерывность процесса. Сначала везикулы образуются в воде; они поднимаются в виде пара, рассеиваются, образуют облака и в конечном итоге сливаются друг с другом, образуя капли дождя, которые возвращаются обратно на землю, чтобы завершить цикл. Таким образом, механизм движения везикул может быть центральным элементом круговорота воды и, следовательно, центральным элементом любой погоды.

15.7. СЕТКА ОТ НАСЕКОМЫХ И ВОЗДУШНЫЙ ПОТОК

Несмотря на искушение закончить эту главу прямо сейчас, мне хочется хотя бы вкратце порассуждать о том, что происходит с везикулами, рассеянными в воздухе. Некоторые из этих везикул со временем могут конденсироваться в облака. Вы можете подумать, что все остальные везикулы должны оставаться в воздухе, паря бесцельно и независимо, как детские мыльные пузыри.

Какой бы очаровательной ни казалась эта картина, сценарий безмятежного парения везикул выглядит нереальным. Можно назвать как минимум две причины для вероятного взаимодействия везикул с воздухом. Сначала одиночная везикула приобретает заряд; заряженные везикулы неизбежно будут стремиться к любым объектам с противоположным зарядом и прилипнуть к ним, а атмосфера содержит множество таких объектов. Во-вторых, сами молекулы воздуха демонстрируют склонность к образованию связей с заряженными везикулами. Именно это последнее явление я хочу детально рассмотреть ниже, потому что такие связи выглядят неожиданными.

Чтобы убедиться в наличии этих связей, проведите следующий эксперимент (рис. 15.15). В влажный день обратите внимание на легкий ветерок, дующий в открытое окно вашего дома. Теперь вставьте в оконную раму сетку от насекомых и обратите внимание на уменьшение скорости ветра. Несколько коллег рассказали мне об этом явлении. По моему собственному опыту дома, скорость потока воздуха с подветренной стороны существенно упала. Грубые измерения показали, что скорость потока уменьшилась примерно вдвое. Вы ожидаете некоторого снижения скорости, потому что материал сетки частично перекрывает оконный проем; однако этот материал на моем окне перекрывает только 10...15 % площади, что совсем

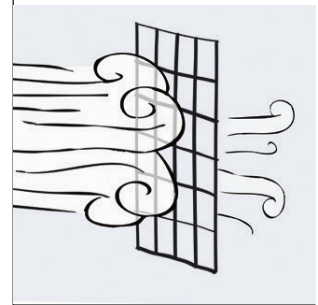


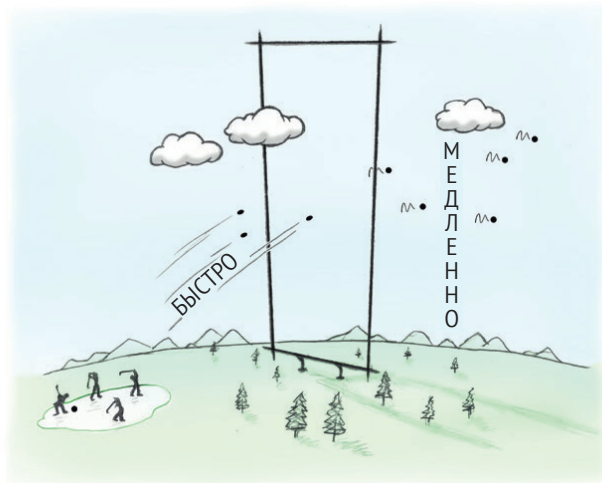
Рис. 15.15. Обычные оконные сетки от насекомых уменьшают поток влажного воздуха больше, чем ожидалось

не пропорционально падению скорости. Похоже, что происходит что-то еще.

Позвольте мне рассмотреть ситуацию с количественной точки зрения. Молекулы воздуха измеряются в нанометрах, а отверстия экрана – в миллиметрах. Это разница в миллион раз.

Чтобы наглядно оценить разницу размеров, представьте себе сетку с отверстиями размером с гору. Предположим, вы вырезали один из этих огромных прямоугольных блоков и поставили его вертикально на ребро (рис. 15.16). Теперь представьте, что когда вы бросаете мячи для гольфа через отверстие, то обнаруживаете, что простого присутствия границ этой ячейки достаточно, чтобы замедлить все проходящие мячи, – и, когда вы уберете границу, скорость вернется к норме. Как бы странно это ни выглядело, то же самое происходит, когда молекулы воздуха проходят через сетку от насекомых. Соотношение размеров аналогично.

Рис. 15.16. Аналогия с сеткой от насекомых. Несмотря на то что ячейка сетки очень велика, ее присутствие замедляет движение мячей для гольфа



Завихрения могут играть некоторую роль в замедлении потока, но снижение скорости выглядит слишком впечатляющим, чтобы его можно было объяснить столь локальным эффектом. Кажется, происходит что-то еще. Нетрадиционная версия: предположим, что молекулы воздуха связаны друг с другом, образуя рыхлую сеть. Тогда любая молекула, столкнувшаяся с материалом сетки, замедлит все остальные молекулы.

Конечно, теоретически молекулы воздуха не должны быть связаны между собой: само определение газа заключается в независимости молекул – по крайней мере, идеального газа. Однако результат наблюдений

требует объяснения, и вероятность того, что теоретически независимые молекулы могут быть связаны между собой, заслуживает внимания. Могут ли испарившиеся вещества инициировать такие связи?

15.8. СУЩЕСТВУЮТ ЛИ СВЯЗИ МЕЖДУ МОЛЕКУЛАМИ ВОЗДУХА?

Участники процесса испарения включают как везикулы, так и протонный клей, который поднимается вместе с ними. Если везикулы рассеиваются в воздухе, то могут рассеяться и протоны. Поначалу эти протоны выглядели привлекательными кандидатами на роль организаторов связей: их положительный заряд мог связывать электроотрицательные участки на молекулах азота и кислорода в воздухе. Однако, несмотря на многообещающую способность, протонные связи могут создавать только молекулярные пары, но этого слишком мало; столь заметное торможение воздуха подразумевает наличие обширных связей между молекулами.

Тем не менее размышления о возможных протонных связях заставили нас вспомнить давно известный парадокс, который внезапно стал актуальным. Этот парадокс заключается в постоянном соотношении азота и кислорода. По объему сухой воздух содержит 78,09 % азота и 20,95 % кислорода. Коэффициент 3,727. В то время как концентрации газовых примесей, таких как аргон и углекислый газ, могут широко варьироваться от места к месту и время от времени, отношение кислорода к азоту остается постоянным – с точностью до четырех значащих цифр [w3]. Это чрезвычайно стабильное соотношение.

Это постоянство, вероятно, сохраняется повсюду – в городах, на фермах, на вершинах гор, в пустынях, над океанами. Соотношение сохраняется даже в таких местах, как зимняя Сибирь, где фотосинтез, безусловно, дает гораздо меньше кислорода, чем в джунглях Амазонки. Фактически это соотношение остается настолько неизменным, что ученые, изучающие атмосферу, усердно работают над разработкой инструментов, которые повышают точность измерения с четырех значащих цифр до пяти; успех разработки может облегчить поиск даже незначительных различий в содержании кислорода.

Возможное объяснение данного постоянства состоит в том, что круговорот этих газов на Земле незначителен по сравнению с общим содержанием в атмосфере;



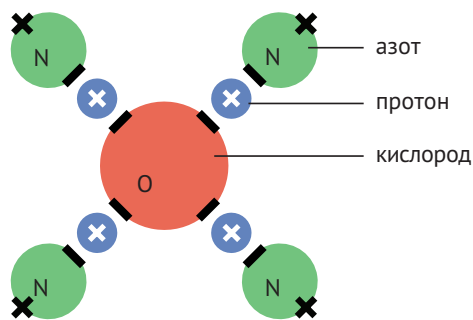
Рис. 15.17. Упрощенная схема возможных газовых связей (не в масштабе). Протоны могут связывать электроотрицательные участки кислорода и азота, создавая стехиометрические связи, подобные изображенной здесь. Фактическое количество молекул будет больше

то есть огромная флора, покрывающая Землю и производящая кислород, может не иметь большого значения. Хотя, пожалуй, это объяснение плохо согласуется с нынешними представлениями о том, что атмосферный кислород на самом деле *произошел* от флоры.

Другое возможное объяснение – и здесь я углубляюсь в предположения – заключается в том, что азот и кислород образуют стехиометрические комплексы, то есть комплексы, содержащие фиксированные отношения кислорода к азоту. Комплексы такого рода известны как газовые клатраты. Они обычно содержат фиксированное количество молекул газа, заключенных в решетчатые структуры из молекул воды. В данном случае комплексы будут содержать фиксированное количество молекул азота и кислорода – электроотрицательных единиц, удерживаемых вместе положительными протонами.

Но сколько молекул?

Клатраты газа обычно содержат до десятков молекул. В воздухе отношение азота к кислороду составляет около 4:1 по объему; если бы соотношение молекул было точно 4:1, то клатрат мог бы содержать только пять молекул (рис. 15.17). Это один из вариантов. При других целочисленных соотношениях будут получены более крупные числа с другим расположением молекул, но суть останется той же: стехиометрические комплексы азота и кислорода.



Кроме того, если бы вероятность образования такого комплекса была высока, то практически все молекулы азота и кислорода воздуха могли бы образовать подобные комплексы; соотношение азота и кислорода в этом случае останется неизменным в пространстве и времени, что мы и наблюдаем.

Достоинством клатратной гипотезы является то, что она объясняет наличие известного положительного заряда атмосферы. Ученые знают об этом поло-

жительном заряде, но не знают его происхождения. Источниками заряда могут быть протоны, высвобождающиеся при испарении. Эти освобожденные заряды могут участвовать в создании молекулярных связей, способствуя постоянству газового отношения.

Решая эту локальную проблему, протоны по-прежнему не дают ответа на вопрос о протяженных связях между молекулами газа. Здесь может вступить в игру другой продукт испарения: везикулы. Отрицательно заряженные везикулы всегда тянутся к положительному заряду. Самый распространенный источник положительного заряда – это открытый конец молекулы азота на внешних краях клатратов (рис. 15.17). Отрицательно заряженные везикулы, прикрепляющиеся к этим положительно заряженным участкам, могут формировать многочисленные связи (рис. 15.18).

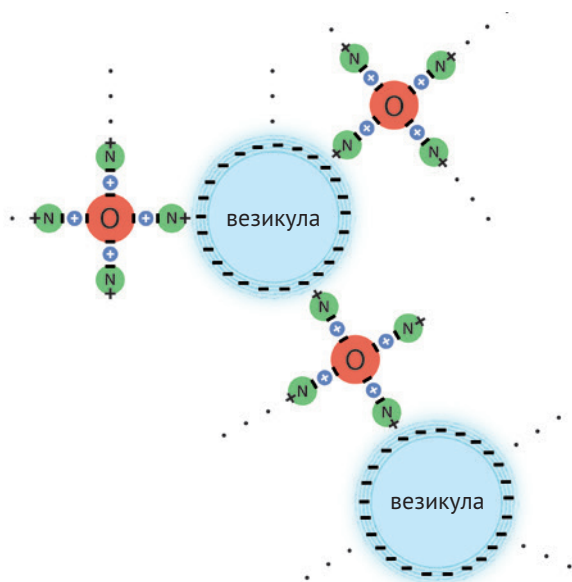


Рис. 15.18. Везикулы могут образовывать слабые связи между кислородно-азотными комплексами, образуя непрерывную структуру

Хотя предполагаемые связи нуждаются в дальнейшем серьезном экспериментальном исследовании, они могут объяснить тормозящий эффект сетки от насекомых. Такие связи должны быть достаточно слабыми, чтобы избежать случайного обнаружения, и в то же время достаточно сильными, чтобы объяснить, почему влажный воздух обычно называют «густым» или «тяжелым». Разветвленные связи, возникшие при посредничестве везикул, также могут объяснить, почему сетки замедляют поток воздуха больше всего при высокой влажности.

15.9. АТМОСФЕРНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ И ТРЕНИЕ

Помимо решения проблемы сетки от насекомых, предполагаемые связи могут помочь объяснить два парадоксальных, но, казалось бы, не связанных между собой явления. Во-первых, это замечательная способность атмосферы передавать радиосигналы.

В детстве я задавался вопросом, как радиоволны, генерируемые в Австралии, могут достигать Бруклина. Эти далекие сигналы улавливал и мой приемник, и приемник моего друга по соседству. Каким-то образом энергия, излучаемая с другого конца света, заполнила местную атмосферу. Даже с учетом того, что радиоволны многократно отражались от ионосферы и земли, я все равно не мог понять, как они могут сохранять силу на таких огромных расстояниях.

Мой примитивный детекторный приемник работал почти так же впечатляюще; он тоже мог принимать радиосигналы, посылаемые с огромных расстояний. Тем не менее у него *не было батарейки*. Эти далекие сигналы должны были нести необходимую энергию, достаточную даже для питания моих наушников. Невероятно! Насколько мне известно, этому паразитическому явлению еще предстоит найти удовлетворительное объяснение.

Вопрос о том, участвуют ли указанные выше связи между молекулами воздуха в передаче радиоволн, остается спорным – даже в большей степени, чем само существование этих связей. Однако такие связи могут образовать сплошной проводящий канал. Сигнал, посланный из Австралии, может перемещаться по этим атмосферным «проводам» почти так же, как по медным проводам. Сигналы могут распространяться практически безгранично. Можно было бы ожидать затухания сигнала, но поскольку падающая лучистая энергия непрерывно питает везикулы, эти везикулы могут служить узлами усиления сигнала, работая наподобие транзистора. В таком случае поступающего сигнала будет достаточно для питания даже пассивных детекторных приемников.

Развивая свои предположения, я готов пойти еще дальше с заявлением, что эти связи могут разрешить еще одну не связанную с атмосферой загадку: почему атмосфера движется синхронно с Землей. Подумайте вот о чем: Земля неукротимо вращается вокруг своей оси. Относительно системы отсчета Вселенной вы ле-



тите со скоростью 1500 км в час, что вдвое превышает скорость реактивного самолета. Воздух вокруг вас явно движется синхронно с поверхностью Земли – иначе вы всегда чувствовали бы ураганный ветер (рис. 15.19).

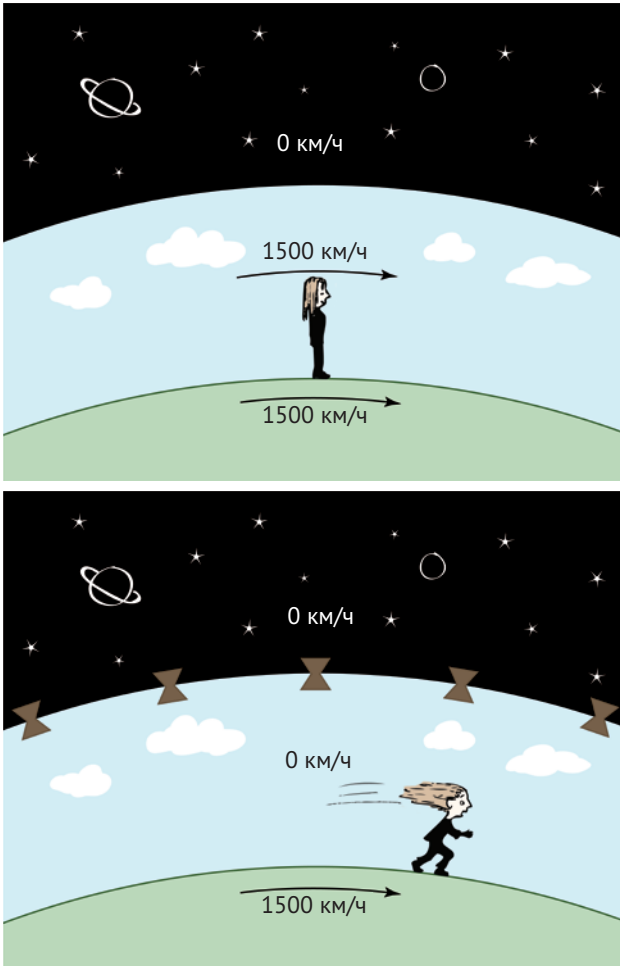


Рис. 15.19. Связь Земля–атмосфера. Атмосфера движется вместе с земной поверхностью (вверху). В отсутствие связи между молекулами воздуха атмосфера могла бы почти не двигаться (внизу). Тогда наземный наблюдатель все время ощущал бы ураганный ветер, дующий с востока на запад

В качестве объяснения, почему воздух движется синхронно с земной поверхностью, вы можете сказать, что... ну... так устроен мир. Когда образовалась Земля, воздух закружился вместе с ней; а из-за инерции воздуха его скорость может оставаться неизменной – точно так же, как скорость Земли. Однако этого объяснения недостаточно: скорость воздуха может меняться практически каждую минуту; поэтому другие факторы должны перевешивать любое инерционное постоянство.

Альтернативным объяснением синхронного вращения является механическая связь: компоненты атмосферы остаются слабо связанными между собой,

но атмосфера связана с Землей посредством трения. Холмы, высокие здания и выступающие горы могут увлекать приземный воздух вместе с землей. Если бы молекулы верхних слоев воздуха не были связаны с молекулами внизу, они стали бы частью космоса. Для земного наблюдателя эти молекулы двигались бы со сверхзвуковой скоростью в направлении, противоположном вращению Земли. Этого никогда не бывает.

Следовательно, механическая связь между воздухом и земной поверхностью должна захватывать даже верхние слои атмосферы. Два объекта должны вращаться как одно целое. Такую связь трудно объяснить, если молекулы воздуха лишь слабо связаны друг с другом. На самом деле если молекулы приземного слоя движутся синхронно с земной поверхностью, то же самое делают и молекулы верхних слоев. Это очень полезная связь, в противном случае мы бы страдали от вечного кошмара завывающих ураганов. Представьте себе рейс из Чикаго в Нью-Йорк, которому нужно преодолевать эти неумные ветры!

Связь между молекулами воздуха также помогает объяснить, почему воздух создает такое сильное трение. Вспомните о метеорах, сгорающих при попадании в атмосферу; вспомните, сколько топлива потребляют самолеты; и представьте себе объекты, падающие с высокого здания и достигающие предельной скорости. Все эти явления возникают в результате трения воздуха, которое, в свою очередь, является результатом наличия связей.

Естественно, взаимодействие «воздух–земля» – это не только связь и трение. Я не стану еще дальше отклоняться от темы данной главы об испарении, но я просто не могу уйти, не упомянув общеизвестный факт: Земля заряжена отрицательно, а атмосфера – положительно. Они притягиваются. Достаточно ли велика эта сила притяжения, чтобы связать воздух с Землей, – вопрос, нуждающийся в будущих исследованиях; она может быть доминирующим фактором и, возможно, даже объясняет так называемое давление воздуха.

Откровенно гипотетический материал нескольких последних разделов был включен в эту главу в основном для того, чтобы поднять вопросы, а не ответить на них. Основная идея главы – это подробное описание малоизвестной и удивительной последовательности событий, связанных с процессом испарения. Будем надеяться, что процессы испарения стали понятнее, особенно скопления везикул, которые регулярно поднимаются из воды, маскируясь под клубы пара.

15.10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Находясь в воде, везикулы самоорганизуются. Они делают это с помощью механизма притяжения подобного к подобному, образуя разветвленные сетевые структуры. Если смотреть сверху, эти структуры напоминают мозаику. Однако ячейки мозаики на самом деле представляют собой трубки, уходящие глубоко в воду. При поглощении достаточного количества лучистой энергии стенки трубки могут приобретать столь большой отрицательный заряд, что могут покинуть поверхность воды по частям или целиком. Восходящие структуры, которые выглядят как клубы пара, одна за другой отрываются от поверхности. Эти возникающие завихрения являются основными элементами испарения.

Как эти события испарения связаны с процессами образования везикул, рассмотренными в предыдущей главе? Здесь решающую роль играет поглощенная энергия. При воздействии инфракрасного излучения (тепла) везикулы образуются в избытке; они движутся вертикально и тем самым увеличивают трубчатую мозаику, которая затем может подниматься в виде пара. Чем больше энергии поглощено, тем быстрее образуются везикулы и все скорее растет мозаика. Следовательно, более высокое потребление энергии приводит к более быстрому испарению.

При еще более высоком уровне инфракрасного излучения формирование везикул может стать настолько быстрым, что некоторые из них не будут успевать присоединиться к мозаике. Эти везикулы могут просто слипаться, превращаться в пузырьки и подниматься на поверхность в результате явления, которое мы знаем как кипение. Кипение является экстремальным случаем испарения; оно происходит настолько хаотично, что регулярная мозаика практически исчезает.

На другом конце теплового диапазона находится прохладная вода. В этом случае можно предположить, что процессы испарения происходят, как описано в данной главе, но с меньшей скоростью. С другой стороны, комнатная температура подразумевает некую стабильность. Эта стабильность сопровождается несколькими неожиданными свойствами, которые мы рассмотрим в следующей главе.



Глава 16

Водяные трамплины: скольжение по поверхности воды

Когда-то метание камней «блинчиком» по воде было излюбленным ритуалом подростков. Когда я был подростком, у метателей камней был особый мотив для участия в состязании – испытание на мужественность, результат которого мог повлиять на ваш успех в соблазнении девушек. Те, чьи камни отскакивали дальше всех, несомненно, считались альфа-самцами.

Почему камушки отскакивают от воды? Конечно, они могут отскакивать от батута, но поверхность воды выглядит совершенно непохожей на такой эластичный материал. Вода – вязкая жидкость, камни не должны с легкостью отскакивать от нее. С другой стороны, когда вода встречается с воздухом, у нее появляется новое свойство: мозаика исключаяющей зоны покрывает поверхность и достаточно глубоко спускается в воду (рис. 15.11). Таким образом, вода на поверхности отличается от объемной воды внизу, что поднимает вопрос о том, могут ли особые свойства поверхности в достаточной степени объяснять отскакивание камней.

В этой главе мы подробно обсудим поверхность воды. Она демонстрирует удивительные механические свойства, которые помогают объяснить ряд явлений, начиная от ходьбы по воде до того, почему плавают корабли, – и здесь мы погружаемся в тему немного глубже, чем Архимед.

16.1. ПОВЕРХНОСТНАЯ ВОДА ОТЛИЧАЕТСЯ ОТ ОБЪЕМНОЙ

Финские прыгуны с трамплина любят тренироваться круглый год. Зимой достаточно снега, чтобы устроить тренировку, а летом возникает проблема. Однако находчивые лыжники импровизируют: они катаются на пластиковых трассах, специально расположенных таким образом, чтобы лыжники приземлялись в воду.

Однако вода не такая мягкая, как может показаться. Падение на воду после прыжка с трамплина мо-



Рис. 16.1.
Свидетельство высокого поверхностного натяжения воды

жет привести к переломам костей, если поверхность не была предварительно размягчена за счет сильного вспенивания. Пузырьки постоянно прорываются через поверхность воды, уменьшая поверхностное натяжение и позволяя лыжникам безопасно приземлиться. Начинающие ныряльщики часто используют аналогичную стратегию; лишь немногие из них получают переломы.

Жесткость водной поверхности не должна вас удивлять, поскольку высокое поверхностное натяжение – одна из известных аномалий воды. Натяжение достаточно велико, чтобы удерживать тяжелые объекты, от стальных булавок и скрепок до старых венгерских монет (рис. 16.1).

Ученые обычно связывают высокое поверхностное натяжение воды с дополнительными водородными связями. Молекулам на поверхности воды не хватает партнеров по объемным связям; эти несостоявшиеся связи можно направить на соседей. Дополнительные боковые связи увеличивают жесткость, создавая высокое поверхностное натяжение.

Толщина поверхностного слоя, содержащего эти дополнительные связи, составляет менее одного нанометра. Чтобы понять, что означает один нанометр, представьте себе ломтик салями толщиной в один миллиметр. Нарежьте его тоньше – в тысячу раз; затем возьмите один из этих ломтиков и разрежьте его в том же направлении еще тысячу раз (если сможете). Эфемерная пленка, составляющая одну десятую толщины клеточной мембраны, по-видимому, служит границей между сломанной шеей ныряльщика и тем, что она останется целой.

Похоже, что для объяснения необычных свойств поверхности воды требуется нечто более важное, чем несколько дополнительных связей в тонкой пленке.

Прогулки по воде



Вода может поддерживать жизнь живых существ, от жуков-водомеров до ящериц из Центральной Америки. Потрясающие видеоролики показывают, как костариканские ящерицы бегают по поверхности пруда [w1]. Поскольку они могут ходить по воде, этих существ прозвали ящерицами Иисуса Христа. Это явление показывает, что естественные водные поверхности могут быть значительно жестче, чем нам кажется.

16.2. EZ-ПОДОБНЫЕ ЗОНЫ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ВОЗДУХ – ВОДА

На поверхности воды действительно есть нечто более значимое – мозаика (глава 15). Эта структура проникает в глубину воды от поверхности, образуя толстый ячеистый слой. Этот ячеистый слой не может не влиять на механические свойства поверхности.

Мы случайно наткнулись на это характерное свойство поверхности – до того, как додумались использовать инфракрасную камеру для изучения ее свойств. В камерах, содержащих воду и микросферы, мы обнаружили свободную от микросфер зону, которая покрывала поверхность воды.

Мы впервые увидели эту прозрачную зону в мензурках. Водная суспензия внутри мензурки изначально была мутной от микросфер. Вскоре, однако, прямо под поверхностью воды образовалась зона, свободная от микросфер, которая оставалась видимой в течение длительного периода времени. Больше, чем эта поверхностная зона, посетителей нашей лаборатории впечатлял разве что появившийся много позже прозрачный цилиндр, вертикально проходящий через центр стакана (рис. 9.12). Этот вертикальный цилиндр спускался из более тонкой прозрачной зоны в форме диска наверху [1].

Верхняя прозрачная зона снова появилась в камере другого типа, созданной путем размещения двух параллельных стеклянных пластинок близко друг к другу и герметизации их по трем краям, чтобы они удерживали воду. Установка напоминала узкий аквариум с рыбой (рис. 16.2). При определенных условиях эксперимента можно было увидеть стабильные прозрачные зоны. Сначала суспензии микросфер выглядели равномерно мутными. Но в течение нескольких минут наверху появлялась зона, свободная от микросфер. Эта прозрачная зона сохранялась около суток, после чего все микросферы оседали на дно.



Рис. 16.2. Прозрачная зона в верхней части суспензии микросфер в камере, состоящей из двух параллельных стеклянных пластинок, герметизированных слева, справа и снизу

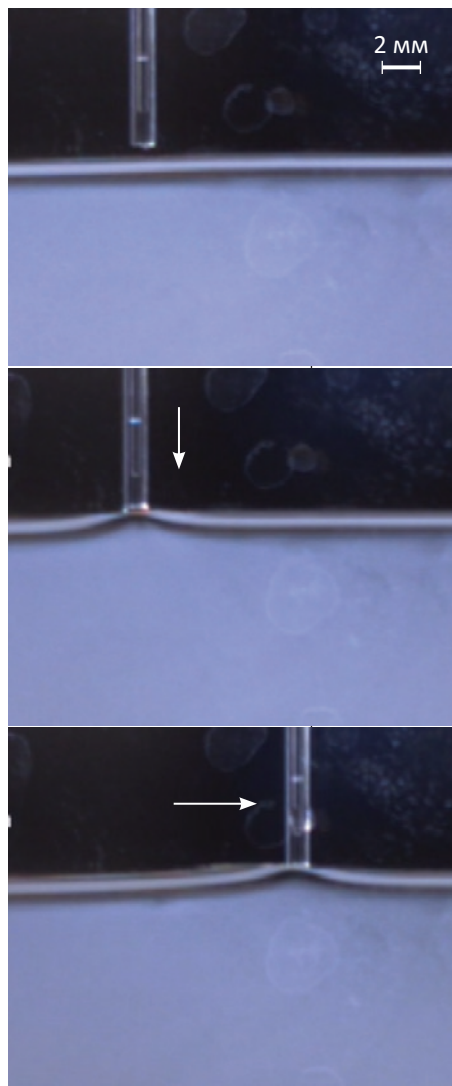


Рис. 16.3. Стекло́нный зонд опускается до касания поверхности воды. Толщина исключяющей зоны практически не изменяется после касания или бокового движения зонда

Таким образом, мы видели подповерхностные чистые зоны как в цилиндрических, так и в прямоугольных камерах задолго до того, как поняли, что они могут соответствовать мозаичным структурам. Эти прозрачные зоны сразу напомнили нам исключяющие зоны. Они исключили из себя микросферы, а вершины этих зон, как мы позже обнаружили, несли отрицательный потенциал. Если подповерхностная чистая зона представлена EZ-веществом, то плотности этой зоны может быть достаточно, чтобы выдержать вес стальных булавок и монет.

Мы быстро убедились в высокой плотности чистой зоны (рис. 16.3). Мы медленно опускали вертикальный стеклянный зонд к поверхности воды. В какой-то момент до того, как он коснулся воды, поверхность взмыла вверх (возможно, из-за индуцированного заряда) навстречу зонду. Во время этого механического воздействия толщина чистой зоны непосредственно под зондом практически не изменилась; она осталась неизменной и при дальнейшем перемещении зонда из стороны в сторону. Чистая зона вела себя как упругая пленка, натянутая по поверхности воды. Поскольку эта пленка имеет толщину в миллионы молекулярных слоев, она должна без труда удерживать довольно тяжелые предметы.

Эта полоса на поверхности, вероятно, соответствовала структуре, рассмотренной в предыдущей главе: чистая зона, если смотреть сбоку; мозаичная структура, если смотреть сверху. Ни одно из представлений по отдельности не дает полной картины; вместе они более полно раскрывают то, что происходит непосредственно под поверхностью воды (рис. 16.4).

Наблюдения в предыдущей главе были получены в основном при изучении горячей воды, в то время как вышеописанные прозрачные зоны мы наблюдали при комнатной температуре. Если два наблюдения отражают одну и ту же структуру, то мы можем предположить, что свойства поверхности при комнатной температуре, по крайней мере, качественно схожи

с теми, что наблюдаются при повышенных температурах: мозаичные исключаяющие зоны, которые покрывают поверхность и заметно углубляются в толщу воды.

Мозаичные зоны состоят в основном из скоплений везикул. Однако они могут также содержать обычный материал исключаяющей зоны, который поступает из двух источников. Во-первых, внешняя граница мозаики ограничена стенкой емкости; стенка могла инициировать строительство исключаяющей зоны, которая впоследствии принимает участие в формировании таких мозаик. Во-вторых, некоторые везикулы могут трансформироваться в стандартный материал исключаяющей зоны за счет механизма застежки-молнии (глава 14). Полученная мозаика будет органично сочетать стандартные и везикулярные исключаяющие зоны, относительное содержание которых будет зависеть от условий окружающей среды.

От условий окружающей среды может также зависеть, какая часть поверхности будет покрыта мозаикой исключаяющей зоны. На рис. 16.4 показана довольно открытая структура с малым заполнением ячеек. Теоретически ячейки мозаики могут быть заполнены намного больше. Степень покрытия поверхности зависит от количества везикул, которое является следствием баланса между образованием везикул, абсорбцией везикул существующей матрицей и потерей везикул за счет испарения. При комнатной температуре ограниченная скорость испарения может изменить этот баланс в сторону заполнения поверхности везикулами, содержащими материал исключаяющей зоны.

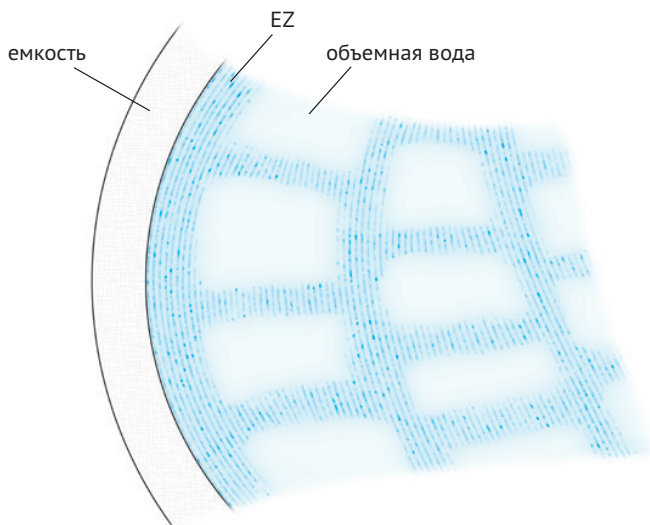


Рис. 16.4. Вид сверху на мозаичную структуру. Если смотреть сбоку, эта структура может казаться чистой зоной у поверхности, особенно если отверстия мозаики, заполненные объемной водой, относительно малы

Несмотря на неопределенность количественных показателей, сетчатая мозаика должна увеличить плотность поверхностного слоя. Эта плотность может объяснить аномально высокое поверхностное натяжение воды.

Плотность также может объяснить сопротивление, с которым сталкиваются ныряльщики с большой высоты. С другой стороны, плотность – это еще не все: когда лыжники или ныряльщики ударяются о поверхность, подстилающая вода должна уйти с дороги; вода вынуждена ускоряться, преодолевая силу инерции, которая удерживает ее на месте. Сетчатый слой тормозит эти молекулы воды, препятствуя их ускорению. Поэтому для ныряльщиков мозаика на поверхности представляет собой двойное препятствие: она делает поверхность жесткой и не дает воде легко уйти с дороги. К счастью, это препятствие можно устранить, постоянно выпуская со дна пузырьки воздуха – обычный прием при нырянии в закрытых помещениях.

16.2.1. Являются ли поверхностные зоны в открытых водоемах более толстыми?

Наблюдения, описанные в предыдущем разделе, в основном проводились в лабораторных условиях. В глубоких естественных водоемах, постоянно подвергающихся воздействию относительно высоких уровней лучистой энергии, могут быть иные условия. Здесь степень заполнения мозаики на поверхности и вертикальная протяженность границ могут отличаться от таковых в лабораторных мензурках. В открытых водоемах эти поверхностные структуры могут простираться значительно глубже.

Указание на большую вертикальную протяженность границ можно найти в отчетах с соревнований фридайверов⁴. Остановив дыхание на восемь или девять минут (!), эти спортсмены могут спуститься на глубину более 100 метров, перед тем как всплыть на поверхность. Они постоянно сообщают о физическом переходе на глубине от 15 до 20 метров. Выше этой глубины тело находится как бы во взвешенном состоянии, а ниже ныряльщик, как говорят, тонет, как камень.

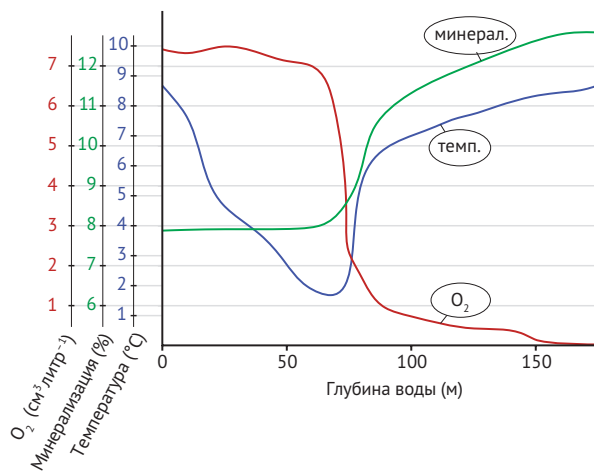
⁴ Ныряльщики на большую глубину, не использующие водолазное снаряжение. – *Прим. перев.*

Эта ситуация напоминает поведение булавки в стакане с водой: она может плавать, если ее аккуратно положить на поверхность, но при незначительном насильственном погружении булавка легко тонет. Эта точка перехода находится в миллиметрах от вершины; в случае с фридайверами подобная точка перехода, кажется, расположена на глубине нескольких метров от поверхности.

Второе подтверждение распространения мозаики на большую глубину исходит от морских инженеров, работающих с гидролокатором. Звук, направленный строго вниз, обычно достигает дна моря. Но если звук направлен под углом, он отражается от неоднородности где-то под поверхностью и никогда не достигает дна. Аналогичным образом звук, направленный со стороны дна наклонно вверх, никогда не достигает поверхности. Похоже, что отвечающая за это явление неоднородность встречается на разной глубине. На мелководье у берегов эта глубина аналогична той, о которой сообщают фридайверы: несколько метров. Сообщается, что в более глубоких океанских водах переход расположен на глубинах в несколько сотен метров и более. Источник неоднородности остается неустановленным, но может соответствовать нижней кромке мозаики.

Третье важное наблюдение было получено в результате исследования, выполненного с борта корабля [2]. Измерения, проведенные в Балтийском море, в очередной раз выявили вертикальную дискретность. Вплоть до глубины 60 метров исследователи наблюдали практически постоянное содержание кислорода в воде, которое затем, на протяжении следующих 10 метров по вертикали, резко упало до гораздо более низкого уровня (рис. 16.5). Высокое содержание кислорода у поверхности подтверждает наличие исключавшей зоны, поскольку исключавшая зона сильно обогащена кислородом (глава 4). Более того, концентрация морской соли в верхней области составляла менее половины значения, наблюдаемого ниже. Поскольку исключавшая зона выталкивает любые примеси, включая соль, низкая концентрация соли в верхней области также подтверждает наличие исключавшей зоны.

Рис. 16.5. Вертикальные профили свойств воды в океане [2]. Профили температуры, растворенного кислорода и солености, измеренные на станции в Балтийском море 26 мая 1979 г.

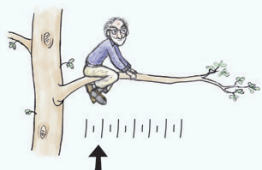


Особенно интригующий вывод этого исследования касался распределения аминокислот. По мере того как солнце восходило в течение дня, концентрация растворенных аминокислот постепенно уменьшалась в верхней зоне и увеличивалась на глубине; очевидно, что аминокислоты смещались вниз. Если солнечный свет усиливает структурирование подповерхностной области, следует ожидать вытеснения исключаемого материала вниз. Вытеснение должно уменьшиться, когда солнце начнет садиться, – и это было отмечено в наблюдениях. Очевидно, количество исключенного материала увеличивалось или уменьшалось в зависимости от поступления солнечной энергии. Этого и следовало ожидать, если отвечает за это материал исключаемой зоны.

Упомянутые свидетельства заставляют нас предположить, что обширные районы верхней области моря могут быть сходны с исключаемой зоной. В лаборатории такие EZ-подобные зоны простираются вниз на миллиметры, иногда на сантиметры; в море они могут уходить вниз на десятки метров у береговой линии, а дальше в море – на сотни метров. Столь большая глубина не вызывает удивления, если учитывать обилие лучистой энергии и кислорода, а также бесчисленные тысячелетия, потраченные на достижение устойчивого состояния.

Хотя эти EZ-подобные зоны могут опускаться на впечатляющую глубину, они, вероятно, имеют прерывистую структуру даже за пределами сотых «окошек», подобных тем, что показаны на рис. 16.4. Поверхность моря то и дело колеблется приливами и ветрами; следовательно, EZ-структуры могут иметь множе-

ШКАЛА СОМНЕНИЙ



ственные разрывы. Более того, верхняя область моря наполнена морскими гелями и пронизана всевозможными существами. Следовательно, эта область может представлять собой лоскутное одеяло из обрывков EZ-структур, а не сплошную сеть. Тем не менее толстая сетчатая структура неизбежно должна упрочнять поверхность.

16.2.2. Цунами

Толстый слой материала исключающей зоны, выстилающий поверхность океана, упростил бы объяснение определенных явлений, особенно связанных с волнами.

Волны колеблют поверхность океана. Нынешние объяснения механизма волн основаны на предположении, что океаны состоят только из воды; поэтому преобладающими факторами являются масса и вязкость. Объяснения основываются на таинственных явлениях, таких как дрейф Стокса, частотные дисперсии, уравнения Буссинеска и т. д.; эти механизмы требуют разных подходов для разной глубины. Получающиеся волновые модели чрезвычайно сложны. Достижение даже скромного интуитивного понимания требует упрощений.

В упругих средах, напротив, волны выглядят естественно: представьте себе гитарную струну. Волны в упругих средах не затухают так быстро, как это происходит в моделях с преобладанием вязкости. Если бы удалось смоделировать приповерхностную область воды как обширный упругий слой, то распространение волн поддавалось бы простому объяснению даже на интуитивном уровне.

Похоже, что модель эластичного слоя вполне достоверно описывает это явление: на поверхности воды существует мозаичная сетка; при умеренном натяжении и отпуске сетки она должна быстро возвращаться к своей ненапряженной конфигурации. Мозаичная сетка должна удовлетворять этому требованию.

С этой точки зрения заслуживает внимания крайний пример: волны цунами. Эти огромные и зачастую разрушительные волны могут несколько раз обогнуть Землю, прежде чем окончательно угаснуть. Представить себе такое устойчивое распространение в рамках вязкой жидкости непросто – трение должно быстро гасить волны. С другой стороны, распространение волны легче понять в контексте плотного упругого полотна: возмущения могут быстро распространяться на большие расстояния. Модель полотна может объяснить, почему цунами распространяются так далеко.

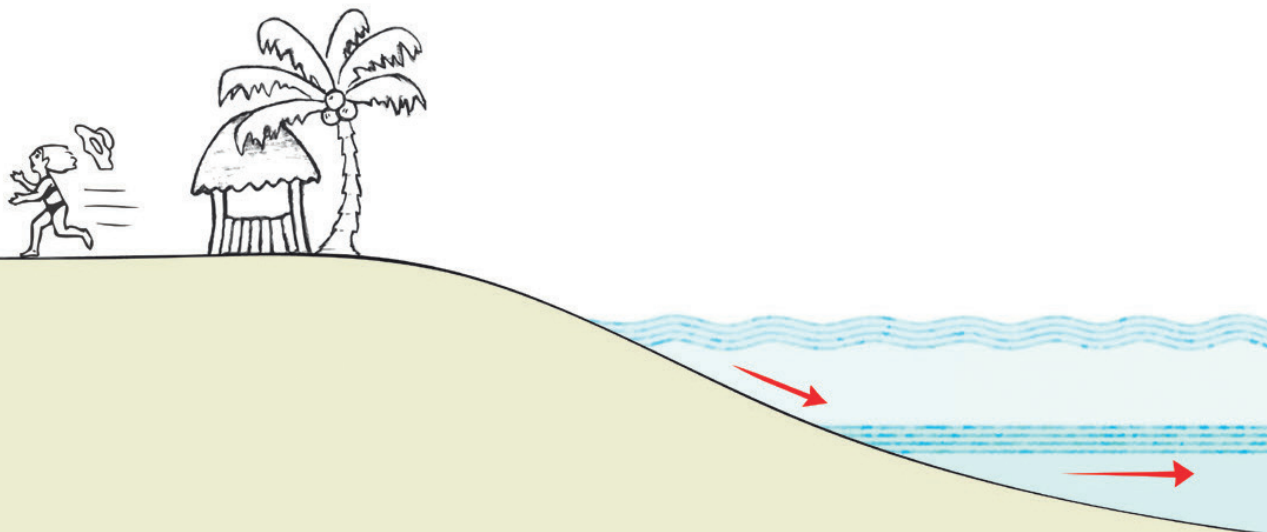
Модель сплошного полотна также может разрешить загадку: почему море отступает от суши незадолго до того, как цунами подошло к берегу. Гребень волны представляет собой отклонение поверхности вверх (рис. 16.6); отклонение сплошного полотна вверх будет втягивать края этого полотна внутрь от периферии. В случае волны цунами растущий гребень потянет край полотна в сторону моря, что объясняет отступление моря перед грядущим приливом. Будьте начеку, чтобы не пропустить такое отступление моря!

Дополнительно мы можем объяснить шипение. В то время как поверхностное полотно оттягивается в сторону моря, часть лежащей под ним объемной воды может оставаться на месте. Этот слой воды должен быть богат протонами – как и любая вода, расположенная рядом с исключавшей зоной. Освободившись, эти отталкивающие друг друга ионы гидроксония должны хлынуть вверх в воздух с шумом и брызгами, словно из только что открытой банки газировки. Этот эффект может объяснить часто слышимое шипение.

Рис. 16.6. Динамика волны цунами с упругим поверхностным полотном. При движении гребня волны вверх упругое полотно будет втягиваться в сторону моря, как мы это наблюдаем

16.3. Хрупкость водной поверхности

Хотя модель упругого полотна может пригодиться для понимания природы волн, она не дает точного описания поверхности воды. По большей части поверхность состоит из упакованных везикул. Наличие этого материала может быть достаточно для объяснения эластичности поверхности, но как насчет ее прочности? Поверхность должна быть ломкой, иначе рыба не сможет ее преодолеть.



Обнаружение подводных лодок

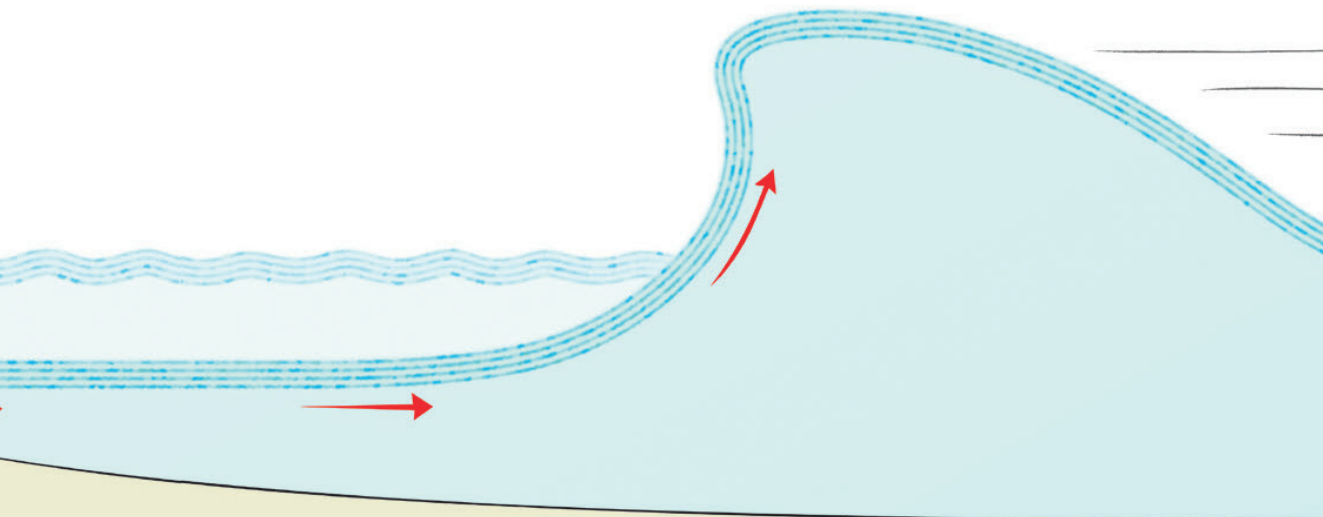


известные как горбы Бернулли, возникающие над проходящими в глубине подводными лодками [w2].

Материал исключаящей зоны, лежащий под поверхностью океана, может образовать заметный подповерхностный слой. Этот слой должен быть деформируемым, как показано на рис. 16.3. Следовательно, механические возмущения, возникающие под полотном, могут отклонить полотно, и эти отклонения могут быть обнаружены сверху. Действительно, инфракрасные лазеры обнаружили выпуклости на поверхности воды,

Непрочность поверхности можно объяснить с точки зрения *тиксотропии* (одно из тех труднопроизносимых словечек, с которыми вы, возможно, сталкивались, но не можете определить его смысл или даже выговорить). Тиксотропия описывает одну из механических характеристик материала. Тиксотропные материалы при мягком давлении упруго возвращаются к своей первоначальной конфигурации; однако после определенного порога они начинают течь. Представьте яичный белок.

Яичный белок моделирует тот тип непрочности, который я имею в виду. Яичный белок изобилует упоря-



доченной водой [3] – теперь мы считаем, что это вода исключаяющей зоны. EZ-вода яичного белка, как и следовало ожидать, исключает примеси. Чтобы убедиться в этом самим, попробуйте окрасить яичный белок различными пищевыми красителями: при условии что тягучий альбумин не подвергнут механическому перемешиванию, яичный белок исключит эти красители [4].

Такие EZ-материалы, как яичный белок, ведут себя тиксотропно из-за электростатической природы связей. Возьмем скопление везикул. Противоположные заряды удерживают везикулы вместе. Эти связи должны выдерживать небольшие деформации и не допускать разрыва; они ведут себя более или менее эластично. Однако если вы деформируете скопление везикул достаточно сильно, чтобы разорвать эти связи, оно распадется, и везикулярный материал потечет. Этот механизм может объяснить податливость материала поверхности – почему пловцы и рыба могут проходить сквозь поверхность почти без затруднений.

Тиксотропия также может объяснить, почему монеты плавают, когда их осторожно кладут на поверхность воды, но тонут при неаккуратном опускании. Неосторожный сдвиг монеты может привести к разрушению структуры поверхности, что облегчит проникновение; иными словами, объект просто проваливается. Аккуратное укладывание предотвращает разрушение поверхностного слоя, позволяя предмету оставаться на поверхности.

Тот же принцип справедлив и для кораблей. Движущиеся суда вызывают сильный сдвиг. Этот сдвиг легко разрушает структуру поверхности, позволяя кораблю без труда пройти сквозь нее. Сдвиг менее выражен под судном и рядом с ним, где структура исключаяющей зоны остается неповрежденной, но напряженной, еще не достигнув порога разрушения.

Движущиеся по воде суда являются наглядными свидетельствами этого нарушения поверхности. Наиболее очевидным последствием движения является след, который вполне предсказуемо распространяется под углом позади корабля; вы можете ощутить эти волны, если окажетесь в лодке поблизости. Менее заметные последствия – это изменение структуры поверхности в виде длинного, похожего на колею следа, оставленного движущимся кораблем (рис. 16.7).

Я не замечал этого явления, пока мой коллега Майкл Рагхунатх (Michael Raghunath) не указал мне на него. Теперь я вижу его постоянно. След судна обычно ка-

жется более спокойным, чем вода за его пределами. Это спокойствие объяснимо: если корабль нарушил структуру подповерхностной исключаяющей зоны, то неоднородность материала снизит способность воды поддерживать волнение.

Гладкий след на воде может сохраняться долгое время после прохождения корабля, часто от 15 до 30 минут; затем он исчезает. Время, необходимое для исчезновения следа, предположительно представляет собой время, необходимое для того, чтобы этот участок поверхности восстановил структуру и стал неотличимым от остальных.

Таким образом, поверхностный слой воды может быть глобально эластичным, но локально податливым – он может разрушиться в любом месте. Податливость к разрушению объясняется тиксотропией – это свойство с трудно произносимым названием важно для понимания того, что происходит на поверхности воды.

16.4. КРУИЗНЫЕ ЛАЙНЕРЫ, ВАННЫ И АРХИМЕД



Все эти рассуждения подводят нас к Архимеду, который давно обратил внимание на водные поверхности. Погрузив свое тело в ванну и наблюдая, как вытесняется вода, Архимед испытал прозрение: на частично погруженных объектах, рассуждал он, выталкивающая сила должна равняться весу вытесненной воды. Этот простой принцип используется до сих пор, чтобы объяснить, почему плавают корабли. С другой стороны, в этом принципе может быть заложено нечто большее, чем кажется на первый взгляд.



Рис. 16.7. Паром в Пьюджет-Саунд приближается к Сиэтлу. Обратите внимание на длинный след позади. Снимок предоставлен Майклом Рагхунатхом



Рис. 16.8. Когезия не дает кораблю утонуть

Сначала представьте себе модель корабля, установленную на мокрую губку. Баланс сил прост: корабль давит вниз, а слегка смятое основание толкает вверх с равной и противоположной силой (рис. 16.8). Причина, по которой губка может отталкивать груз, заключается в том, что ее молекулам удается удерживаться вместе, несмотря на силу вдавливания; молекулярная когезия (сцепление молекул) позволяет губке давить вверх.

Теперь поставьте корабль на воду вместо губки. Баланс сил не должен измениться: лодка давит вниз, а вода толкает вверх. Но как именно вода давит вверх? Если бы молекулы воды внизу не были связаны друг с другом, вес корабля мог бы раздвинуть воду, как Моисей раздвинул воды Красного моря; корабль бы быстро утонул. Обычно мы говорим о направленном вверх давлении, однако полная картина должна содержать молекулярную когезию.

Читатели, знакомые с физикой плавучести, помнят, что стандартное объяснение не предполагает когезию и связано только с давлением. Вес верхней части воды создает давление вниз. Давление действует во всех направлениях, в том числе вверх. Чем глубже вы опускаетесь, тем выше давление. Следовательно, чем глубже погрузится корабль, тем большее давление он будет испытывать – до тех пор, пока толкающая вверх сила давления не уравновесит вес корабля. На этом уровне корабль должен зависнуть, спокойно покачиваясь на волнах. Больше ничего не требуется; о когезии даже не вспоминают.

Приводят ли давление и когезия к разным объяснениям? В объяснении, основанном на давлении, считается, что давление воды оказывает одинаковую силу во всех направлениях. Это основано на предположении, что физические свойства воды одинаковы во всех направлениях. Однако это не обязательно так: сдвиг корабля может легко пробить слои мозаики, но слои мозаики с умеренными искажениями под судном и рядом с ним могут остаться нетронутыми из-за их высокой связности. В таком случае корабль будет покачиваться на эластичной мозаике (рис. 16.9).

Эта натянутая эластичная мозаика практически не повреждена и должна создавать давление вверх, отталкивая корабль, словно на батуте. Упругость мозаики помогает удерживать корабль на плаву. Если пузыри нарушат мозаику, корабль должен опуститься глубже (см. ниже).



Рис. 16.9. Слои EZ обеспечивают сцепление и тягу вверх, помогая удерживать корабль на плаву

Таким образом, Архимед мог быть прав лишь частично. Конечно, сила давления толкает корабль вверх. Однако величина толкающей силы зависит не только от глубины и степени связности молекул воды, но и от связности сети исключаяющей зоны, лежащей под корпусом корабля. Эта сеть вносит свой вклад в формирование выталкивающей силы в той степени, в которой она остается неповрежденной, хотя и натянутой.

Структуры поверхностной исключаяющей зоны помогают нам понять, не только как плавают корабли, но также как они могут затонуть. Некоторые регионы печально известны кораблями, которые массово тонут таинственным образом. Бермудский треугольник – самый известный (и, возможно, самый противоречивый) из таких регионов, но были описаны и другие (рис. 16.10). Бывали периоды, когда корабли тонули в этих местах по неведомой причине гораздо чаще, чем это можно объяснить случайностью [5]. После самых печально известных потерь Бермудского треугольника записи военных поисковых команд свидетельствовали о парадоксе: обломки корабля, которые обычно плавают на поверхности после кораблекрушения, не удавалось найти – вообще никаких следов, – несмотря на обширные поиски. Несчастные корабли, очевидно, отправились прямо на дно целиком.

Существует объяснение гибели судов, основанное на подводных выбросах газа. Придонные тепловые каналы и скопления метана периодически становятся активными, выделяя пузырьки, которые могут легко нарушить податливую структуру поверхности. Действительно, пилоты, ищущие загадочно исчезнувшие корабли, сообщали о необычном виде поверхности воды. Один капитан буксира, который едва избежал потопления, описал поверхность как пенистую и неспокойную, хотя окружающее море оставалось совершенно ровным [w3]. Судя по всему, поверхность играет в этой драме свою роль. Точно так же, как подводные пузырьки позволяют ныряльщикам с трамплина легко войти в воду, природные пузырьки могут столь же эффективно способствовать потоплению судов.

Заинтригованные обширной документацией об этих потерях, несколько исследователей попытались экспериментально определить, может ли насыщение воды пузырьками вызвать потопление объекта. Похоже, что может: забавное видео демонстрирует потопление в маленькой камере [w4], в то время как более серьезное видео, записанное ВВС, показывает, как быстро-



Рис. 16.10. Какую тайну скрывает Бермудский треугольник? (Художественное изображение)

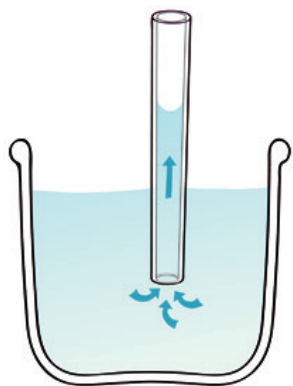


Рис. 16.11. Пример капиллярного эффекта

Рис. 16.12. Баланс сил с традиционной точки зрения. Направленная вверх сила поверхностного натяжения мениска уравнивает вес водяного столба внизу

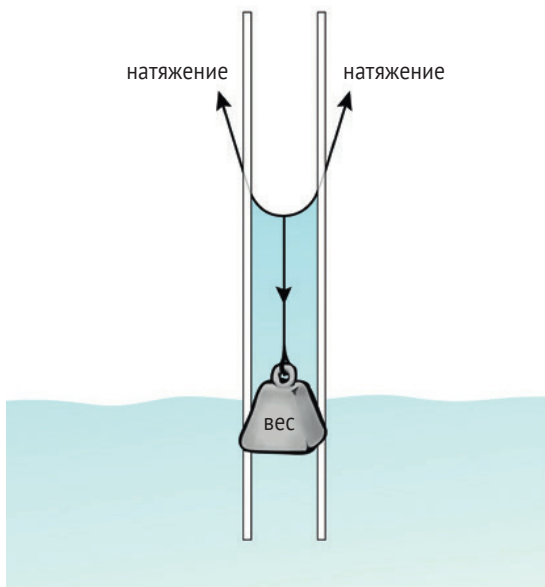
ходный катер тонет на мелководье [w5]. Следовательно, есть вероятность, что потоки газовых пузырей со дна могут потопить суда, хотя в данном случае нужны подтверждения из других источников.

16.5. КАПИЛЛЯРНЫЙ ЭФФЕКТ

Положите мокрый чайный пакетик на бумажную салфетку и наблюдайте. Вскоре большая часть салфетки намочит. Вода может подняться даже по подвешенным вертикально салфеткам. Такие явления часто называют «капиллярным эффектом».

Более традиционные установки для демонстрации капиллярного эффекта обычно включают в себя тонкие трубки, известные, как ни удивительно, под названием «капилляры». Когда кварцевую капиллярную трубку вставляют вертикально в емкость с водой, вода внутри трубки быстро поднимается до уровня выше, чем окружающая вода (рис. 16.11). Кажется, что вода бросает вызов гравитации.

От классических объяснений мало проку. Они направлены на конечный результат – верхний мениск, а не на явление подъема. Предполагается, что мениск прилипает к стенке капилляра и его тянет вниз вес столба воды внизу. Этот подвешенный груз придает кривизну мениску. При достижении баланса сил восходящая составляющая напряжения мениска равна весу столба жидкости (рис. 16.12).



Это объяснение неявно предполагает, что столб воды висит, не взаимодействуя с окружающей его внутренней поверхностью трубки. Но мы знаем, что гидрофильные стенки капиллярных трубок сильно взаимодействуют с водой. Так что это объяснение нельзя считать полностью правильным. Тем не менее данный подход зарекомендовал себя в качестве удобного и надежного объясняющего механизма; студентам это нравится.

Классический механизм не дает ответа на фундаментальный вопрос: почему поднимается столбец жидкости? Движущая сила явления остается непонятной, хотя часто встречается понятие «поверхностная энергия», подразумевающее какое-то взаимодействие воды со стенкой капилляра.

16.5.1. Почему поднимается вода в капиллярных трубках?

Чтобы понять, как возникает направленная вверх капиллярная сила, полезно начать с функциональной анатомии воды. Прямо под поверхностью воды находится мозаичное скопление везикул. Поскольку эта мозаика обладает отрицательным электрическим зарядом, хорошим предположением выглядит капиллярная сила, основанная на взаимодействии зарядов – либо *тянущая* сверху, либо *толкающая* снизу. Есть веские причины предполагать наличие обоих вариантов.

Сначала рассмотрим участок капиллярной трубки, расположенный выше поверхности воды (рис. 16.13). Если бы слои исключавшей зоны выстилали внутреннюю стенку трубки, то эти слои могли бы создавать протоны, обращенные к сердцевине трубки. Положительные заряды этих протонов могут способствовать движению вверх отрицательно заряженных везикул.

Стенки капиллярной трубки, подверженные воздействию воздуха, должны иметь хотя бы несколько слоев исключавющей зоны. Все гидрофильные поверхности притягивают влагу из воздуха. Например, сухие вещества, такие как

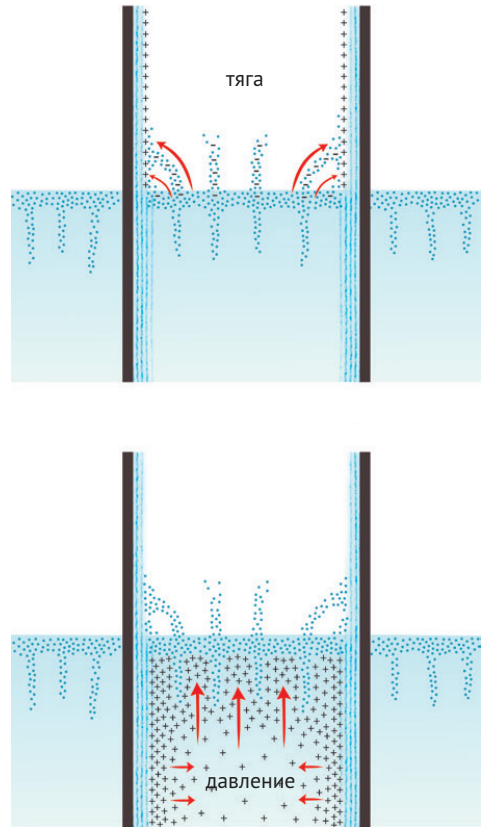


Рис. 16.13. Предлагаемый механизм возникновения капиллярной подъемной силы. Положительные заряды сверху тянут отрицательный поверхностный слой вверх; а положительные заряды снизу толкают вверх ионы гидроксония, сконцентрированные непосредственно под поверхностным слоем. Обе силы могут вызвать подъем уровня воды в капилляре

поваренная соль, увлажняются на воздухе; некоторые из этих веществ притягивают влагу настолько сильно, что могут за ночь разжижаться (расплаваться) даже в довольно сухой среде, включая нашу собственную лабораторию. Особенно активный поглотитель влаги, нафийон, применяется как осушитель. Чем выше гидрофильность вещества, тем больше атмосферной влаги оно адсорбирует.

Влага поступает из воздуха в виде везикул (глава 15). Везикулы адсорбируются как на внутренней, так и на внешней поверхности гидрофильной трубки за счет обычного механизма застежки-молнии (рис. 14.9). Полноценная застежка-молния создает стандартные исключаящие зоны плюс протоны. Даже при наличии небольшого количества протонов, выстилающих внутреннюю поверхность трубки, должен присутствовать положительный заряд, необходимый для начала вытягивания воды вверх. Стенки могут начать вытягивать вверх поверхностные везикулы.

Как только начнется это восходящее притяжение, его сила должна увеличиться. По мере того как поднимающиеся везикулы цепляются за протоны внутренних стенок, механизм застежки-молнии обнажает больше положительных зарядов. Эти заряды еще больше увеличивают силу притяжения, подтягивая больше везикул, которые затем застегиваются, создавая еще больше положительных зарядов, и так далее. Процесс завершается, как только вода поднимется достаточно высоко – когда нисходящая сила тяжести уравновешивает восходящие капиллярные силы. Со стороны это выглядит так, будто вода поднялась сама по себе.

Образование положительного заряда можно рассматривать как усилитель испарения. Событие испарения обычно происходит, когда локальный отрицательный заряд мозаики превышает пороговое значение; в этот момент часть мозаичного массива отделяется и поднимается в воздух (глава 15). Наличие положительного заряда над этим отрицательно заряженным массивом просто ускоряет подъем – положительный заряд эффективно вытягивает испаряющуюся воду вверх. Мы убедились, что положительно заряженный электрод, расположенный над водой, действительно усиливает испарение. Следовательно, принцип подтягивания капиллярного столба кажется вполне обоснованным.

Между тем росту столба способствует и подталкивание, которое исходит от положительных зарядов внизу.

Рассмотрим участок трубки, лежащий ниже поверхности воды (рис. 16.13, внизу). Только что погруженная в воду гидрофильная капиллярная трубка быстро образует кольцевые исключаяющие зоны внутри и снаружи. Из-за наличия ограничивающих стенок внутри должна возникнуть высокая концентрация ионов гидроксония. Эти ионы гидроксония будут прилипать к любым отрицательно заряженным участкам: к самой кольцевой зоне исключения и к мозаике везикул, свисающих с поверхности раздела сред чуть выше. Эти два близко расположенных и значительных кластера положительного заряда будут взаимно отталкиваться, образуя силу, которая толкает поверхность воды вверх.

Таким образом, капиллярная сила имеет как минимум двойственную природу. *Электростатическая сила сверху вызывает вытягивание, а электростатическая сила снизу вызывает подталкивание.* Обе силы исходят от положительных зарядов, возникающих в исключаяющей зоне капилляра.

Можно ли, основываясь на взаимодействии зарядов, объяснить капиллярный эффект? По-видимому, так думал Исаак Ньютон – он высказал мнение, что капиллярный эффект может иметь электрическое происхождение [6]. Его давно забытая точка зрения теперь кажется актуальной.

Если это так, мы могли бы для начала предсказать, что капиллярный подъем будет наиболее заметным у стенки, где возникают силы. В трубках большого диаметра существенный подъем должен быть замечен только у стенки, образуя краевой мениск; остальная поверхность воды может оставаться ровной. В узких трубках мы должны наблюдать подъем по всему поперечному сечению трубки. Эти предсказания полностью сбываются: краевые мениски присутствуют независимо от диаметра трубки, в то время как подъем на всю толщину столба наблюдается только в тонких трубках.

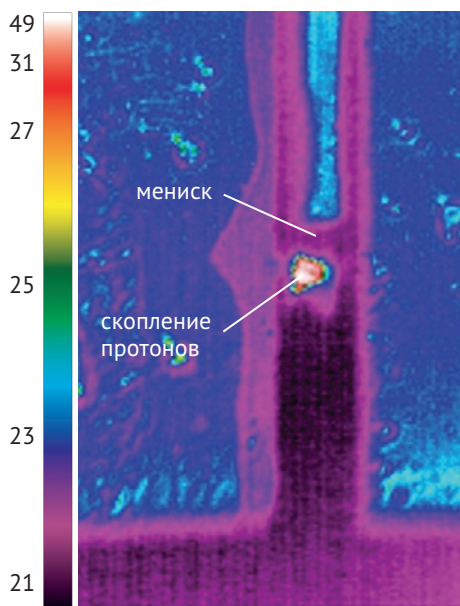
Также ожидается, что в более тонких трубках вода будет подниматься выше. Подъем прекращается, когда направленная вниз сила тяжести становится достаточно большой, чтобы уравновесить направленную вверх капиллярную силу. Эти две силы изменяются особым образом: сила, направленная вверх, возрастает с увеличением периметра капилляра, в то время как сила, направленная вниз, возрастает с увеличением поперечного сечения капилляра. Сужение трубки уменьшает периметр и капиллярную силу, но пропорционально уменьшает поперечное сечение. Таким об-

разом, более узкие столбы воды должны подниматься выше из-за их существенно меньшего веса. Это предсказание подтверждается обычными наблюдениями.

Второе предсказание – горячая вода должна подниматься быстрее. Нагревание способствует испарению, и более высокая скорость испарения должна вызывать более быстрый подъем. Мы подтвердили, что горячая вода поднимается в два-три раза быстрее, чем вода комнатной температуры.

Третье предсказание связано с толкающим механизмом. Этот механизм приводит к образованию высокой концентрации протонов в зоне непосредственно под поверхностной мозаикой. Протоны в высокой концентрации вырабатывают интенсивное инфракрасное излучение – вы видели множество примеров на страницах этой книги. Мы обнаружили то же самое и здесь: прямо под поверхностным мениском постоянно наблюдается сильное инфракрасное излучение (рис. 16.14).

Рис. 16.14. Инфракрасный снимок воды, поднимающейся в квадратной капиллярной трубке. Обратите внимание на «горячую» точку прямо под мениском. Шкала в градусах Цельсия



Четвертое предсказание – отсутствие какого-либо подъема воды в гидрофобных трубках. Все упомянутые движущие силы проистекают из положительных зарядов, возникающих вследствие строительства исключительной зоны. Гидрофобные поверхности не образуют исключительные зоны; следовательно, вода в гидрофобных трубках вообще не должна подниматься, что соответствует наблюдениям.

Пятым моментом является очевидная универсальность механизма: предложенный здесь механизм по существу аналогичен механизму, разработанному для объяснения осмотического вытягивания воды (рис. 11.8), и механизму, предложенному для объяснения впитывания воды в сетчатые структуры (рис. 11.11). Все механизмы приводятся в действие протонами. Следовательно, зарядовые механизмы могут лежать в основе многих явлений вытягивания воды – возможно, всех явлений. Эта универсальность – сильная сторона электростатического механизма.

16.5.2. Движение воды в высоких деревьях

Капиллярный эффект не ограничивается только кварцевыми трубками и бумажными салфетками. Он встречается повсюду в природе. Капиллярный эффект особенно заметен в царстве растений, где вода может подниматься даже на вершину секвойи высотой 100 метров. Внутри таких деревьев узкие сосуды-ксилемы проходят от корней к листьям, транспортируя воду вверх.

Механизм сосудистого транспорта остается предметом активных дискуссий. Многие ученые думают, что вода поднимается вверх за счет какой-то разновидности капиллярного эффекта. Однако этой гипотезе противоречат две проблемы. Во-первых, «подвесная колонна» воды слишком тяжелая, чтобы ее можно было поднять более чем на 10 метров; во-вторых, воздушные карманы, обычно обнаруживаемые в жидкости ксилемных трубок, должны препятствовать процессу восходящего движения воды, как это происходит в соломинках. Ученые борются за решение этих проблем.

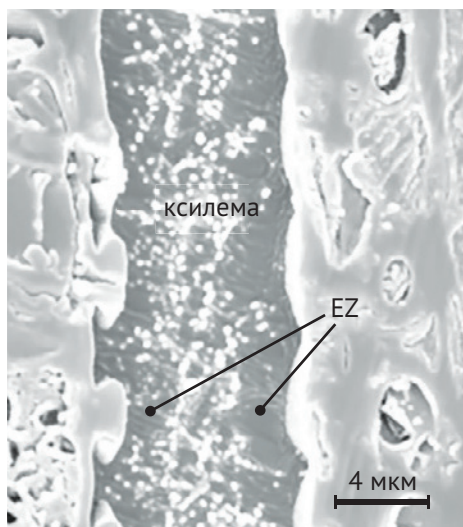
В описанном выше капиллярном механизме эти проблемы не обязательно являются препятствиями. Столб жидкости не висит сам по себе, а цепляется за стенки; а воздушные карманы не должны препятствовать увеличению заряда. Вопрос в том, действительно ли этот механизм работает у растений и деревьев. Ключевой вопрос заключается в том, содержат ли ксилемы исключющие зоны. Похоже, что это так.

Чтобы узнать больше об исключющих зонах в ксилемах, я связался со своим австралийским другом Мартином Кэнни (Martin Canny), лидером в области исследования сосудов растений. Мартин живет в Канберре. Я вспоминаю свой визит несколько лет назад, когда

супруги Кэнни были настолько любезны, что поселили меня в квартире их тещи внизу. Мартин упомянул пауков. «Не нужно бояться паука-охотника, – снисходительно указал он, – он огромный и волосатый, но совершенно безобидный. Опасайтесь маленьких черных паучков с красными пятнами. Они прячутся в укромных уголках и закоулках. Смерть от их яда может быть весьма быстрой, но при этом мучительной». Излишне говорить, что мой трехдневный визит прошел практически без сна.

Тем не менее у нас нашлось время обсудить капиллярный эффект, и Мартин, похоже, заинтересовался исключаящими зонами. После моего визита он занялся экспериментальной проверкой. Мартин вливал мелкие частицы чернил в сосуды ксилемы, быстро замораживал образцы и исследовал их в электронном микроскопе. Результаты были положительными (рис. 16.15). Не знаю, кто был более взволнован, Мартин или я, но результаты подтвердили наличие исключаящих зон в этих сосудах.

Рис. 16.15. Изображение частиц чернил, заполняющих ксилему, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа. Частицы концентрируются в центре и исключаются из зоны у стенок. Снимок предоставлен Мартином Кэнни



Это подтверждение означало, что мы идем правильным курсом. Если в ксилеме присутствуют кольцевые исключаящие зоны, то, несомненно, они играют определенную роль в физиологии сосудов. Кольцевые исключаящие зоны в трубках из нафiona создают в них устойчивый поток (глава 7), и это именно то, что нам нужно. Действительно, поток внутри трубки нафiona (или геля) может служить моделью того, что происходит в природных трубчатых сосудах.

В нафионовой модели потока главной особенностью является присутствие протонов в центре трубки. Эти протоны приводят в движение поток. Но заполняют ли протоны также жидкость внутри ксилемы? Традиционные учебники упоминают ожидаемо низкий уровень рН сока, а современные методы уточняют эти значения рН: например, у проростков кукурузы в зависимости от условий рН ксилемы находится в диапазоне от 5 до 4,7.

Таким образом, нафионовые и ксилемные трубки очень похожи. Обе содержат кольцевые исключаяющие зоны и протоны в центре. Представляется вполне очевидным, что движущие силы потоков внутри этих трубок одни и те же. Мы можем по привычке называть эти потоки капиллярными, но, возможно, правильнее было бы называть их *протонными*.

Протонный поток замещает воду, потерянную при испарении. Вода испаряется с листьев растения. При этом верхняя часть полости ксилемы может временно стать сухой – за исключением нескольких остаточных слоев исключаяющей зоны. Протоны, связанные с этими слоями, будут втягивать воду вверх с помощью того же механизма, который втягивает воду в тонких кварцевых капиллярных трубках. Это движение воды вверх сохраняет влагу листьев.

Высота не является проблемой для этого механизма, потому что сосуды достаточно тонкие, чтобы сила втягивания превышала силу тяжести. Диаметр верхних сосудов деревьев составляет около микрометра. Сосуды, расположенные ниже, шире, но их просветы обычно изобилуют нитями гидрофильного полимера, которые эффективно сужают просвет трубки. Исключаяющие зоны связаны с этими поверхностями, а объемная вода связана с исключаяющими зонами из-за большого количества ионов гидроксония. Эти цепкие связи несут на себе большую часть веса водного столба. Благодаря значительной несущей способности и узкости сосудов вода не должна испытывать затруднений при подъеме на большую высоту.

Вероятно, энергетика этого процесса заслуживает отдельного комментария. Восходящий поток нуждается в энергии точно так же, как и перекачка воды в поднятый на высоту резервуар. Источник энергии нам знаком: падающая лучистая энергия. Лучистая энергия питает потоки через ксилемы аналогично тому, как она питает потоки через гидрофильные трубки.

Учитывая прямой вклад падающей лучистой энергии в поток, вы поймете, почему этот поток может

зависеть от сезона. Поток начинается с приближением весны – как раз тогда, когда количество лучистой энергии в окружающей среде начинает расти. С приближением лета поток увеличивается, осенью уменьшается, зимой прекращается. Осеннее сокращение поставок лучистого топлива может напрямую объяснить уменьшение потока и то, почему осенние листья сохнут и мягко опадают на землю.



16.6. ПЛАВАЮЩИЕ КАПЛИ ВОДЫ

Наконец, мы возвращаемся к рассмотрению поверхностей естественных водоемов и к вопросу о том, что происходит, когда на эти поверхности падают капли дождя. Здравый смысл подсказывает, что капли мгновенно сольются с водой внизу. Однако если и капля, и поверхность воды покрыты исключаящими зонами, то слияние не обязательно произойдет мгновенно.

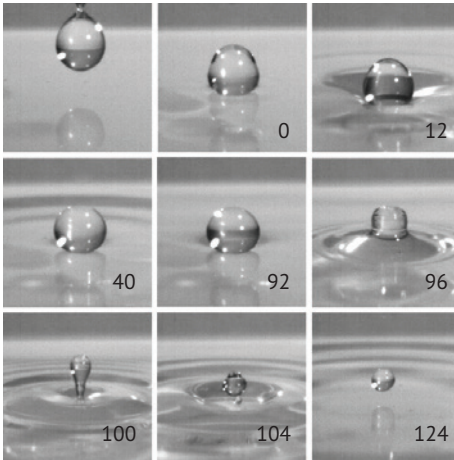
Я впервые узнал о задержке слияния, когда один студент рассказал мне о своем опыте плавания на лодке сразу после дождя. Вода собиралась на планшире лодки и часто капала на воду озера внизу. Обычно эти капли плавали некоторое время на поверхности, прежде чем смешаться с остальной водой. Единжды увидев эти плавающие капли, вы начнете замечать их повсюду. Во время ливня они образуют нереальную картину – прозрачные шарики, плавающие на поверхности воды.

Замедленное слияние капель оказалось общеизвестным явлением, которое постоянно изучается на протяжении столетия, но, кажется, мало кто в нем раз-

бирается. Уверенные в том, что дальнейшие исследования могут раскрыть новые тщательно охраняемые секреты воды, мы провели подробное исследование этого явления с помощью высокоскоростного видео [8]. В подходящих условиях и при падении с высоты менее 10 мм капельки постоянно плавали на поверхности перед растворением (рис. 16.16).

Кроме того, когда капельки катились или скользили вбок, их слияние занимало гораздо больше времени – иногда несколько секунд. Задержка может быть следствием дополнительного времени, необходимого для разрушения EZ-оболочки капли. Если капля катится, точка контакта постоянно меняется, и процесс разрушения должен непрерывно начинаться заново. Следовательно, слияние требует больше времени.

Фактически слияние происходит более чем за один этап [8]. Процесс состоит из пяти или шести подскоков, при каждом из которых часть содержимого капли впрыскивается в воду. Некоторые из этих впрысков достаточно сильны, чтобы вызвать волны в воде – и даже заставить остаток капельки приподняться вверх (рис. 16.17).



Некоторые фрагменты рис. 16.17 могут показаться вам знакомыми. Аналогичные изображения часто встречаются в книгах, журналах и на веб-сайтах. Характерные танцевальные шаги капелек остаются загадкой – задача, которую предстоит решить читателю. Возможно, первый впрыск значительно снижает внутреннее давление в капельнице. Если вода в капельке содержит остаточный положительный заряд, следующий впрыск повторяет последовательность событий. Только выпустив несколько струек, капелька пустеет, добавив, как говорится, немножко больше воды в океан.

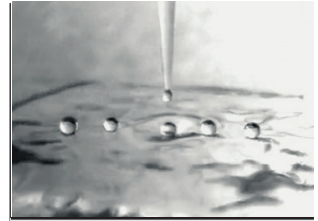


Рис. 16.16. Капли воды падают на воду. В подходящих условиях капли могут существовать в течение некоторого времени, прежде чем слиться с водой внизу

Рис. 16.17. Несколько стадий растворения каплей в объемной воде. Числа указывают время в миллисекундах с момента приземления капли

16.7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Структуры, содержащие исключаяющие зоны, выстилают поверхность воды. Эти подповерхностные структуры состоят в основном из агрегированных везикул и, возможно, также из стандартного материала исключаяющей зоны, самоорганизующегося в мозаичные массивы. Эти массивы могут выступать вниз от поверхности на миллиметры или сантиметры в лабораторных сосудах; в открытых водах с обильным падающим излучением они могут спускаться на десятки и даже сотни метров. Эти трубчатые мозаичные структуры создают межфазное натяжение.

В самом деле, межфазное натяжение на поверхности естественных водоемов может быть чрезвычайно высоким – вполне достаточное, чтобы поддерживать маленьких ящериц, и, возможно, также помогающее поддерживать на плаву суда. Источник этого натяжения – подповерхностная водная мозаика исключаяющей зоны. Ее наличие помогает объяснить многие наблюдаемые явления: следы кораблей на воде, устойчивые волны цунами, капиллярные потоки в деревьях и загадку капель, плавающих на поверхности воды.

Другой вопрос, помогут ли вам такие мозаичные конструкции ходить по воде. По этому поводу у нас есть сомнения (хотя говорят, что подобное уже случилось раньше).



Глава 17

Согреть для получения льда

В 1963 году Эрасто Мпемба (Erasto Mpemba) учился в средней школе в Танганьике (ныне Танзания). Темой дня на его уроке кулинарии было мороженое. Большинство учеников средних школ Танганьики были далеки от поварского искусства, поэтому обычно использовали полуфабрикаты. Чтобы приготовить мороженое, ученики просто брали предварительно подготовленную сухую смесь, тщательно смешивали ее с водой и помещали в морозильную камеру. Вскоре они могли наслаждаться своим десертом.

Мпемба заметил нечто странное. Когда он смешал порошок с теплой водой вместо холодной, мороженое замерзло быстрее. Казалось, что теплая вода замерзает быстрее. Это явление произвело на Эрасто глубокое впечатление, хотя учителя начальной школы так и не смогли в него поверить.

Но Мпемба не забыл свое нелогичное наблюдение. Когда он перешел в старшую школу, то рассказал про парадокс своему учителю, профессору физики, которого пригласили, чтобы пробудить у старшеклассников интерес к чудесам науки. Денис Осборн поначалу тоже не поверил школьнику. Буквально каждое слово термодинамики гласит, что теплая вода не может замерзнуть быстрее, чем холодная. Тем не менее Мпемба упорствовал. В конце концов, он убедил Осборна провести эксперимент с чистой водой; к своему удивлению, Осборн быстро убедился в правоте Мпембы.

Их совместные работы стали классикой [1, 2]. Вы можете посмотреть современные видеозаписи явления [w1, w2]. Заслуга открытия по праву принадлежит ученику средней школы, достаточно проникательному, чтобы почувствовать важность своего парадоксального наблюдения, не подозревая, что некоторые известные люди, включая Аристотеля, наблюдали подобные явления намного раньше.

Так называемый «эффект Мпембы» – не единственная парадоксальная особенность процесса образования льда. Лед может выглядеть как твердая холодная



Эрасто Мпемба,
род. в 1950 г.

вода, но его образование сопровождают еще несколько парадоксов, которые необходимо разрешить, если мы действительно хотим понять, как образуется лед.

Начнем с того, что зададим уже знакомый вопрос: играет ли здесь какую-то роль материал исключяющей зоны? Учитывая структурное сходство исключяющей зоны со льдом, некоторая причастность исключяющей зоны кажется неизбежной. Например, формирование структуры исключяющей зоны может предшествовать замерзанию или последовать за таянием. Если это так, то мы можем спросить: действительно ли падение температуры является наиболее важным фактором для образования льда? Или охлаждение может просто подготовить почву для какого-то другого процесса образования льда?

Мы начнем с парадокса образования льда, даже более фундаментального, чем парадокс Мпембы.

17.1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПАРАДОКС

Обычный жизненный опыт подсказывает: для того чтобы вода замерзла, необходимо отводить от нее энергию. Вспомните, как это происходит. Вы ставите в холодильник емкость с водой. Когда от емкости отнято достаточное количество тепловой энергии, вода превращается в лед. Затем вы можете поступить наоборот: вынуть емкость на теплый воздух, и лед растает. Следовательно, добавление энергии дает неупорядоченную жидкость, воду; отведение энергии дает упорядоченный кристалл, лед.

Хотя это привычная закономерность, кое-что в ней кажется любопытным. Согласно всему, что мы узнали в предыдущих главах, создание кристаллического порядка требует *притока* энергии; для наведения порядка (и уменьшения энтропии) вам обычно нужно вносить энергию в систему. Процесс строительства упорядоченной исключяющей зоны нуждается в электромагнитной энергии – чем больше приток энергии, тем больше упорядоченная зона.

Эта закономерность соответствует здравому смыслу. Если вы хотите создать искусно построенный замок из песка, то должны потратить энергию на его строительство. Чтобы превратить замок в руины, обычно почти не требуется энергия – достаточно легкого нажатия в нужном месте, – но процесс строительства упорядоченной конструкции всегда требует значительных затрат энергии.

Если все это кажется разумным, тогда у нас большие проблемы, потому что сценарий замораживания выглядит иначе. Лед – это исключительно упорядоченный кристалл. Таким образом, можно ожидать, что для его строительства потребуется много энергии. Тем не менее жизненный опыт, очевидно, говорит нам, что энергию *нужно отводить*.

Ученые объяснили аномалию ледообразования, используя понятие теплового движения. С понижением температуры тепловое движение уменьшается, поэтому снижение температуры должно позволить молекулам воды следовать своей естественной тенденции к самоорганизации в кристаллический лед. На первый взгляд это кажется разумным, однако возникает очевидное противоречие: если увеличение упорядоченности при формировании исключаяющей зоны требует *притока* энергии, как может увеличение упорядоченности при формировании льда потребовать *отвода* энергии?

Я обратил внимание на этот парадокс благодаря моему другу Ли Хантсману (Lee Huntsman), коллеге-ученому и инженеру, который покинул окопы науки и стал президентом нашего университета. Ли подошел ко мне после публичной лекции, которую меня пригласили прочитать в моем университете. На фоне поздравительных кивков после лекции вопрос Ли о термодинамическом парадоксе был из тех стимулов, которые я больше всего ценю. Он заставил меня задуматься.

В конце концов мы разрешили этот парадокс и тем самым обрели новое понимание. Я пришел к выводу, что огромный запас внутренней энергии питает переход от жидкой воды ко льду. Чтобы вызвать высвобождение этой энергии, требуется надлежащее охлаждение. В конце концов, энергия действительно используется для создания упорядоченной структуры – точно так же, как мы наблюдали ранее при формировании исключаяющей зоны.

17.2. РАЗРЕШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПАРАДОКСА: EZ В РОЛИ ГЛАВНОГО ГЕРОЯ

Хотя очевидно, что лед образуется из воды, менее ясно, о *какой* воде идет речь – объемной воде или материале исключаяющей зоны. Поскольку структуры

исключающей зоны и льда представляют собой сложенные друг на друга сотовые слои, логично было бы предположить наличие связи между этими фазами. Исходя из этого, можно легко представить себе переход от исключавющей зоны ко льду.

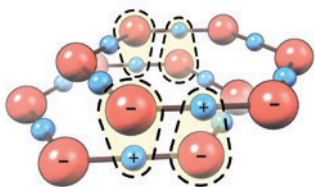
Анализ структурных различий между исключавющей зоной и льдом дает представление о том, что может вызвать переход (рис. 17.1). В структуре исключавющей зоны атомы в соседних плоскостях смещены друг относительно друга (рис. 17.1а). Заряды одной плоскости выстраиваются в линию с противоположными зарядами соседней плоскости. Притяжение зарядов удерживает плоскости исключавющей зоны вместе. Лед, напротив, состоит из сотовых слоев, уложенных без сдвига (рис. 17.1в). Атомы кислорода лежат напротив атомов кислорода, а атомы водорода лежат напротив атомов водорода. Их близость создает локальные силы отталкивания, которые обычно раздвигают гексамерные пластины, разрушая структуру, но природа применяет хитрый трюк: склеивает их при помощи протонов (рис. 17.1в). Протоны располагаются между каждой второй сопряженной парой атомов кислорода (на соседних пластинах). Таким образом, положительный заряд «склеивает» два отрицательно заряженных атома и превращает воду исключавющей зоны в лед.

Очевидно, любой переход от EZ-воды ко льду требует массивного притока протонов (рис. 17.1б). Эти протоны вносят положительный заряд в решетку исключавющей зоны, превращая эту обычно отрицательно заряженную структуру в электрически нейтральный лед. Протоны также занимают некоторый объем: их присутствие раздвигает плоскости исключавющей зоны, что объясняет более низкую плотность льда (благодаря чему он плавает). Следовательно, переход исключавющей зоны в лед выглядит многообещающим вариантом; он может объяснить, по крайней мере, некоторые основные свойства льда.

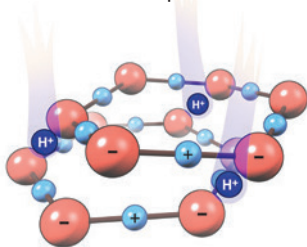
Подобный переход также обоснован с энергетической точки зрения. Исключавющие зоны выталкивают протоны. Эти протоны являются носителями потенциальной энергии: положительные заряды отделены от отрицательных. Если в какой-то момент протоны устремляются обратно, нейтрализуя отрицательный заряд исключавющей зоны и тем самым создавая лед, это приводит к потере потенциальной энергии. Таким образом, наши ожидания оправдались: на превраще-

ние одной упорядоченной структуры в другую, еще более упорядоченную структуру действительно расходуется энергия (рис. 17.2).

(а) Структура EZ



(б) Проникновение протонов



(в) Слои совмещаются, образуя лед

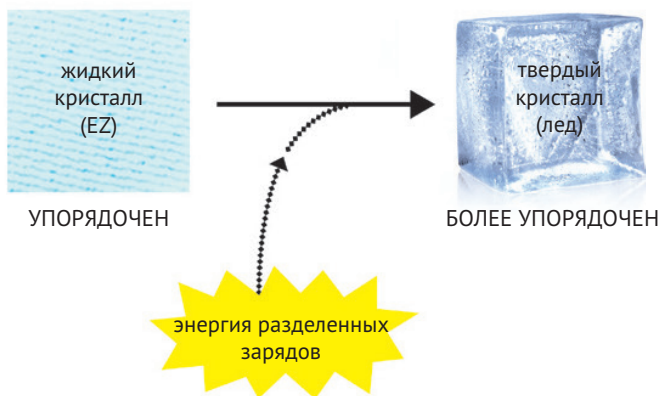
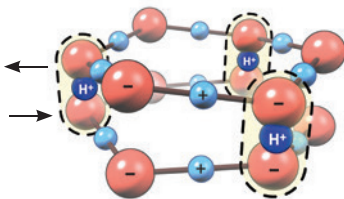


Рис. 17.1. Переход от EZ-воды (а) ко льду. Для перехода требуются протоны (б) и планарный сдвиг (в). (Пластины ледяного кристалла не совсем плоские из-за локальных сил притяжения и отталкивания)

Рис. 17.2. Энергетические аспекты перехода от EZ-воды ко льду. Необходимая энергия поступает от вытесненных протонов

Опираясь на эти разумные доводы, мы решили на опыте выяснить, является ли переход исключочающей зоны в лед чем-то большим, чем просто теоретическая возможность; мы исследовали, как именно образуется лед.

17.3. ДОКАЗАТЕЛЬСТВА ТОГО, ЧТО ЗОНА ИСКЛЮЧЕНИЯ ПРЕДШЕСТВУЕТ ЛЬДУ

Для проведения экспериментов мы использовали большую охлаждающую пластину. Поверх пластины расположили полоску нафiona, рядом с которой капнули немного воды (рис. 17.3). Затем начали охлаждение пластины.

Первой областью, которая замерзала задолго до объемной воды, всегда была прилегающая к нафionу исключочающая зона. Обычно замораживание начиналось в какой-то момент на границе раздела вода-нафion (рис. 17.3, левый кадр, белое пятно). Затем замораживание распространялось, причем, как правило, быстрее вдоль исключочающей зоны, чем перпендикулярно к ней; иногда длинные участки исключочающей зоны замерзали заметно быстрее, чем объемная вода, находившаяся непосредственно рядом с ней (правая панель, стрелка).

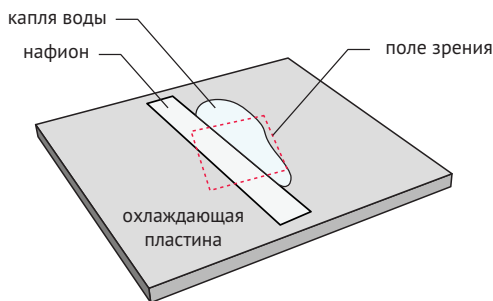
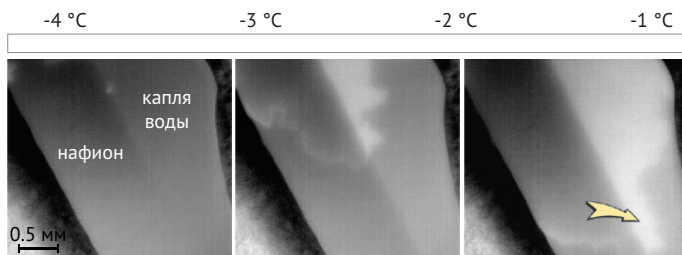


Рис. 17.3. Последовательное замораживание капли воды на холодной пластине, зафиксированное инфракрасной камерой. Капля находится рядом с полоской нафiona. Область замораживания возникает в исключочающей зоне рядом с нафionом (снимок слева, белая точка) и наиболее быстро распространяется вдоль исключочающей зоны (снимок справа, стрелка)



Мы обнаружили похожее замораживание исключочающей зоны в совершенно другой экспериментальной

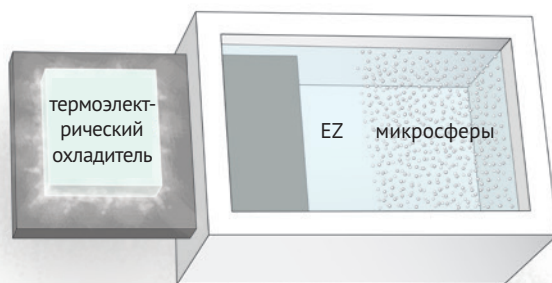
установке (рис. 17.4). Мы вставили язычок из теплопроводящего материала в небольшую экспериментальную камеру, содержащую воду и микросферы. Язычок можно было охлаждать снаружи либо с помощью термоэлектрического эффекта, либо путем воздействия жидкого хладагента. В любом случае язычок отбирал тепло из воды.

По мере охлаждения воды сначала не происходило ничего особенного. Затем рядом с язычком стала образовываться исключаящая зона. (Материал язычка не сильно влиял на этот процесс, зато хорошо отводил тепло.) Исключаящая зона постепенно увеличивалась по мере охлаждения – часто до 500 микрометров и более. Затем происходило одно из двух: в некоторых случаях микросферы внезапно вторгались в исключаящую зону, группировались и замерзали в ней. Мы знали, что эти исключаящие зоны замерзли, потому что заключенные в них микросферы были полностью раздавлены льдом. В других случаях микросферы оставались снаружи, и исходная исключаящая зона замерзала без них. В любом случае, формирование исключаящей зоны предшествовало появлению льда, как и в эксперименте с нафионом и каплей воды.

Дополнительный вопрос: почему охлаждающий язычок порождает исключаящую зону? Этот очевидный парадокс сначала озадачил нас, потому что формирование исключаящей зоны обычно требует *притока* инфракрасной энергии. Если охлаждающая поверхность не испускает ИК-излучение, следует ожидать, что любая возникшая возле нее исключаящая зона должна уменьшаться, а не расти.

Наконец, мы пришли к выводу, что в этой системе исключаящая зона получает намного больше инфракрасного излучения, чем ожидалось, из-за асимметрии. В схеме, показанной на рис. 17.4, холодная пластинка, безусловно, отводит инфракрасное излучение влево из прилегающей воды. Тем не менее объемная вода за пределами исключаящей зоны передает ИК-излучение в направлении холодного язычка; это излучение проникает внутрь зарождающейся зоны, тем самым помогая ее строить. Такой двухэтапный механизм обеспечивает значительный поток инфракрасного излучения: инфракрасная энергия в изобилии течет через исключаящую зону; следовательно, исключаящая зона увеличивается. Очевидно, именно эта увеличенная зона превращается в лед.

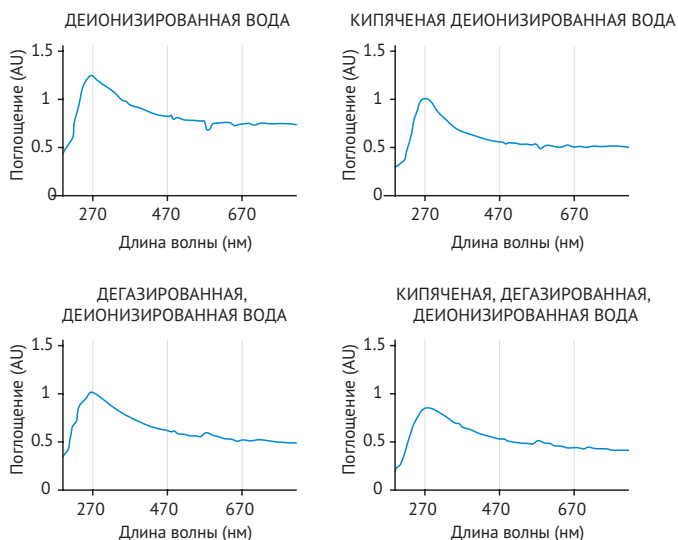
Рис. 17.4. Охлаждающее устройство для исследования связи между исключавшей зоной и образованием льда



Мы решили, что это вполне обоснованный ответ на дополнительный вопрос, потому что рост исключавшей зоны означал, что за ее пределами должны накапливаться протоны. Эти вытесненные протоны будут готовы к дальнейшему гипотетическому вторжению в исключавшую зону. Мы испытали прилив вдохновения.

А как насчет таяния? Если замораживание подразумевает преобразование исключавшей зоны в лед, то таяние должно сопровождаться обратным превращением. Это ожидание легко подтвердилось [3]. Мы поместили небольшие кусочки льда в стандартные кюветы для спектрофотометра и исследовали талую воду. Как только лед начинал таять, на длине волны 270 нм постоянно появлялся характерный для исключавшей зоны пик. Пик наблюдался независимо от того, какая вода была заморожена (рис. 17.5). Пик сохранялся несколько десятков секунд, а затем исчезал, когда тающий лед завершал свой переход в объемную воду.

Рис. 17.5. Показания спектрометра, полученные для талой воды. Всегда наблюдается пик на длине волны 270 нм



Так что не имеет значения, замерзает вода или тает. Так или иначе, исключаяющая зона и лед очевидно тесно связаны. Это неудивительно, учитывая их похожую структуру.

Кристаллы снега

Практически всем доводилось любоваться великолепной картиной тихо падающего снега. Кристаллы снега обычно демонстрируют гексагональную симметрию: уложенные друг на друга плоскости вырезаны по краям так, что образуют гексагональный порядок (см. рисунок справа). При формировании таких симметричных объектов пригодились бы уложенные друг на друга шестиугольные структуры, и на эту роль хорошо подходят многослойные EZ-плоскости.



17.4. ТЕМПЕРАТУРА И ОБРАЗОВАНИЕ ЛЬДА

Подтвердив связь исключаяющих зон и льда, мы решили проверить вторую часть нашей гипотезы: приток протонов. Было похоже, что эти протоны легко доступны – изгнанные при формировании исключаяющей зоны и ожидающие поблизости, они были готовы вторгнуться обратно и создать лед.

Но сначала нам нужно было решить проблему температуры. Большинство ученых разделяют распространенное мнение о том, что именно охлаждение, а не приток протонов, является решающим фактором образования льда. Утверждение о ключевой роли притока протонов оставляет охлаждению подсобную роль, что выглядит странно: как охлаждение может играть вспомогательную роль, если замерзание воды всегда происходит при фиксированной температуре? Эта температура настолько хорошо известна, что даже служит точкой отсчета на шкале Цельсия.

Хотя про температуру замерзания воды 0°C известно даже детям, оказывается, что вода не всегда замерзает при этой температуре. Я не имею в виду воду с растворенным веществом, где так называемые «коллигативные» свойства могут снизить критическую температуру на несколько градусов. Я имею в виду чистую воду

в стандартных условиях, когда температура замерзания иногда может опускаться намного ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ученым известно, что чистая вода при атмосферном давлении на уровне моря иногда не замерзает, пока температура не опустится почти до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. В замкнутом объеме температура замерзания может опускаться еще ниже, вплоть до $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ [4]. Эта трудно замораживаемая вода хорошо известна, но плохо изучена. Такую воду принято называть «переохлажденной» – ярлык, который просто отвлекает нас от отсутствия реального понимания.

Способность пороговой температуры замерзания опускаться настолько низко является очень полезным свойством воды. Если бы вода всегда замерзала при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, то растения не смогли бы выжить в холодном климате: вода внутри каждого растения превратилась бы в лед, безжалостно разрывающий все растение, включая даже органеллы клеток. Этого не происходит, потому что температура замерзания воды может опуститься до значений намного ниже, чем температура холодного окружающего воздуха.

С другой стороны, утверждение о том, что температура не является решающим фактором, как мы привыкли думать, выглядит менее удивительным в свете присущей этому термину расплывчатости (см. главу 10). Неоднозначность понятия «температура» заставила нас искать другой, более значимый фактор, чтобы понять, как образуется лед. Этот фактор, согласно рассматриваемой гипотезе, должен быть связан с вторжением протонов.

Группа израильских ученых недавно пролила свет на этот вопрос, исследуя роль электрических зарядов во время замораживания [5]. Исследователи поместили пирозлектрический элемент в камеру с внешним охлаждением (рис. 17.6). Полярность поверхностного заряда пирозлектрика может меняться в зависимости от температуры материала. Это позволило исследователям проверить, как отрицательный, нейтральный или положительный поверхностный заряд влияет на замерзание.

Отрицательный заряд поверхности затрудняет замерзание прилегающей воды (вверху); то есть температура воды должна была достичь очень низких значений, прежде чем вода могла замерзнуть. Положительный заряд дает обратный эффект – способствует замерзанию (внизу). То есть когда поверхность имела положительный заряд, прилегающая вода могла за-

мерзнуть до того, как ее температура сильно снизится. Положительный заряд способствует замерзанию.



Рис. 17.6. Эксперименты с пирозлектриком. Отрицательный заряд замедляет образование льда, а положительный заряд способствует образованию льда

Примечательным аспектом этого эксперимента был порядок замораживания. Заполненная водой камера охлаждалась со всех сторон; лед должен был начать формироваться на периферии камеры. Обычно так и было, но только не во время эксперимента с положительным зарядом. В этом случае лед начинал формироваться прямо на пирозлектрически заряженной границе раздела, что указывает на важность положительного заряда для образования льда. Что еще более показательно: чтобы вызвать положительный заряд, пирозлектрический материал нужно было *нагреть*. Другими словами, вода предпочитала замерзнуть рядом с положительно заряженным объектом, даже когда этот объект *добавлял* тепло воде. И никакого обязательного охлаждения для образования льда!

Этот последний результат приводит к совершенно однозначному заключению – даже если в предыдущих параграфах этого не говорилось, – что температура не может быть ключевым фактором замораживания воды. В зависимости от обстоятельств к образованию льда может привести даже добавление теплоты.

Результаты этих экспериментов показывают важность наличия положительного заряда для образования льда. Они также подтверждают нашу гипотезу, поскольку положительно заряженные протоны, если они проникнут в исключющую зону, могут также способствовать образованию льда. Эксперимент говорит о том, что протоны не менее важны, чем понижение температуры.

17.5. ВТОРЖЕНИЕ ПРОТОНОВ

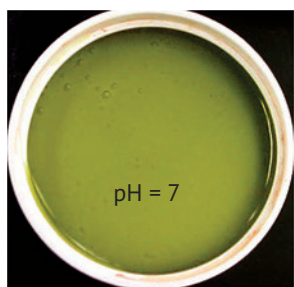
Воодушевленные этими результатами, мы приступили к проверке того, действительно ли вторжение протонов приводит к формированию льда. Сначала мы повторили ранние эксперименты – классические измерения электрического потенциала полувекковой давности, которые обнаружили появление положительного заряда во время замерзания [6]. Мы поместили электрод перед наступающим ледяным фронтом. По мере приближения ледяного фронта электрический потенциал резко возрастал на один вольт. Это подтверждение увеличения положительного заряда подтолкнуло нас к дальнейшим проверкам с помощью прямой визуализации.

Для этого мы использовали рН-чувствительный краситель (глава 5). В одной из экспериментальных установок использовали круглую камеру (рис. 17.7). Мы поместили эту камеру на металлическую пластину, охлаждаемую жидким азотом. При комнатной температуре краситель стал зеленым (вверху), что указывает на нейтральность. Когда вода начала замерзать по краю, цвет обода стал темно-оранжевым (внизу), указывая на многочисленные протоны в регионах, подвергающихся замерзанию. Данные эксперименты не могли объяснить, как эти протоны там оказались, и лишь показали, что они проникают в область формирования льда, как и предполагалось.

Мы получили аналогичный результат, когда вставили алюминиевую охлаждающую пластину в камеру с водой. И снова область, где образовался лед, стала темно-оранжевой, что указывает на присутствие большого количества протонов (рис. 17.8).

Мы получили другой, аналогичный набор результатов, используя капли. Капля, помещенная на холодную пластину, замерзала от основания вверх. Мы могли наблюдать периферию капли, а не ее внутреннюю часть. Когда периферия замерзла, ее цвет сменился

КОМНАТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА



НАЧАЛО ЗАМЕРЗАНИЯ

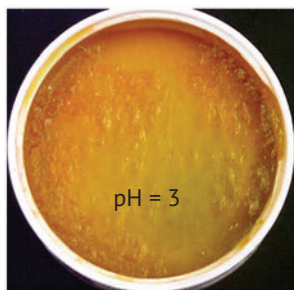
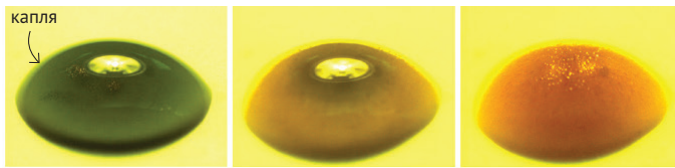
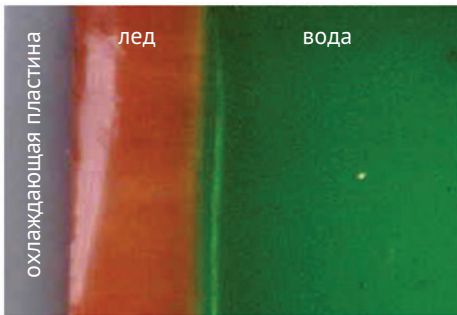


Рис. 17.7. Вода, содержащая разбавленный рН-чувствительный краситель. Значения рН относятся к периферии камер

с зеленого на оранжевый, что снова указывает на поступление протонов (рис. 17.9).



Уверенные в том, что результаты подтверждают ожидаемое увеличение концентрации протонов, мы применили еще один экспериментальный метод, используя инфракрасную камеру. Здесь мы снова исследовали каплю на охлаждающей поверхности. Если протоны заполнили периферийную исключаящую зону капли, то это движение заряда должно вызвать вспышку инфракрасной энергии. Мы уже видели много примеров того, как движение заряда генерирует инфракрасное излучение (глава 10). Мы подтвердили факт излучения – свечение в ИК-диапазоне сохранялось около секунды (рис. 17.10). Наличие этого излучения еще раз подтвердило гипотезу о скачке концентрации протонов, а также заставило нас понять, что капля способна «блестяще» сигнализировать о своем переходе в лед.

Наше восхищение этим блеском ненадолго рассеялось, когда кто-то предложил иную интерпретацию – что вспышка просто сигнализировала о «теплоте плавления». Вода якобы теряет тепло при замерзании; выражением этой потери тепла может быть инфракрасная вспышка. Поначалу такая интерпретация казалась правдоподобной; однако что-то здесь было не так. Отвод тепла должен вызывать охлаждение капли или, по крайней мере, сохранение температуры; но шкала температуры (рис. 17.10, справа), кажется, указывает на то, что капля нагревается в момент замерзания (третий кадр). Почему во время замерзания

Рис. 17.8. Цвет pH-чувствительного красителя при замораживании. Темно-оранжевый цвет указывает на низкий pH и, следовательно, обилие протонов

Рис. 17.9. Последовательность изменения цвета при замерзании капли на охлаждаемой поверхности. Оранжевый цвет указывает на рост концентрации приповерхностных протонов, когда капля начала замерзать

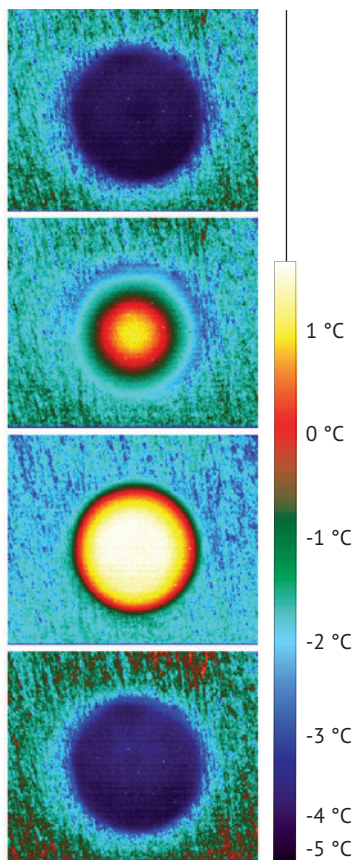


Рис. 17.10. Инфракрасное излучение капли воды при замерзании на холодной поверхности. Во время замерзания капля излучает короткую вспышку инфракрасного света (сверху вниз). Время кадров в секундах: 3,3, 29,0, 29,3, 30,0. Справа показана шкала эквивалентных температур

что-то должно нагреваться? Это бессмысленное утверждение.

Инфракрасную вспышку намного легче объяснить, если интерпретировать ее как следствие быстрого притока протонов. Вспышку создает движение зарядов. Эта интерпретация дополняет наблюдаемое изменение цвета pH-красителя, которое более прямо указывает на избыток протонов. Следовательно, два набора результатов подкрепляют друг друга: протоны, очевидно, устремляются внутрь исключавшей зоны, чтобы сформировать лед.

17.6. СПУСКОВОЙ СИГНАЛ ДЛЯ ВЫСВОБОЖДЕНИЯ ПРОТОНОВ

Если протоны ведут себя, как ожидалось, то какой-то импульс должен дать возможность изгнанным протонам вернуться в исключавшую зону. Без этого спускового крючка протоны могли бы непрерывно просачиваться обратно в исключавшую зону, постоянно образуя лед. Этого не происходит.

Что может спровоцировать массовое вторжение протонов?

Напомним, что для образования кристаллов льда требуются свободные протоны; эти протоны проникают между плоскостями исключавшей зоны, образуя лед (рис. 17.1). Однако свободные протоны практически не встречаются. Обычным носителем протонов является ион гидроксония – молекула воды с присоединенным к ней протоном.

Вы могли предположить, что для образования льда подойдет ион гидроксония, но вся проблема в размере. Ионы гидроксония могут сильно притягиваться к отрицательно заряженной EZ-решетке, но объем иона не позволяет ему проникнуть внутрь (рис. 17.11). Даже молекулы воды слишком велики, чтобы попасть внутрь. Масштабы препятствия становятся очевидными при рассмотрении размеров порталов, пронизывающих исключавшую зону. У шестиугольных отверстий крошечные размеры. Что еще более важно, шестиугольники соседних плоскостей не совпадают (глава 4); это сводит

фактический размер сплошных отверстий почти до нуля. Только крошечный протон достаточно мал, чтобы проникнуть внутрь EZ-решетки.

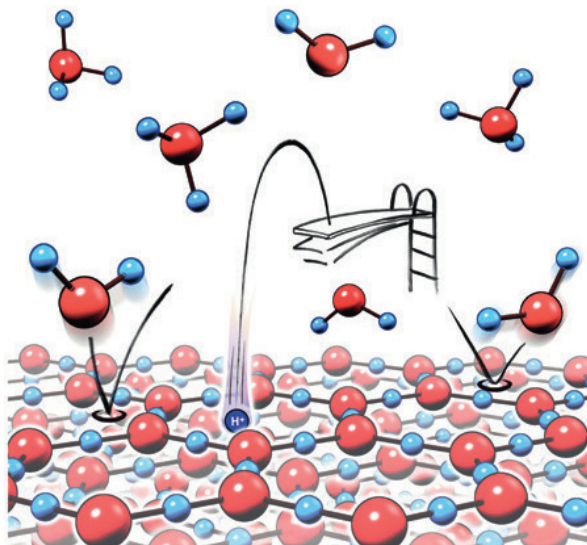


Рис. 17.11. Только протоны достаточно малы, чтобы проникнуть внутрь решетки исключавшей зоны

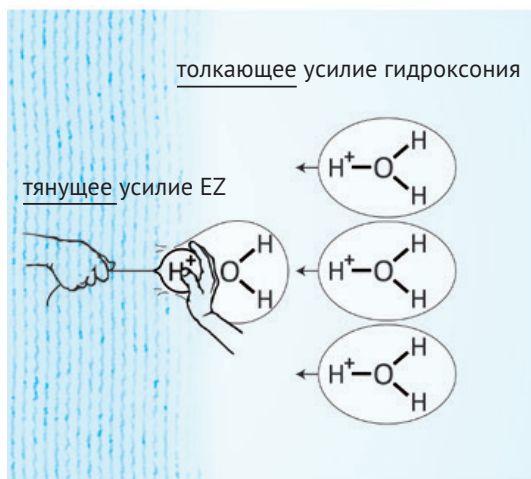
Однако протоны обычно связаны. Чтобы освободиться, протоны должны покинуть свои ионы гидроксония. Только тогда они смогут проникнуть в решетку исключавшей зоны, чтобы создать лед. Следовательно, высвобождение протонов может служить спусковым крючком для образования льда. Любое воздействие, способное отделить протон от иона гидроксония, может вызвать образование льда.

Чтобы понять, каким может быть это воздействие, подумайте о силах, действующих на протон. Одна сила исходит непосредственно от отрицательного заряда исключавшей зоны, который притягивает положительный протон, словно втягивая его внутрь (рис. 17.12, слева). Этой притягивающей силы недостаточно, чтобы освободить протон; в противном случае, поскольку такая сила присутствует всегда, протоны непрерывно проникали бы в исключавшую зону, сводя на нет любую перспективу сохранения наблюдаемого положительного заряда объемной воды. Притяжение исключавшей зоны помогает протону обрести свободу, но этого недостаточно.

Вторая сила – отталкивающая. Она возникает из-за того, что все остальные ионы гидроксония находятся по одну сторону от уязвимого иона гидроксония (рис. 17.12, справа). Их положительные заряды оттал-

Рис. 17.12. Силы, действующие на ион гидроксония, оказавшийся вблизи исключавшей зоны. Отрицательный заряд исключавшей зоны притягивает протон (слева), в то время как остальные ионы гидроксония в объемной воде толкают его (справа), в конечном итоге отрывая от молекулы воды. Свободный протон может легко проникнуть в отрицательно заряженную исключавшую зону

кивают рассматриваемый протон. Эта толкающая сила срывает протон с насиженного места, после чего отрицательная исключавшая зона может полностью затянуть протон внутрь.



Чтобы вытеснить протон, толкающая сила должна превысить некоторый порог. Величина силы будет зависеть от количества толкающих ионов гидроксония, что, в свою очередь, зависит от общего количества и распределения ионов. Как только количество ионов гидроксония станет достаточно большим – если это произойдет, – протоны, близкие к исключавшей зоне, начнут вырываться на свободу. Затем эти протоны должны быть мгновенно поглощены исключавшей зоной, проникая в самый глубокий слой с наибольшим отрицательным зарядом. Это событие должно инициировать образование льда.

17.7. КООПЕРАТИВНОСТЬ ПРИ ОБЛЕДЕНЕНИИ: ПОЧЕМУ ЛЕД ВСЕГДА ТВЕРДЫЙ

Вышеописанный механизм раскрывает процесс формирования льда: исключавшая зона растет, а ионы гидроксония накапливаются за ее пределами. Протоны, оторванные от этих ионов гидроксония, проникают в самый отрицательный (то есть самый глубокий) слой исключавшей зоны, затем в следующий и т. д. Лед формируется постепенно.

Кажется, все в порядке – можно подумать, что этот механизм способен построить монолитный кусок льда. Однако любая неоднородность, которая оставляет без

протонов хотя бы один слой, может нанести серьезный ущерб: вместо одного массивного куска могут образоваться два куска меньшего размера. Поскольку этого не происходит, природа, вероятно, использует прием, обеспечивающий целостность льда: например, только что возникший слой льда может способствовать формированию следующего слоя. Такая взаимопомощь слоев может гарантировать, что лед останется цельным куском.

Кооперативность – неотъемлемая черта предложенного механизма вторжения протонов. Представьте себе две смежные плоскости (рис. 17.13). В структуре исключаяющей зоны эти плоскости сдвинуты относительно друг друга (слева); в структуре льда они совмещены (в центре). Для образования льда плоскость В должна сместиться относительно плоскости А.

Представляя себе этот сдвиг, обратите внимание на положение электронов кислорода. В конфигурации исключаяющей зоны, показанной на рис. 17.13, электроны кислорода в плоскости В ориентируются в направлении плоскости А под влиянием соседнего положительного заряда (слева, в прямоугольнике). Это притяжение удерживает плоскости вместе. Как только плоскость В переходит в конфигурацию льда, обстановка меняется. На смену нижнему атому водорода приходит атом кислорода (в центре). Соседние атомы кислорода, которые не склеены прибывшими протонами, теперь отталкиваются, смещая свои электроны в противоположных направлениях (прямоугольник в середине). Электроны верхнего атома кислорода теперь встречаются со следующей волной протонов, поступающей сверху, создавая аттрактор (справа). По сути, сдвиг кладет перед дверью коврик с надписью «Добро пожаловать!» для проходящих протонов.

Этот приглашающий коврик лежит на поверхности только что формирующегося льда. Его присутствие гарантирует, что протоны попадут туда, куда нужно, чтобы сформировать следующий слой. Таким образом, лед гарантированно и непрерывно строит плоскость за плоскостью. Лед непременно будет цельным.

Приятная особенность предлагаемого механизма выращивания слоев льда заключается в том, что эти слои правильно структурированы. Обратите внимание на расположение протонов между слоями (синие точки на рис. 17.13 справа); протоны связывают каждый второй кислород. Эти протоны смещены на 60° от

протонов следующего слоя. Повторяющийся сдвиг на 60° в плоскости образует правильную структуру льда.

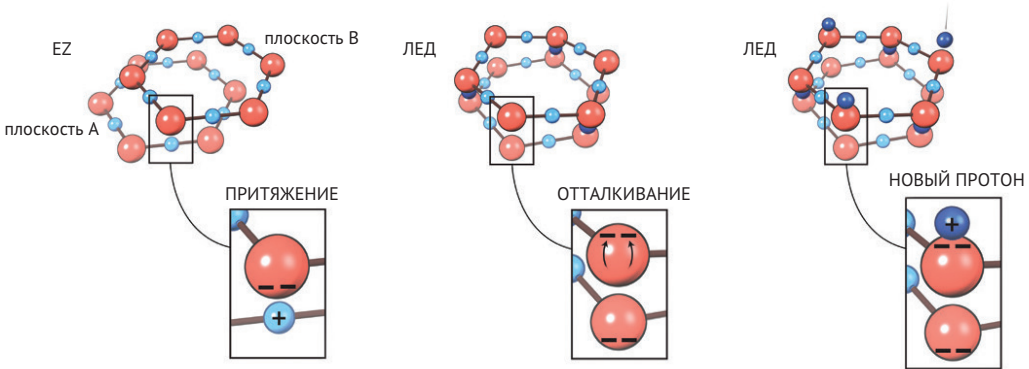


Рис. 17.13. Взаимопомощь слоев при формировании льда. Конфигурация исключяющей зоны показана слева. Во вновь созданном слое льда (в центре) отрицательный заряд молекулы кислорода смещается вверх (прямоугольник), притягивая поступающие протоны. Этот сдвиг происходит в трех лежащих в одной плоскости атомах кислорода, расположенных рядом с атомами кислорода внизу. Поступающие протоны оседают в этих трех точках (справа), создавая основу для следующего слоя льда

Итак, модель формирования льда выглядит вполне достоверной. Взаимопомощь слоев модели гарантирует, что лед будет твердым; а рабочие характеристики модели гарантируют, что все протоны окажутся на своих местах.

17.8. ФОРМИРОВАНИЕ ЛЬДА В ЕСТЕСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Чтобы понять, как образуется лед в естественных условиях в соответствии с предложенной моделью, рассмотрим замерзание озера. Допустим, приходит зимний холодный фронт. Воздух над озером несет ледяной холод. Уменьшается испарение. Поверхностные исключяющие зоны остаются в основном на месте, образуя относительно устойчивую EZ-оболочку – что-то вроде крышки на кастрюле с водой (рис. 17.14а).

Эта оболочка испускает инфракрасное излучение в более холодный воздух наверху; тем временем снизу поступает ИК-излучение от более теплой воды (рис. 17.14). Такой интенсивный поток инфракрасного излучения позволяет исключяющей зоне расти, как показано на рис. 17.4. Ионы гидроксония, скопившиеся внизу, не могут выйти – их не пускает оболочка. Как только их концентрация вырастет достаточно, чтобы преодолеть критический порог, вытесненные протоны начнут вторгаться в исключяющую зону, проникая до наиболее отрицательной области наверху. Эти протоны образуют самый верхний слой льда (рис. 17.14б).

Между тем исключяющая зона продолжает расти благодаря стабильному потоку инфракрасного излу-

чения. Лед становится толще. Взаимопомощь слоев обеспечивает равномерное нарастание льда. Чем холоднее воздух, тем толще лед. Когда лед становится достаточно толстым, чтобы уменьшить вертикальный градиент инфракрасного излучения, процесс роста льда, наконец, останавливается.

Можно сделать вывод, что формирование льда в лабораторной камере происходит по тому же принципу, что и в природе.

Замерзание сверху вниз

Замерзание воды сверху вниз – удачное природное явление. Если бы вода замерзала снизу вверх, то, кроме неудобства катания на коньках для людей, вытолкнутая из замерзшей воды рыба задохнулась бы на поверхности. К счастью, лед всегда растет с поверхности вниз. Рыбы спасены.



17.9. ЭНЕРГЕТИКА ЛЬДА – ОТВЕТЫ НА ВОПРОСЫ

Разобравшись с механизмом формирования льда, мы можем заняться вопросами энергетики льда. У нас возникло два таких вопроса. Первый: почему энергетика образования льда, судя по всему, не совпадает с ожиданиями? Этот вопрос решен. Формирование льда требует *притока* энергии; этот механизм использует потенциальную энергию разделенных зарядов, которая выделяется, когда положительные заряды протонов объединяются с отрицательно заряженной исключаящей зоной для образования кристаллической структуры льда. Следовательно, энергетика образования льда аналогична энергетике роста исключаящей зоны. Оба процесса требуют энергии.

Потребность в энергии для создания порядка – принцип, который может сбивать с толку. По край-

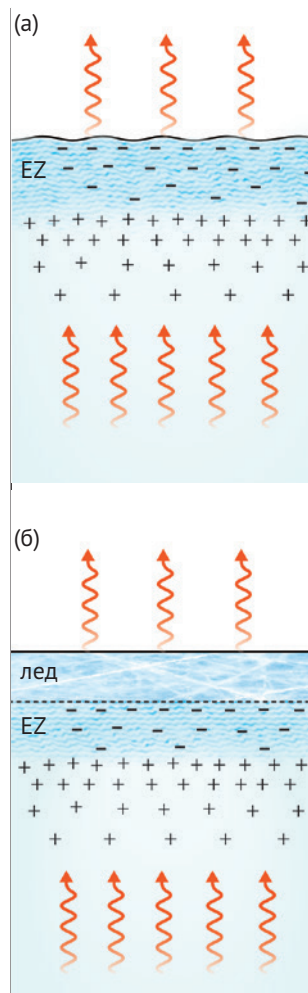


Рис. 17.14. Образование льда в естественных водоемах. Инфракрасная энергия, поступающая от более теплой воды внизу, создает поверхностную исключаящую зону и разделяет заряды (а). Вторгающиеся обратно протоны создают лед (б). По мере продолжения процесса лед становится толще

ней мере, для одного вида энергии – тепла – традиционная термодинамика утверждает обратное: тепло увеличивает «тепловое движение», тем самым способствуя беспорядку. В эпоху паровых машин, когда формально зародилась термодинамика, нагревание сосуда с водой до образования пара, несомненно, увеличивало видимый беспорядок. Однако глава 15 продемонстрировала свидетельства роста упорядоченности при образовании пара под влиянием лучистой энергии. Таким образом, один из центральных принципов классической термодинамики оказался под вопросом. Действительно ли тепловая энергия приводит к беспорядку?

Этот вопрос открывает еще один ящик Пандоры: *тип* энергии. Термодинамические принципы выросли из понятия тепловой энергии и позже были экстраполированы для применения ко всем формам энергии. Эта экстраполяция содержит элемент внутреннего противоречия: предполагалось, что тепловая энергия создает *беспорядок*, в то время как в более общем плане энергия необходима для уменьшения энтропии и создания порядка. Последний принцип согласуется с привычным опытом и всем, что мы видели на этих страницах, а первое утверждение может быть ошибочным (глава 15). Возможно, вся подводимая энергия создает какую-то разновидность порядка, в том числе упорядочение электрических зарядов.

Аналогичные вопросы о роли энергетики возникают в отношении образования кристаллов соли и сахара (глава 10). Здесь кристаллизация тоже происходит по мере охлаждения растворов (рис. 17.15); следовательно, может показаться, что упорядочение происходит по мере отвода энергии. Однако есть одна загвоздка: растворы обычно предварительно нагревают; в других случаях необходимая инфракрасная энергия может поглощаться извне. Эта поступившая извне энергия создает исключаящую зону и разделяет заряды. Разделенные заряды впоследствии служат источником энергии, которая приводит в действие механизм упорядоченного формирования кристаллов – в данном случае за счет явления притяжения подобного к подобному (глава 8). Таким образом, энергия, питающая процесс роста кристаллов соли и сахара, может действовать во многом подобно энергии, участвующей в формировании исключаящих зон и льда. Энергия обеспечивает упорядоченность вещества.



Рис. 17.15. Сахарный леденец. Погруженные в раствор нити служат местами зарождения кристаллов сахара. Раствор сахара сначала нагревают; затем по мере охлаждения раствора образуются кристаллы

Тот же принцип применим и к металлам. Обычные металлы обладают атомной кристаллическостью. При нагревании до температуры плавления металлы становятся более аморфными. Возникает вопрос, обеспечивает ли поступающее при плавлении излучение энергию, необходимую для перекристаллизации, как в кристаллах соли и сахара. Если это так, то к металлам может применяться тот же принцип: для увеличения упорядоченности требуется энергия.

Возвращаясь ко льду, давайте теперь рассмотрим вторую из, казалось бы, аномальных энергетических характеристик льда: так называемую скрытую теплоту. В общепринятом понимании скрытая теплота – это тепло, выделяемое при превращении воды в лед. Считается, что отдаваемое тепло нагревает окружающую среду, в то время как температура самой воды не меняется. Однако мы этого не наблюдали. На инфракрасных изображениях замерзающих капель практически не видно нагрева окружающей среды, а замерзающая вода «нагревается» при переходе в лед (рис. 17.10). Традиционная интерпретация этих ИК-снимков утверждает, что вода становится теплее по мере перехода в лед. Этого не должно быть.

Более правдоподобная интерпретация «скрытой теплоты» вытекает из нашего представления о том, что инфракрасное излучение возникает в результате движения зарядов. Таким движением может быть в том числе вторжение протонов в исключительную зону. Следовательно, так называемая скрытая теплота может быть не чем иным, как внешним признаком этого движения протонов. «Тепло», создаваемое инфракрасной вспышкой, не имеет отношения к температуре воды.

Механические возмущения как спусковой крючок замерзания

Некоторые потрясающие явления подтверждают резкий, пороговый характер срабатывания ледового триггера.

Положите закрытую бутылку с водой в морозильную камеру. Когда вода переохладится, но еще не замерзнет, достаньте бутылку. Сильное встряхивание или удар бутылкой по столу может вызвать внезапное образование льда по всему объему воды [w3].

Эти механические воздействия могут служить источником энергии, заставляя протоны отрываться от своих молекул воды; затем протоны могут вторгаться в локальные исключаящие зоны, инициируя образование льда. Встряхивание также может облегчить процесс, создавая везикулы, включающие EZ-слои и положительный заряд – два основных элемента, необходимых для замораживания. Следовательно, механическое разрушение везикул от удара или встряхивания может снаб-

дить систему всем необходимым для начала замораживания [w4].



Еще один удивительный пример: достаньте из морозильника другую бутылку с переохлажденной водой. Откройте крышку и вылейте почти замерзшую воду в стакан с холодной водой с высоты примерно 20 см. Когда падающий поток попадает в воду внизу, это может вызвать мгновенное образование льда [w5]. В данном случае механическое воздействие тоже может высвобождать протоны, которые затем поступают в решетку исключаящей зоны и участвуют в образовании льда.

Традиционные объяснения на основе теплоты станут еще более запутанными, если вы изучите их динамику. Согласно общепринятым представлениям, скрытая теплота – это выражение физического перехода от воды ко льду. С этой точки зрения, в момент перехода воды в кристаллический лед должен образоваться одиночный выброс тепла. Однако этого совпадения во времени не наблюдается. Вместо этого мы обнаружили существенные задержки между проявлением скрытого тепла и физическим переходом воды в лед.

В одном из таких экспериментов каплю воды помещали на охлаждаемую металлическую пластину. Во время замерзания капля излучала инфракрасную вспышку, как показано на рис. 17.10. Вспышка происходила примерно за полсекунды до начала замерзания, то есть до того, как мы смогли увидеть какие-либо

признаки увеличения объема, которые свидетельствуют о физическом образовании льда. Мы наблюдали еще более длительные задержки в трубчатой колонке, которую заполнили водой и установили вертикально на морозильной плите. Область инфракрасного излучения образовалась внизу, постепенно перемещалась вверх и, наконец, достигла верхней части колонки, но увеличение объема было обнаружено в верхней части только примерно через 1,5 секунды. Такие задержки противоречат обычным ожиданиям, что выделение скрытой теплоты и образование льда происходят одновременно.

Предложенная нами модель, с другой стороны, рассматривает образование льда как двухэтапный процесс: сначала протоны вторгаются в исключющую зону, формируя вспышку инфракрасного излучения; затем эти протоны занимают свои места между плоскостями исключющей зоны, сдвигая их в сторону и раздвигая между собой. Это создает лед. Иницирующее событие предшествует структурному событию – о чем свидетельствует упомянутая выше задержка между вспышкой излучения и образованием льда.

Таким образом, мы нашли решение второй энергетической проблемы и объяснили явление скрытой теплоты. Я считаю, что предложенная модель соответствует всем основным представлениям об энергии.

17.10. Лед комнатной температуры?

Хотя температура замерзания может существенно различаться в «нестандартных» условиях, насколько мне известно, никто никогда не видел, чтобы глыба льда образовывалась при комнатной температуре. С другой стороны, если ключевым событием в образовании льда является вторжение в исключющую зону протонов, существование льда комнатной температуры не кажется невозможным. Лед комнатной температуры может образоваться в ситуациях, когда концентрация протонов и EZ-материала необычно высока и они сочетаются должным образом.

Одной из таких ситуаций может быть водный мостик (глава 1). Самым очевидным свойством мостика является его жесткость: несмотря на пролет в несколько сантиметров, он почти не провисает (рис. 17.16). Складывается впечатление, что по нему можно ходить. Возникает вопрос: можно ли объяснить наблюдаемую жесткость присутствием ледяной фазы?



Рис. 17.16. Водный мостик между двумя стаканами. Мостик имеет почти цилиндрическое поперечное сечение, которое состоит из кольца и сердечника, которые невозможно различить на этом снимке. Длина мостика примерно 3 см

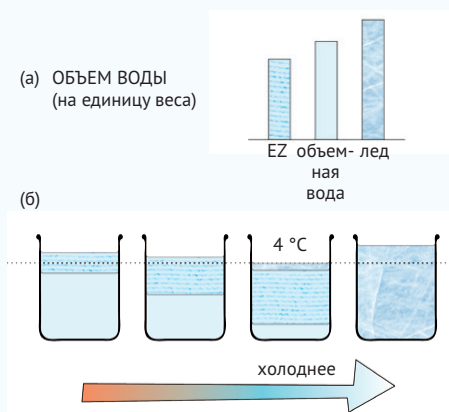
Почему плотность воды наиболее высока при 4 °С?

Плотность воды меняется по мере охлаждения. Ученые до сих пор не объяснили, почему плотность воды достигает максимального значения при 4 °С. Что волшебного в этом числе?

Охлажденная вода может содержать несколько фаз, каждая с разной плотностью (а). Поскольку EZ-вода более плотная, чем объемная вода (главы 3, 4), а объемная вода более плотная, чем лед (который плавает на воде), все дело в относительном содержании каждой фазы. Чтобы вычислить общую плотность, вам нужно знать, сколько воды в каждом из фазовых состояний находится в емкости.

Предположим, емкость с водой постепенно охлаждается. Нарастающие инфракрасные градиенты увеличивают сквозной поток инфракрасного излучения, что приводит к появлению EZ-материала (рис. 17.4); при дальнейшем увеличении доли исключаяющей зоны объем постепенно уменьшается (б). Можно сказать, что общая плотность увеличилась.

Когда охлаждение достигает порога фазового перехода, эти исключаящие зоны могут начать превращаться в лед. Переход может первоначально происходить в локализованных об-



ластях, где концентрация протонов превышает пороговую величину; фрагменты льда могут начать заменять EZ-материал. Поскольку объем льда значительно больше объема EZ-воды, общий объем может начать увеличиваться. Можно оценить температуру, при которой начинается этот процесс. Если сплошное замораживание происходит при температуре около 0 °С при стандартных условиях, то фрагментарный лед может начать формироваться при температуре на несколько градусов выше – вероятно, на 2–3 °С. Таким образом, температура 4 °С будет соответствовать минимальному объему (третий стакан) и, соответственно, максимальной плотности воды.

Поперечное сечение мостика состоит из двух зон: кольцевой и центральной. Центральная зона содержит протонированную воду, текущую из положительно заряженного стакана в сторону отрицательно заряженного стакана. Подобный поток зарядов должен испускать сильное инфракрасное излучение, и это было подтверждено исследователями [7, рис. 5]. Кольцевая зона движется в обратном направлении и медленнее. Эта зона имеет несколько свойств, присущих исключаяющей зоне: она исключает частицы;

она несет отрицательный заряд (поскольку берет начало на отрицательном электроде); и она обладает двойным лучепреломлением [7], что подразумевает упорядоченность.

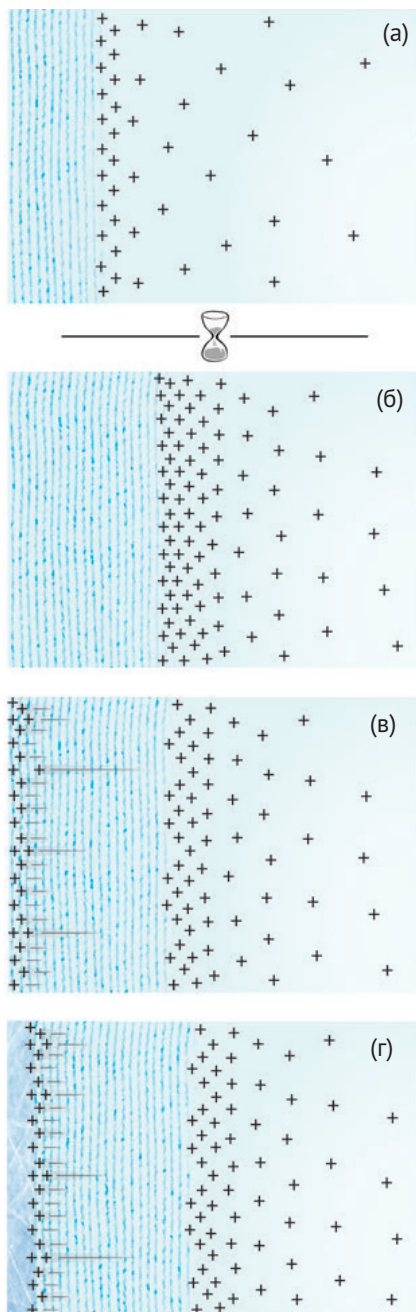
Кольцевая исключаяющая зона с обильным потоком протонов, протекающих поблизости, кажется подходящим местом для образования льда. В зависимости от того, какой из этих двух объектов более подвижен, лед может образовываться в кольцевом пространстве, в центральном стержне или в них обоих. Такой лед существует лишь временно; тем не менее даже кратковременный динамически зарождающийся лед, распределенный по всему мостику, может обеспечивать его прочность. Похожие на лед структуры мостика предлагались и раньше [8].

Лед комнатной температуры может образовываться и в конфигурациях, отличных от водяного мостика. Лед возникает, например, когда электрическое поле приложено к узкому зазору, заполненному водой [9]. Приложенное поле предположительно создает достаточное количество положительных зарядов, чтобы преобразовать межфазные исключаяющие зоны в лед даже при комнатной температуре. Все, что нужно в любой из этих ситуаций, – это большое количество EZ-материала и множество протонов поблизости.

Эти протоны могут объяснять другие явления, включая аномалию, обнаруженную юным Мпембой. В теплой воде содержится большое количество двух ингредиентов, необходимых для замораживания: везикулы с EZ-оболочкой и связанные с ними протоны (глава 14). Если под рукой есть эти ингредиенты, замораживание смеси порошка для приготовления мороженого и теплой воды не займет много времени. Наше почтение господину Мпембе!

17.11. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Переход от воды ко льду требует промежуточного звена в виде исключаяющей зоны (рис. 17.17). По мере охлаждения воды образуется исключаяющая зона (рис. 17.17а); тем временем непосредственно рядом с ней накапливаются ионы гидроксония (рис. 17.17б). Когда концентрация ионов гидроксония достигает критического уровня, протоны высвобождаются и вторгаются в отрицательную EZ-область (рис. 17.17в). Эти протоны связывают соседние плос-



кости EZ, инициируя структурный переход в лед. По мере продолжения процесса происходит рост массива льда (рис. 17.17г).

Эта модель протонного вторжения разрешает энергетический парадокс. Создание кристаллического порядка для формирования исключаяющей зоны требует *притока* энергии. Создание кристаллического порядка для образования льда обычно требует охлаждения, что подразумевает отвод энергии. Механизм протонного вторжения разрешает парадокс: приток протонов в исключаяющую зону вносит потенциальную энергию разделения зарядов – энергию, которая была ранее сохранена. Таким образом, в обеих ситуациях для создания упорядоченной структуры требуется энергия. Энергетика кристаллизации воды остается неизменной.

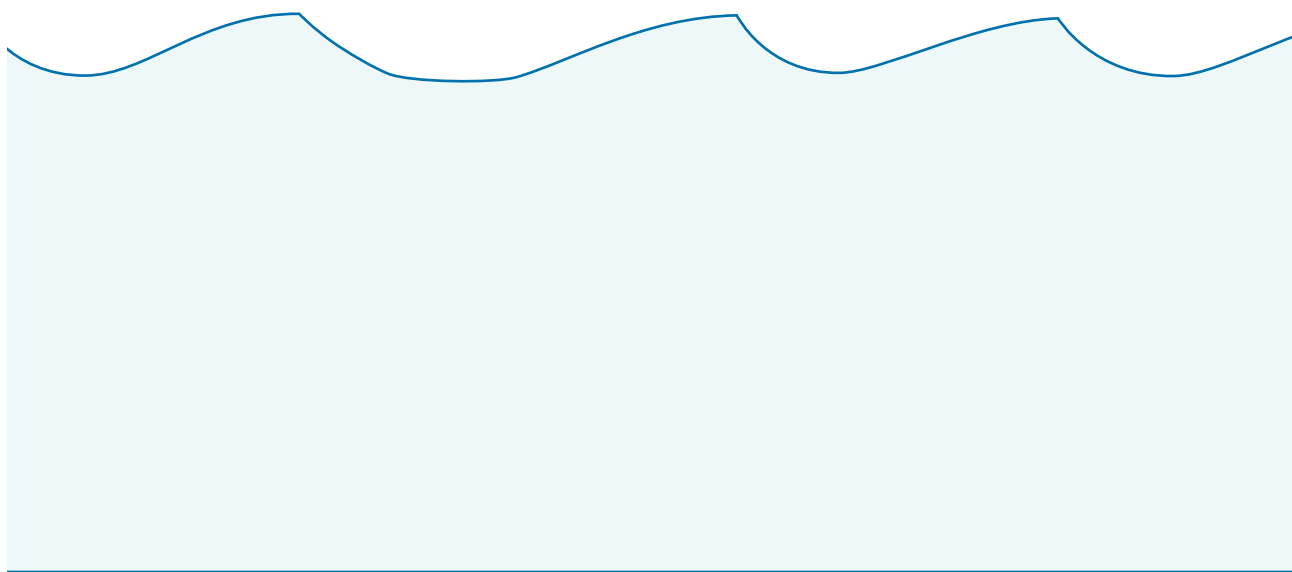
В этой главе мы завершаем наше научное исследование воды и ее фаз. Мы изучили множество разнообразных свойств воды, от кипения до замерзания, подчеркивая центральную роль четвертой фазы воды практически во всех ее проявлениях.

В следующей главе мы заканчиваем наше путешествие, возвращаясь в область, с которой начали, – философию. Мы размышляем о том, куда пришли, чему научились и куда могли бы пойти дальше. С нашей нынешней точки зрения будущее сулит нам захватывающую эпоху неудержимого прогресса науки.

Рис. 17.17. Механизм образования льда. Охлаждение происходит слева. Инфракрасное излучение проходит справа налево через исключаяющую зону. Этот поток энергии расширяет исключаяющую зону и разделяет все большее количество положительных и отрицательных зарядов. Последующее вторжение положительных зарядов приводит к образованию льда

РАЗДЕЛ V

Подводим итоги:
раскрываем тайны Земли





Глава 18 Тайные законы природы

Во время разговора со студентами в лаборатории несколько лет назад внезапно погас свет – я чуть не потерял сознание. До этого мое здоровье было настолько крепким, что мой семейный врач почти не помнил моего имени и даже не узнавал меня в лицо. Подозревая опухоль, он рекомендовал сделать компьютерное сканирование мозга. Я оказался в длинном страшном туннеле томографа, ожидая узнать, сколько дней мне осталось жить.

Лаборанты установки МРТ (магнитно-резонансный томограф) не проявили ни намёка на тревогу. Их безразличие заставило меня предположить, что я услышу какую-нибудь шутку о качестве моего мозга. Но этого не случилось. Тем не менее я невольно задумался над тем, что мы недавно слышали о мозге видного американского политического деятеля с довольно сомнительным интеллектом: после МРТ-исследования его мозга врач якобы сообщил: «Извините, сэр, но похоже, что у вас не осталось ничего хорошего в голове слева и ничего нужного справа»⁵.

Что ж, какое-то здоровое серое вещество, видимо, все-таки осталось в моем собственном мозгу. Все было в порядке (насколько они могли судить по МРТ).

Тема МРТ имеет отношение ко всему, о чем вы читали в этой книге. Установка МРТ формирует детальное изображение укромных уголков и извилин мозга на основе релаксационных свойств протонов. Поскольку подавляющее большинство протонов тела поступает из воды, это означает, что МРТ измеряет свойства воды в организме. Если бы на воду не влияли смачиваемые ей структуры, машина не смогла бы создать изображение; все объекты выглядели бы одинаково. МРТ

⁵ В оригинале весьма язвительная по отношению к политике, но не поддающаяся буквальному переводу игра слов: «*nothing right on the left side, and nothing left on the right side*», которую по достоинству оценят читатели, знающие английский язык. – Прим. перев.

может успешно визуализировать ваш мозг – к добру или к худу, – потому что тонкие структуры мозга глубоко влияют на близлежащую воду.

Это возвращает нас к главному посланию моей книги: вода участвует практически во всем. Ее поведение зависит от местоположения и микросреды, и эту зависимость наглядно подтверждает успех технологии МРТ, поскольку она основана на способности воды по-разному организовываться рядом с разными поверхностями.

Пройдя через 17 наполненных водой глав, вы, несомненно, заслужили право на краткий пересказ вышеизложенного материала и предположение о том, что из этого может следовать. Позвольте мне начать с описания того, как наш подход вписывается в общие рамки науки, а затем перейти к основным вопросам – принципам, с которыми вы, возможно, согласитесь после прочтения этой книги.

18.1. КУЛЬТУРА НАУКИ

Вплоть до современной эпохи ученые были сосредоточены на поиске фундаментальных механизмов. Они пытались понять, как устроен мир. Если их усилия приводили к открытию парадигмы, объясняющей различные явления более простым способом, ученые понимали, что достигли значимого результата. Периодическая таблица Менделеева предсказуемо объясняет множество известных химических реакций, а гелиоцентрическая Солнечная система Галилея избавила от необходимости задействовать сложные эпициклы для описания планетных орбит.

Стремление к простоте, похоже, в значительной степени покинуло научную сцену. За четыре десятилетия занятий наукой я видел, как эта благородная культура уступает место менее смелому и более прагматичному подходу. Благородный порыв угас. Ученые довольствуются сиюминутными достижениями в узкоспециализированных областях, а не ищут фундаментальные истины, которые объясняют широкий спектр явлений природы. Похоже, что поиск деталей вытеснил стремление к простым объединяющим истинам (рис. 18.1).

Мне кажется, что этот мелочный подход указывает на то, что развитие науки в целом пошло наперекосяк. Вы можете судить об этом сами, оценив результаты – небольшое количество концептуальных революций, произошедших за последние три десятилетия. Я не

имею в виду технический прогресс, такой как компьютеры или интернет, и не говорю про шумиху или *обещанные* революции, такие как лекарства от рака или бесконечная бесплатная энергия. Я имею в виду *осуществленные концептуальные революции*, которые уже изменили мир. Сколько таких революций вы можете назвать?

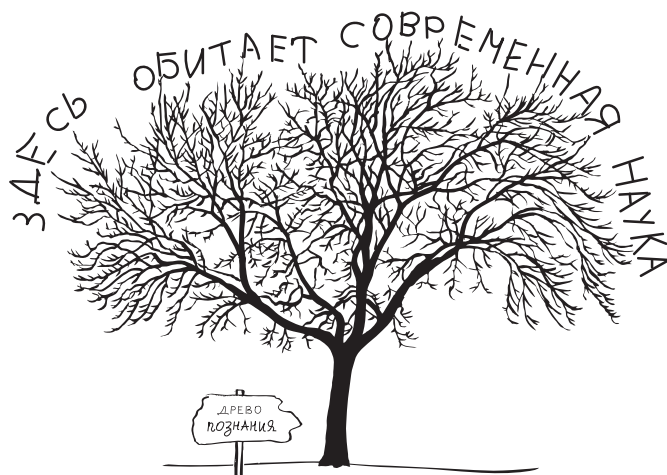


Рис. 18.1. Сегодня наука сосредоточилась в основном на периферийных ветках дерева познания, пытаюсь добавить дополнительные детали. Предполагается, что ствольные ветви и так достаточно прочны

Когда-то смелая, научная культура становится все более робкой. Теперь она движется осторожными шагами. Она редко ставит под сомнение базовые концепции, на которых основан этот вялый прогресс, особенно те идеи, которые, судя по всему, изжили себя. Наука стала послушной. Она преклоняется перед властью господствующих догм. Поступая таким образом, она производит массу данных, которые не складываются в фундаментальную систему знаний.

В предыдущих главах я попытался повернуть вспять эту тенденцию, вернувшись к традиционному способу занятий наукой. Наблюдая за обычными повседневными явлениями и применяя простую логику, я искал ответы на вопросы «как» и «почему», способные привести к открытию фундаментальных истин, но избегал при этом вопросов «сколько» и «какого рода», характерных для современного экстенсивного подхода. Я знаю, что теперь это не принято, однако думаю, что это лучший путь для достижения научного прогресса.

Идея этой книги родилась из ощущения чрезвычайной неправильности нынешних представлений о воде. Я чувствовал, что природа должна быть простой по своей сути, но все, что я читал, казалось сложным. Я мог бы пересказать основы из учебника любому,

кому это интересно, но стоило хоть немного вдуматься в эти основы – и возникали вопросы, на которые у меня не было ответа. Это не давало мне покоя.

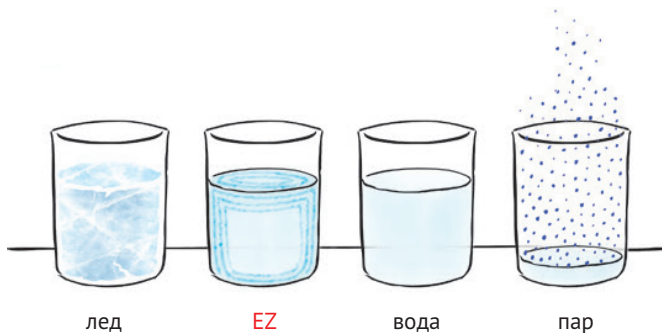
Мои поиски ответов подтолкнули меня к исследованиям в совершенно новых для меня областях. Временами меня это нервировало, поскольку огромные массивы знаний, казалось, лежали за пределами моего понимания. С другой стороны, у меня было преимущество в значительной интеллектуальной свободе: я свободно бродил по этим полям, не обремененный ограничениями традиционных идей. Некоторые области представлялись неисследованными лишь по причине их кажущейся священной неприкосновенности.

Моей единственной целью было разработать простые фундаментальные принципы, которые лягут в основу обширной системы знаний. Я не вытаскивал эти принципы из шляпы. Чтобы извлечь их из массы сопутствующих наблюдений, пришлось пройти долгий и трудный путь. В итоге я пришел к убеждению, что из моих концептуальных идей можно выделить четыре фундаментальных принципа, которые определяют наше понимание воды.

18.2. ЧЕТЫРЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ПРИНЦИПА

Принцип 1: вода существует в виде четырех фаз

Рис. 18.2. Четыре фазы воды



С детства мы знаем, что существуют три фазы воды: твердая, жидкая и парообразная. Но в этой книге говорилось о том, что можно назвать четвертой фазой, – об исключочающей зоне (рис. 18.2). Ни жидкая и ни твердая, исключочающая зона, пожалуй, больше всего похожа на жидкий кристалл с физическими свойствами, аналогичными свойствам сырого яичного белка.

Термин «исключающая зона» (exclusion zone, EZ) может показаться несколько неудачным. Мой друг Джон Уоттерсон (John Watterson) придумал этот термин давно, когда наиболее характерным свойством этой зоны была ее склонность исключать примеси. Это определение прижилось. Мы часто шутили над тем, что аббревиатура «EZ» на английском языке звучит как слово «easy» – то есть легко, просто, а не сложно. Жесткая вода богата минералами, а в EZ-воде их нет. Так что название казалось подходящим. Оглядываясь назад, я соглашусь, что термины «жидкокристаллическая фаза» или «полужидкая фаза» несут в себе больше смысла, поскольку они более естественно вписываются в таксономию, основанную на фазах.

Как бы то ни было, последовательность фаз, которую мы запомнили в школе, отличается от того, о чем говорится в этой книге. Если предыдущие главы правильно объясняют природу воды, тогда более подходящая последовательность фаз будет такой: твердая, жидкокристаллическая, жидкая и парообразная – четыре фазы, а не три.

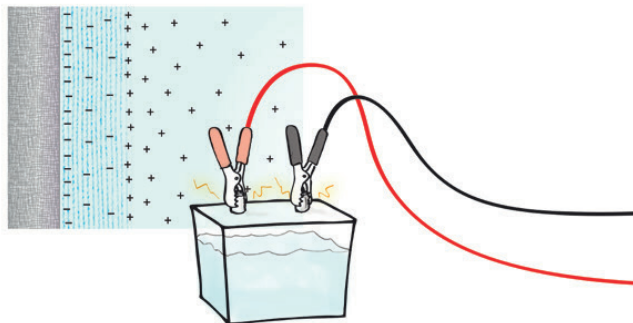
К чему нас приведет эта новая трактовка? Может быть, курс общей химии когда-то покажется студентам-первокурсникам менее страшным.

Принцип 2: вода сохраняет энергию

В состоянии четвертой фазы вода хранит энергию за счет двух явлений – упорядочивания структуры и разделения зарядов. Упорядоченная структура хранит потенциальную энергию конфигурации, которую можно извлечь, когда порядок уступает место беспорядку. Для живой клетки этот переход от порядка к беспорядку представляет собой ключевой механизм переноса энергии [1]. Второе явление, разделение зарядов, подразумевает то, что электроны образуют отрицательный заряд исключаемой зоны, в то время как ионы гидроксония за пределами зоны несут соответствующий положительный заряд. Это пространственное разделение зарядов напоминает электрическую батарею – еще одно обособленное хранилище потенциальной энергии (рис. 18.3).

Природа редко игнорирует запасы доступной энергии. Она мудро использует эту энергию для своих разнообразных нужд. Некоторые примеры описаны в этой книге, но их существует гораздо больше.

Рис. 18.3. Водяная батарея



Альберт Сент-Дьёрдьи, отец современной биохимии, высказал известное мнение о том, что в основе биологии лежит использование энергии электронов. Исключающая зона предлагает готовый источник электронов, который может запускать любую из многочисленных биологических реакций. Дополнительные ионы гидроксония могут играть не менее важную роль. Скопления положительных ионов создают давление, приводящее в движение потоки жидкости. Потоки встречаются практически везде: в примитивных и развитых клетках, в наших кровеносных системах, в сосудах травы и высоких деревьев. Ионы гидроксония могут служить источником энергии движения многих потоков.

Потенциальная энергия исключаяющей зоны также может приводить в действие различные устройства. Одно из таких устройств – очиститель воды. Поскольку исключаяющая зона вытесняет любые растворенные вещества, включая загрязняющие примеси, отбор воды из исключаяющей зоны означает получение очищенной воды. Уже продемонстрирован простой и удивительно эффективный прототип [2]. Это фильтр без фильтра, который обеспечивает очистку воды за счет поступающей извне электромагнитной энергии.

Как видите, потенциальная энергия, связанная с четвертой фазой воды, может использоваться по-разному. Энергия и вода – практически синонимы. По этой причине (глава 7) было предложено абстрактное уравнение $E = \text{H}_2\text{O}$. В этом уравнении не совпадают единицы измерения, но оно отражает суть второго принципа: *вода сохраняет энергию*.

Принцип 3: вода получает энергию из света

Все знают, что Солнце освещает Землю и снабжает энергией многие земные процессы. Здесь новация заключается в том, что Солнце (возможно, наряду

с другими космическими и земными источниками лучистой энергии) может инициировать процессы, выходящие за рамки очевидного, особенно с участием воды (рис. 18.4).

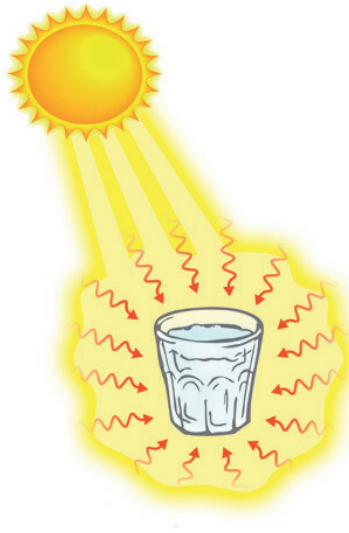


Рис. 18.4. Главный источник электромагнитной энергии на Земле

Электромагнитная энергия Солнца создает запас потенциальной энергии в воде. Фотоны заряжают исключющую зону, создавая порядок и разделяя заряды. Они делают это, расщепляя молекулы воды, упорядочивая EZ-структуру и тем самым формируя заряд одной полярности в упорядоченной зоне и заряд противоположной полярности в объемной воде за ее пределами.

Обычно мы не рассматриваем воду как накопитель энергии. стакан воды считается более или менее находящимся в равновесии с окружающей средой. Однако доказательства, изложенные в главах этой книги, ясно показывают обратное: стакан воды, как правило, весьма далек от энергетического равновесия. Эта концепция может показаться диковинной, но предыдущие главы убедительно продемонстрировали, что вода постоянно поглощает энергию из окружающей среды и преобразует ее в работу.

Идея трансформации энергии выглядит менее экзотической, если вспомнить, что растения делают то же самое. Растения поглощают лучистую энергию из окружающей среды и используют ее для работы. Растения, конечно, состоят в основном из воды; поэтому неудивительно, что стакан с водой, стоящий рядом с вашим горшечным растением, может преобразовы-

вать энергию падающих фотонов так же, как это делает растение.

Возможно, стоит по-новому взглянуть на любой сценарий, при котором лучистая энергия падает на воду. Наше внимание было сосредоточено в основном на химии, но также следует учитывать физику – и особенно биологию. Например, когда солнце пробивается сквозь облака, мы испытываем прилив энергии. Это ощущение, несомненно, связано с нашей психикой; однако мы можем чувствовать себя возбужденными еще и потому, что падающая солнечная энергия трансформируется в реальную химическую энергию в наших клетках. Волны определенной длины проникают глубоко в наши тела – просто поместите фонарик за ладонь и посмотрите, как свет проникает на другую сторону.

Предположение, что солнечная энергия может обеспечивать энергией наши тела, может показаться надуманным, но клетки действительно растут быстрее под воздействием инфракрасной лучистой энергии (света). Поскольку свет создает запас энергии в воде, а мы в основном состоим из воды, кажется вероятным, что мы могли бы получать энергию из окружающей среды. В биологии известно множество механизмов получения энергии из света.

Подобные принципы могут быть применимы к физике и технике. Например, отбирая накопленную водой энергию света, можно производить полезную электрическую энергию. Разделение зарядов исключачающей зоной очень похоже на начальный этап фотосинтеза, который влечет за собой расщепление воды рядом с гидрофильной поверхностью. Это сходство может быть знаменательным: если этот первый шаг сработает так же эффективно, как и при фотосинтезе, то сбор световой энергии при помощи воды может иметь многообещающее будущее. Конструкции, построенные на основе воды, однажды могут заменить современные фотоэлектрические панели.

В любом случае, *электромагнитная энергия создает потенциальную энергию в воде*, которая в результате становится хранилищем энергии. Эта энергия может излучаться обратно к источнику, из которого она пришла, и/или ее можно извлекать для выполнения работы. Энергия – это дар окружающей среды; это по-настоящему бесплатная энергия, которую мы, возможно, сможем использовать для разрешения сегодняшнего энергетического кризиса.

Принцип 4: одноименные заряды могут притягиваться

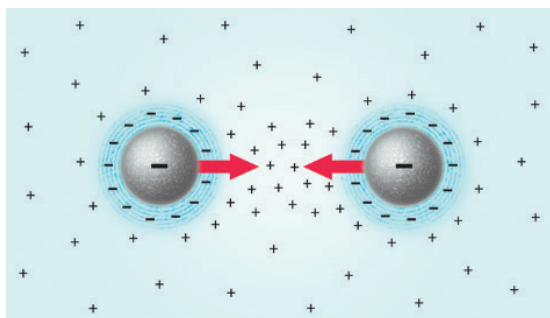


Рис. 18.5. Опосредованное притяжение одноименных зарядов

Возможно, наименее очевидный принцип – это притяжение одноименных зарядов (рис. 18.5). Идея о том, что одноименные заряды могут притягиваться друг к другу, кажется абсурдной, пока вы не поймете, что она не требует нарушения законов физики. Сами по себе одноименные заряды не притягиваются; притяжение опосредуется зарядами противоположного знака, которые расположены между ними. Эти противоположные заряды притягивают одноименные заряды по направлению друг к другу, пока сила отталкивания одноименных зарядов не уравнивает притяжение.

Многие физики полагают, что подобное притяжение не может существовать, несмотря на согласие некоторых известных физиков, в том числе Ричарда Фейнмана. Фейнман придумал фразу «подобное стремится к подобному через посредничество противоположности». Он понимал, что такое притяжение может иметь фундаментальное значение для физики и химии. Тем не менее большинство ученых рефлекторно полагают, что одноименные заряды всегда должны отталкиваться. Вряд ли можно предположить, что эти заряды вдруг начнут *притягиваться*, если между ними расположился заряд противоположного знака.

Причина этого неприятия, вероятно, скрывается в семантике нашей речи: кто может представить, что «одноименные заряды притягиваются»? Несомненно, любое подобное явление должно выглядеть как дело рук дьявола или, в лучшем случае, как наивное шарлатанство. Инстинктивная уверенность в том, что одноименные заряды всегда должны отталкиваться, зачастую ведет к излишне сложным интерпретациям или

просто неправильным ответам. Что может быть более фундаментальным, чем взаимодействие между двумя зарядами?

Эта книга рассказывает про основы механизма притяжения одноименных зарядов. Далее она раскрывает источник зарядов с противоположным знаком. Множество зарядов противоположного знака возникают при формировании исключаяющей зоны, которая обеспечивает достаточный запас протонов, необходимых для объяснения притяжения.

Помимо лабораторных опытов, подобное притяжение может быть широко распространено во всей природе, как в микро-, так и в макромире. Один из возможных примеров – происхождение жизни. Происхождение жизни, вероятно, связано со сгущением рассеянных веществ в оформленные объекты; без такой конденсации не может образоваться ни одна клетка или предшественники клеток. Притяжение одноименных зарядов обеспечивает естественный механизм для подобной самосборки: просто добавьте света, подождите немного – и готово!

Другой пример – облака в атмосфере. Облака состоят из заряженных капель аэрозоля. Согласно общепринятой трактовке, такие капли должны взаимно отталкиваться и рассеиваться; однако механизм притяжения одноименных зарядов объясняет, почему эти капли на самом деле собираются в объекты, которые мы называем облаками. Солнце обеспечивает энергию, а противоположные заряды – притяжение.

Всякий раз, когда отталкивание одноименных зарядов предлагается для объяснения какого-либо явления, спросите себя, может ли обратный эффект – *притяжение* одноименных зарядов – послужить лучшим объяснением. В некоторых случаях вы можете обнаружить, что идете по правильному пути, предлагая более простое и точное объяснение природных явлений.

Четыре только что обозначенных принципа можно рассматривать как законы природы, ранее спрятанные в каком-то темном уголке, а теперь извлеченные на яркий свет (рис. 18.6).

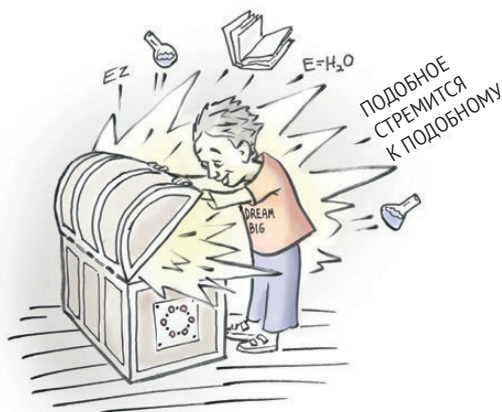


Рис. 18.6. Скрытые принципы извлечены на яркий свет

Судя по всему, эти принципы обладают большим объясняющим потенциалом. Они помогают ответить на простые вопросы «почему» и «как»: почему гели удерживают воду? Как возникают бесконечные цепочки пузырьков в шампанском? Как смоченные водой деревянные клинья могут раскалывать массивные каменные глыбы? Как вода добирается до вершины гигантских секвой? Почему вы видите облака пара над своим горячим кофе? Почему на льду вы можете поскользнуться и разбить нос? Эти принципы позволяют дать ответ на многие другие вопросы, с которыми мы не могли справиться до сих пор.

Я считаю, что благодаря своей огромной объясняющей способности эти четыре принципа могут оказаться основополагающими для большей части природы.

18.3. ПОЧЕМУ ЭТИ ПРИНЦИПЫ ОСТАВАЛИСЬ В СЕКРЕТЕ?

Если эти принципы столь полезны, как я утверждаю, то почему они так долго оставались в тени? Как им удалось избежать включения в общую систему знаний?

На ум приходят как минимум четыре причины.

- Во-первых, наука о воде имеет неоднозначное прошлое. Фиаско с поливодой оставило болезненные шрамы; они десятилетиями удерживали любопытных ученых подальше от воды. Любой исследователь, достаточно уверенный в себе, чтобы публично заявить о неожиданном

открытии, неизбежно подвергнется атаке с помощью тех же копий, которые метали в открывателей поливоды. Несомненно, их вода была загрязненной (хотя и природная вода отнюдь не чистая); следовательно, от результатов их экспериментов можно запросто отмахнуться. Затем на смену поливоде пришла память воды. Это явление казалось настолько невероятным, что стало предметом научных шуток: у вас проблемы с запоминанием имен? Попробуйте пить больше воды – это укрепит память.

- Таким образом, исследования воды дважды пережили болезненный удар. Какой благоразумный ученый рискнет заняться исследованиями воды, когда вас на каждом шагу подстерегают критики и их презрение? Вода стала рискованным предметом для изучения. Погружение в науку о воде стало таким же опасным, как и погружение в едкую кислоту.
- Вторая причина медленного принятия новых знаний – повсеместная распространенность воды. Вода повсюду. Вода занимает центральное место во многих природных процессах, поэтому *лишь немногие ученые способны подвергнуть основы сомнению*. Ведь кто-то же разработал эти основы, наверное, столетие или два назад. Эти авторитеты отпугивают ученых. Во всяком случае, сопротивление догматиков лишь усилилось: сегодняшняя наука вознаграждает тех, кто сосредоточен только на модных областях, оставляя мало места для сомнений в повсеместно преподаваемых фундаментальных идеях. Стимул подвергать сомнению фундаментальные принципы практически исчез, особенно когда речь идет о чем-то столь привычном и распространенном, как вода.
- Третья причина медленного принятия таких фундаментальных принципов разъедает всю науку изнутри: интеллектуальная робость. *Поллагаться на устоявшуюся мудрость безопаснее, чем иметь дело с неопределенностью революционного разрушения*. Возможно, вы думали, что ученые поддерживают прогресс фундаментальной науки, но большинству из них удобнее ограничиваться незначительными отклонениями от статус-кво. Ученые способны противостоять революции так же, как и любой другой защитник ортодоксальных взглядов.

- Четвертая причина – *явный страх*. Бросить вызов устоявшейся системе знаний – значит наступить на пятки ученым, построившим карьеру на поддержке этой системы. Их ответ может быть болезненным. Я, например, попрал ногами немало священных земель науки, а теперь ожидаю заслуженную взбучку, особенно от тех ученых, чей авторитет, гранты, патенты и другие атрибуты власти зависят от неприкосновенности их научного статуса. Подобное отступничество можно простить ребенку; увы, взрослые ученые редко заслуживают прощения. Поэтому многие исследователи в своем стремлении сделать карьеру занимают консервативную позицию, держась подальше от всего, что хоть немного похоже на призыв к революции. Благодаря этой позиции они никогда не останутся без куска хлеба на своем научном столе.

Подводя итог, можно сказать, что по крайней мере четыре фактора отвечают за ненормально медленное признание новых принципов: (1) плохая репутация связанных с водой исследований отпугивает ученых; (2) вода настолько распространена, что все полагают, будто основные проблемы решены; (3) отклонение от общепринятых взглядов может причинить неприятности; (4) ставить под сомнение господствующие взгляды всегда было рискованным делом как в науке, так и в других областях.

Эти препятствия в совокупности привели к длительному застою. Я изо всех сил пытаюсь завести этот заглохший двигатель.

18.3. ЧТО НАС ЖДЕТ В БУДУЩЕМ?

Я начал с простого вопроса: почему исключаящие зоны избавляются от примесей? Чем больше я искал, тем больше находил. Наконец, мне удалось сформулировать четыре общих принципа и различные идеи, с которыми вы познакомились в этой книге.

Предсказывать, как далеко могут нас завести эти принципы, – это искушение, перед которым я, по общему признанию, не устоял. Изначально я намеревался включить в эту книгу материалы по физике и биологии, но читатели предварительных набросков убедили меня ограничиться лишь химией воды. Однако принципы, предложенные в этой книге, естественным образом распространяются на другие области

науки; поэтому я планирую выпустить дополнительные книги. Я еще многое хочу сказать, особенно о физике и биологии.

Ключом к успеху во всех этих областях науки должна быть постоянная готовность признать, что король голый. Даже величайшие герои науки могли ошибаться. Эти ученые были людьми: они ели ту же пищу, что и мы, наслаждались теми же страстями, что и мы, и страдали теми же слабостями, к которым склонны мы. Их идеи не обязательно непогрешимы. Это может показаться непочтительным, но если мы надеемся постичь фундаментальные истины, нам нужно мужество, чтобы подвергнуть сомнению все без исключения основополагающие предположения, особенно те, которые выглядят уязвимыми. В противном случае мы рискуем обречь себя на вечное невежество.

Никто не может предсказать, куда нас заведут такие исследования. В этой неопределенности и заключается очарование научного поиска: благодаря смелым экспериментам, логическому мышлению и счастливому случаю мы можем осветить темные уголки природы.



Справочные материалы

Глава 1

1. Osada Y. and Gong J. (1993): Stimuli-responsive polymer gels and their application to chemomechanical systems. *Prog. Polym. Sci.*, 18, 187–226.
2. Ovchinnikova K. and Pollack G. H. (2009): Cylindrical phase separation in colloidal suspensions. *Phys. Rev. E*. 79(3), 036117.
3. Klyuzhin I. S., Ienna F., Roeder B., Wexler A. and Pollack G. H. (2010): Persisting water droplets on water surfaces. *J. Phys. Chem. B* 114, 14020–14027.

w1. <http://www.youtube.com/watch?v=FhBn1ozht-E>.

w2. <http://www.youtube.com/watch?v=yDun7ILKrUI>.

w3. http://www.youtube.com/watch?v=oY-1eyLEo8_A.

Глава 2

1. Ball Philip (1999): *H₂O: A Biography of Water*. Weidenfeld & Nicholson.
2. Ball P. (2008): Water as an Active Constituent in Cell Biology. *Chem. Rev.* 108, 74–108.
3. Roy R., Tiller W. A., Bell I., Hoover M. R. (2005): The Structure of Liquid Water: Novel Insights From Materials Research; Potential Relevance to Homeopathy. *Materials Research Innovations Online* 577–608.
4. Schiff Michel (1995): *The Memory of Water*, Thorsens.
5. Walach H., Jonas W. B., Ives J., Van Wijk R., Weingartner O. (2005): Research on Homeopathy: State of the Art. *J. Alt. and Comp Med.* 11(5): 813–829.

6. Montagnier L., Aissa J., Del Giudice E., Lavallee C., Tedeschi A. and Vitiello G. (2011): DNA waves and water. *J. Phys: Conf. Series* vol. 306 (online).

w1. <http://www1.lsbu.ac.uk/water/>.

Глава 3

1. Henniker J. C. (1949): The depth of the surface zone of a liquid. *Rev. Mod. Phys.* 21(2): 322–341.
2. Pollack G. H. (2001): *Cells, Gels and the Engines of Life: A New Unifying Approach to Cell Function*. Ebner and Sons, Seattle.
3. Zheng J. M. and Pollack G. H. (2003): Long-range forces extending from polymer-gel surfaces. *Phys. Rev E*. 68: 031408.
4. Zheng J. M., Chin W. C., Khijniak E., Khijniak E., Jr., Pollack G. H. (2006): *Surfaces and Interfacial Water: Evidence that hydrophilic surfaces have long-range impact*. *Adv. Colloid Interface Sci.* 127: 19–27.
5. Chai B., Mahtani A., Pollack G. H. (2012): Unexpected presence of solute-free zones at metal-water interfaces. *Contemporary Materials III*: 1–12.
6. Zheng J. M., Wexler A., Pollack G. H. (2009): Effect of buffers on aqueous solute-exclusion zones around ion-exchange resins. *J. Colloid Interface Sci.* 332: 511–514.
7. Klyuzhin I., Symonds A., Magula J. and Pollack G. H. (2008): A new method of water purification based on the particle-exclusion phenomenon. *Environ. Sci and Technol.* 42(16): 6160–6166.

8. Yoo H., Baker D. R., Pirie C. M., Hovakemian B. and Pollack G. H. (2011): Characteristics of water adjacent to hydrophilic interfaces. In: *Water: The Forgotten Biological Molecule* Ed. Denis Le Bihan and Hidenao Fukuyama, Pan Stanford Publishing Pte. Ltd. www.panstanford.com, pp. 123–136.
9. Green K., Otori T. (1970): Direct measurement of membrane unstirred layers. *J Physiol (London)* 207: 93–102.
10. Ling G. N. (2001): *Life at the Cell and Below-Cell Level: The Hidden History of a Fundamental Revolution in Biology*. Pacific Press, NY.
11. Olodovskii P. P. and Berestova I. L. (1992). On Changes in the Structure of Water due to its contact with a solid phase. *I NMR Spectroscopy Studies. J. Eng'ng. Phys and Thermophys.* 62: 622–627.
12. Yoo H., Paranjli R. and Pollack G. H. (2011): Impact of hydrophilic surfaces on interfacial water dynamics probed with NMR spectroscopy. *J. Phys. Chem Letters* 2: 532–536.
13. Bunkin N. F. (2011): The behavior of refractive index for water and aqueous solutions close to the Nafion interface. http://www.watercon.org/water_2011/abstracts.html.
14. Tychinsky V. (2011): High Electric Susceptibility is the Signature of Structured Water in Water-Containing Objects *WATER* 3, 95–99.
15. Ho Mae-wan (2008): *The Rainbow and the Worm: The Physics of Living Organisms*. 3rd edition. World Scientific Co.
16. Roy R., Tiller W. A., Bell I. and Hoover M. R. (2005): The structure of liquid water; novel insights from materials research; potential relevance to homeopathy. *Mat. Res. Innovat.* 9, 98–103.
17. Ling G. N. (2003): A new theoretical foundation for the polarized-oriented multilayer theory of cell water and for inanimate systems demonstrating long-range dynamic structuring of water molecules. *Physiol. Chem Phys. & Med. NMR.* 35: 91–130.

Глава 4

1. Franks Felix (1981): *Polywater*, MIT Press.
2. Ling G. N. (2003): A new theoretical foundation for the polarized-oriented multilayer theory of cell water and for inanimate systems demonstrating long-range dynamic structuring of water molecules. *Physiol. Chem Phys. & Med. NMR.* 35: 91–130.
3. Roy R., Tiller W. A., Bell I. and Hoover M. R. (2005): The structure of liquid water; novel insights from materials research; potential relevance to homeopathy. *Mat. Res. Innovat.* 9–4 93124: 1066–7857.
4. Ling G. N. (1992): *A Revolution in the Physiology of the Living Cell*. Krieger Publ. Co, Malabar FL.
5. Pollack G. H. (2001): *Cells, Gels and the Engines of Life*. Ebner and Sons, Seattle, WA.
6. Lippincott E. R., Stromberg R. R., Grant W. H., Cessac G. L. (1969): *Polywater Science* 164, 1482–1487.
7. Chatzidimitriou-Dreismann C. A., Abdul Redah T., Streffer R. M. F. and Mayers J. (1997): Anomalous Deep Inelastic Neutron Scattering from Liquid H₂O-D₂O: Evidence of Nuclear Quantum Entanglement. *Phys Rev Lett.* 79(15): 2839–2842.
8. Henderson M. A. (2002): The interaction of water with solid surfaces: Fundamental aspects revisited. *Surface Science Reports* 46: 1–308.
9. McGeoch J. E. M. and McGeoch M. W. (2008): Entrapment of water by subunit c of ATP synthase. *Interface (Roy. Soc.)* 5(20): 311–340.

10. Kimmel G. A., Matthiessen J., Baer M., Mundy C. J., Petrik N. G., Smith R. S., Dohnalek Z. and Kay B. D. (2009): No Confinement Needed: Observation of a Metastable Hydrophobic Wetting Two-Layer Ice on Graphene. *JACS* 131, 12838–12844.
 11. Ji N., Ostroverkhov V., Tian C. S., Shen Y. R. (2008): Characterization of Vibrational Resonances of Water-Vapor Interfaces by Phase-Sensitive Sum-Frequency Spectroscopy, *Phys Rev Lett* 100, 096102.
 12. Michaelides A. and Morgenstern K. (2007): Ice nanoclusters at hydrophobic metal surfaces. *Nature Mater.* 597–601.
 13. Xu K., Cao P. and Heath J. R. (2010): Graphene Visualizes the First Water Adlayers on Mica at Ambient Conditions. *Science* 329: 1188–1191.
 14. McGeoch J. E. M. and McGeoch M. W. (2008): Entrapment of water by subunit c of ATP synthase. *J. Roy Soc Interface* 5, 311–318.
 15. Chai B., Mahtani A. G. and Pollack G. H. (2012): Unexpected Presence of Solute-Free Zones at Metal-Water Interfaces. *Contemporary Materials*, 3(1): 1–12.
- w1. <http://www.aip.org/enews/phys-news/2003/split/648-1.html>.

Глава 5

1. Feynman R. P., Leighton R. B. and Sands M. (1964): *The Feynman Lectures on Physics* Addison-Wesley, Vol. 2, Chapter 9.
2. O'Rourke C., Klyuzhin I. S., Park J. S. and Pollack G. H. (2011): Unexpected water flow through Nafion-tube punctures. *Phys. Rev. E.* 83(5) DOI: 10.1103/PhysRevE.83.056305.
3. Pollack G. H. (2001): *Cells, Gels and the Engines of Life*. Ebner and Sons, Seattle.

4. Pauling L. (1961): *A Molecular Theory of General Anesthetics*. California Institute of Technology Contribution 2697.
5. Guckenberger R., Heim M., Cevc G., Knapp H. F., Wiegand W. and Hillebrand A. (1994): Scanning tunneling microscopy of insulators and biological specimens based on lateral conductivity of ultrathin water films. *Science* 266 (5190) 1538–1540.
6. Klimov A. and Pollack G. H. (2007): Visualization of charge-carrier propagation in water. *Langmuir* 23(23): 11890–11895.
7. Ovchinnikova K. and Pollack G. H. (2009): Can water store charge? *Langmuir* 25: 542–547.

Глава 6

1. Chai B., Yoo H. and Pollack G. H. (2009): Effect of Radiant Energy on Near-Surface Water. *J. Phys. Chem B* 113: 13953–13958.
2. Kosa T., Sukhomlinova L., Su L., Taheri B., White T. J. and Bunning T. J. (2012): Light-induced liquid crystallinity. *Nature* 485: 347–349.
3. Del Giudice E., Voeikov V., Teseschi A., Vitiello G. (2012): Coherence in Aqueous Systems: Origin, Properties and Consequences for the Living State. Chapter 4 in «Fields of the Cell» ed. Daniel Fels and Michal Cifra, In press.
4. Beatty J. T., Overmann J., Lince M. T., Manske A. K., Lang A. S., Blankenship R. E., Van Dover C. L., Martinson T. A. and Plumley F. G. (2005): An obligately photosynthetic bacterial anaerobe from a deep-sea hydrothermal vent. *PNAS* 102(26): 9306–9310.

Глава 7

1. Pollack G. H. (2001): *Cells, Gels and the Engines of Life*. Ebner and Sons, Seattle.

2. Piccardi G. (1962): *Chemical Basis Of Medical Climatology* Charles Thomas Publisher, Springfield, IL. In PDF format: <http://www.rexresearch.com/piccardi/piccardi.htm>.
 3. Rao M. L., Sedlmayr S. R., Roy R. and Kanzius J. (2010): Polarized microwave and RF radiation effects on the structure and stability of liquid water. *Current Sci* 98 (11): 1–6.
 4. Yu A., Carlson P. and Pollack G. H. (2013): Unexpected axial flow through hydrophilic tubes: Implications for energetics of water. In *Water as the Fabric of Life* eds. Philip Ball and Eshel Ben Jacob. *Eur. Phys. Journal*, in press.
 5. Rohani M. and Pollack G. H. (2013): Flow through horizontal tubes submerged in water in the absence of a pressure gradient: mechanistic considerations. Submitted for publication.
 6. O'Rourke C., Klyuzhin I., Park J.-S. and Pollack G. H. (2011): Unexpected water flow through Nafion-tube punctures. *Phys. Rev. E.* 83(5) DOI:10.1103/PhysRevE.83.0563057; Zhao Q., Coult J. and Pollack G. H. (2010): Long-range attraction in aqueous colloidal suspensions. *Proc SPIE* 7376: 73716C1–C13.
- w1. <http://www.youtube.com/watch?v=4Okllm5a1Lc>.
- w2. <http://www.youtube.com/watch?v=JE-jFJsocDW8>.

Глава 8

1. Langmuir I. (1938): The Role of Attractive and Repulsive Forces in the Formation of Tactoids, Thixotropic Gels, Protein Crystals and Coacervates. *J. Chem Phys.* 6, 873–896. DOI:10.1063/1.1750183.
2. Feynman R. P., Leighton R. B., Sands M. (1964): *The Feynman Lectures on Physics*; Addison-Wesley: Reading, MA; Chapter 2, p. 2.
3. Dosho S., Ise N., Ito K., Iwai S., Kitano H., Matsuoka H. Okumura H. and Oneo T. (1993). Recent Study of Polymer Latex Dispersions. *Langmuir* 9(2): 394–411.
4. Ito K., Yoshida H. and Ise N. (1994): Void Structure in Colloidal Dispersions *Science* 263 (5413): 66–68.
5. Ise N. (1986): Ordering of Ionic Solutes in Dilute Solutions through Attraction of Similarly Charged Solutes – A Change of Paradigm in Colloid and Polymer Chemistry. *Angew. Chem.* 25, 323–334.
6. Ise N. and Sogami I. S. (2005): *Structure Formation in Solutions, Ionic Polymers and Colloidal Particles*, Springer.
7. Ise N. (2010): Like likes like: counterion-mediated attraction in macroionic and colloidal interaction. *Phys Chem Chem Phys*, 12, 10279–10287.
8. Mudler W. H. (2010): On the Theory of Electrostatic Interactions in Suspensions of Charged Colloids. *SSSAJ*: 74 (1): 1–4.
9. Ise N. (2007): When, why, and how does like like like? – Electrostatic attraction between similarly charged species. *Proc. Jpn. Acad., Ser. B* (83): 192–198.
10. Ise N. and Sogami I. S. (2010): Comment on «On the Theory of Electrostatic Interactions in Suspensions of Charged Colloids» by Willem H. Mulder. *SSSAJ*: 74 (1): 1–2.
11. Nagornyak E., Yoo H. and Pollack G. H. (2009): Mechanism of attraction between like-charged particles in aqueous solution. *Soft Matter*, 5, 3850–3857.
12. Zhao Q., Zheng J. M., Chai B. and Pollack G. H. (2008): Unexpected effect of light on colloid crystal Spacing. *Langmuir*, 24: 1750–1755.

13. Chai B., Pollack G. H. (2010): Solute-free Interfacial Zones in Polar Liquids. *J Phys. Chem B* 114: 5371–5375.
14. Tata B. V. R., Rajamani P. V., Chakrabarti J., Nikolov A. and Wasan D. T. (2000): Gas-Liquid Transition in a Two-Dimensional System of Millimeter-Sized Like-Charged Metal Balls. *Phys. Rev. Letters* 84(16): 3626–3629.
15. Thornhill W. and Talbott D. (2007): *The Electric Universe*, Mikamar, Portland OR.

Глава 9

1. Brush S. G. (1968): *A History of Random Processes. I. Brownian Movement from Brown to Perrin*. Springer, Berlin/Heidelberg.
2. Okubo T. (1989a): Brownian Movement of Deionized Colloidal Spheres in Gaslike Suspensions and the Importance of the Debye Screening Length. *J Phys Chem* 93: 4352–4354.
3. Weeks E. R., Crocker J. C., Levitt A. C., Schofield A. and Weitz D. A. (2000): Imaging of structural relaxation near the colloidal glass transition. *Science* 287: 627–31.
4. Ise N., Matsuoka H., Ito K. and Yoshida H. (1990): Inhomogeneity of Solute Distribution in Ionic Systems. *Faraday Discuss. Chem. Soc.* 90, 153–162.
5. Okubo T. (1989b): Microscopic observation of gas-like, liquid-like, and crystal-like distributions of deionized colloidal spheres and the importance of the Debye-screening length. *J Chem Phys.* 90(4): 2408–2415.
6. Weeks E. R. and Weitz D. A. (2002): Properties of Cage Rearrangements Observed near the Colloidal Glass Transition. *Phys Rev Lett* 89(9): 095704.
7. Bursac P., Lenormand G., Fabry B., Oliver M., Weitz D. A., Viasnoff V., Butler J. P. and Fredberg J. J. (2005): Cytoskeletal remodelling and slow dynamics in the living cell. *Nature Materials* 4: 557–561.
8. Bhalerao A. and Pollack G. H. (2001): Light-induced effects on Brownian displacements. *J Biophotonics* 4(3): 172–177.
9. Das R. and Pollack G. H. (2013): Charge-based forces at the Nafion-water interface. *Langmuir*, DOI: 10.1021/la304418p.
10. Albrecht-Buehler G. (2005): A long-range attraction between aggregating 3T3 cells mediated by near-infrared light scattering. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 102(14): 5050–5055.
11. Ovchinnikova K., Pollack G. H. (2009): Cylindrical phase separation in colloidal suspensions. *Phys Rev E* 79(3): 036117.
12. Dosho S., Ise N., Ito K., Iwai S., Kitano H., Matsuoka H., Okumura H. and Oneo T. (1993): *Recent Study of Polymer Latex Dispersions*. *Langmuir* 9(2): 394–411.
13. Chai B. and Pollack G. H. (2010): Solute-Free Interfacial Zones in Polar Liquids. *J. Phys. Chem. B* 114: 5371–5375.
14. Zheng J.-M. and Pollack G. H. (2003): Long-range forces extending from polymer surfaces. *Phys Rev E.*: 68: 031408.

Глава 10

1. Ivanitskii G. R., Deev A. A. and Khizhnyak E. P. (2005): Water surface structures observed using infrared imaging. *Physics – Uspekhi* 48(11): 1151–1159.
2. Chang H. (2011): *The Myth of the Boiling Point*. <http://www.hps.cam.ac.uk/people/chang/boiling/>.
3. Montagnier L., Aissa J., Ferris S., Montagnier J. L. and Lavall C. (2009): Electromagnetic Signals are Produced by Aqueous Nanostructures Derived from Bacterial DNA Sequences. *Interdisc. Sci Comput. Life Sci* 1: 81–90. DOI 10.1007/s12539-009-0036-7.

4. Montagnier L., Aissa J., Del Giudice E., Lavallee C., Tedeschi A. and Vitiello G. (2011): DNA waves and water.
5. Gurwitsch A. G., Gurwitsch L. D. (1943): Twenty Years of Mitogenetic Radiation: Emergence, Development, and Perspectives. *Uspekhi Sovremennoi Biologii* 16: 305–334. (English translation: 21st Century Science and Technology. Fall, 1999; 12(3): 41–53.)
6. Thomas Y., Kahhak L., Aissa J. (2006): The physical nature of the biological signal, a puzzling phenomenon: The critical role of Jacques Benveniste. In Pollack G. H., Cameron I. L., Wheatley D. N., editors: *Water and the Cell*. Dordrecht: Springer, p. 325–340.
7. Chai B. and Pollack G. H. (2010): Solute-free Interfacial Zones in Polar Liquids. *J Phys. Chem B* 114: 5371–5375.
6. Zhao Q., Ovchinnikova K., Chai B., Yoo H., Magula J. and Pollack G. H. (2009): Role of proton gradients in the mechanism of osmosis. *J Phys Chem B* 113: 10708–10714.
7. Zheng J. M. and Pollack G. H. (2003): Long range forces extending from polymer surfaces. *Phys Rev E.*: 68: 031408.
8. Loeb J. (1921): The Origin of the Potential differences responsible for anomalous osmosis. *J Gen Physiol* 20; 4(2): 213–226.
9. Osada Y. and Gong J. (1993): Stimuli-responsive polymer gels and their application to chemomechanical systems. *Prog. Polym. Sci.*, 18, 187–226.
- w1. <http://news.softpedia.com/news/Unmixed-Pool-of-Freshwater-Found-in-Arctic-Ocean-193373.shtml>.
- w2. <http://vivithemage.com/zen/blog/picturesaroundtheworld/13.jpg.php>.

Глава 11

1. Lin S. C., Lee W. I. and Schurr J. M. (1978): Brownian motion of highly charged poly(L-lysine). Effects of salt and polyion concentration. *Biopolymers* 17(4): 1041–1064.
2. Weiss M., Eisner M., Kartberg F., Nilsson T. (2004): Anomalous Subdiffusion is a Measure for Cytoplasmic Crowding in Living Cells. *Biophys J.*, 87(5): 3518–3524.
3. Halliday I. (1963): Diffusion effects observed in the wake spectrum of a Geminid meteor. *Smithsonian Contrib to Astrophys*, 7, 161–169.
4. Chai B., Zheng J. M., Zhao Q. and Pollack G. H. (2008): Spectroscopic studies of solutes in aqueous solution. *J Phys Chem A* 112: 2242–2247.
5. Sedláč M. (2006): Large-Scale Supramolecular Structure in Solutions of Low Molar Mass Compounds and Mixtures of Liquids: I. Light Scattering Characterization, *J. Phys. Chem. B*, 110 (9), 4329–4338.

Глава 12

1. Tada T., Kanekoa D., Gong J. P., Kanekoa T. and Osada Y. (2004): Surface friction of poly(dimethyl siloxane) gel and its transition phenomenon. *Tribology Letters*, Vol. 17, No. 3.
2. Stern K. R., Bidlack J., Jansky S. H. (1991): *Introductory Plant Biology*, McGraw Hill.
3. So E., Stahlberg R. and Pollack G. H. (2012): Exclusion zone as an intermediate between ice and water. In: *Water and Society*, ed. DW Pepper and CA Brebbia, WIT Press, pp. 3 – 11.
4. Chai B., Mahtani A. G. and Pollack G. H. (2012): Unexpected Presence of Solute-Free Zones at Metal-Water Interfaces. *Contemporary Materials*, III (1), 1–12.
5. Chai B., Mahtani A., Pollack G. H. (2013): Influence of Electrical Connection between Metal Electrodes on Long Range Solute-Free Zones. Submitted for publication.

6. Musumeci F. and Pollack G. H. (2012): Influence of water on the work function of certain metals. *Chem Phys Lett* 536: 65–67.
 7. O'Rourke C., Klyuzhin I. S., Park J. S. and Pollack G. H. (2011): Unexpected water flow through Nafion-tube punctures. *Phys. Rev. E.* 83(5) DOI:10.1103/PhysRevE.83.056305.
- w1. http://en.wikipedia.org/wiki/Dead_water; <http://www.youtube.com/watch?v=PCOL8kUtufg>.

Глава 13

1. Klyuzhin I. S., Ienna F., Roeder B., Wexler A. and Pollack G. H. (2010): Persisting Water Droplets on Water Surfaces. *J. Phys Chem B* 114: 14020–14027.
2. Melehy M. (2010): Introduction to Interfacial Transport. Author House, Bloomington IN.
3. Chai B., Zheng J. M., Zhao Q. and Pollack G. H. (2008): Spectroscopic studies of solutes in aqueous solution. *J. Phys. Chem A* 112: 2242–2247.
4. Bunkin N. F., Suyazov N. V., Shkirin A. V., Ignatiev P. S., Indukaev K. V. (2009): Nanoscale structure of dissolved air bubbles in water as studied by measuring the elements of the scattering matrix. *J Chem Phys* 130, 134308.
5. Zheng J. M. and Pollack G. H. (2003): Long range forces extending from polymer surfaces. *Phys Rev E.*: 68:031408.
6. Ninham B. W. and Lo Nostro P. (2010): Molecular Forces and Self Assembly in Colloid, Nano Sciences, and Biology. Cambridge University Press.
7. Zuev A. L. and Kostarev K. G. (2008): Certain peculiarities of solutocapillary convection. *Physics – Uspekhi* 51 (10), 1027–1045.
8. Hu W., Ishii K. S. and Ohta A. T. (2011): Micro-assembly using opti-

- cally controlled bubble microrobots. *Appl. Phys. Lett.* 99 (094103), 1–3.
9. Spiel D. E. (1998): On the births of film drops from bubbles bursting on seawater surfaces. *J. Geophys Res* 103 (C11) 24, 907–24918.
- w1. <http://www.youtube.com/watch?v=lkq-SEApCSvM&feature=related>.

Глава 14

1. Chang H. (2011) <http://www.hps.cam.ac.uk/people/chang/boiling/>.

Глава 15

1. Ienna F., Yoo H. and Pollack G. H. (2012): Spatially Resolved Evaporative Patterns from Water. *Soft Matter* 8 (47), 11850 – 11856.
 2. Ivanitskii G. R., Deev A. A., Khizhnyak E. P. (2005): Water surface structures observed using infrared imaging Physics – Uspekhi 48 (11), 1151–1159.
 3. Chai B., Zheng J. M., Zhao Q. and Pollack G. H. (2008): Spectroscopic studies of solutes in aqueous solution. *J. Phys. Chem., A* 112, 2242–2247.
 4. Tychinsky V. (2011): High Electric Susceptibility is the Signature of Structured Water in Water-Containing Objects. *WATER* 3: 95–99.
 5. Bunkin N. (2013): Refractive index of water and aqueous solutions in optical frequency range close to Nafion interface (submitted).
- w1. <http://www.youtube.com/watch?v=bT-fctr32pE>.
- w2. <http://touristattractionsgallery.com/niagara-is-the-largest-waterfall-in-the-world>.
- w3. http://www.engineeringtoolbox.com/air-composition-d_212.html.

Глава 16

1. Ovchinnikova K. and Pollack G. H. (2009): Cylindrical phase separation in colloidal suspensions. *Phys. Rev. E* 79 (3): 036117.

2. Mopper K. and Lindroth P. (1982): Diel and depth variations in dissolved free amino acids and ammonium in the Baltic Sea determined by ship-board HPLC analysis. *Limnol. Oceanogr.* 27(2): 336–347.
3. Pollack G. H. (2001): *Cells, Gels, and the Engines of Life*. Ebner and Sons, Seattle.
4. Cameron I. (2010): Dye Exclusion and Other Physical Properties of Hen Egg White. *WATER* (2): 83–96.
5. Gaddis V. (1965): *Invisible Horizons: True Mysteries of the Sea*. Chilton Books, Phila.
6. Heilbron J. L. (1999): *Electricity in the 17th & 18th Centuries: A Study in Early Modern Physics* (Dover Books on Physics), p. 239.
7. Wegner L. H. and Zimmermann U. (2004): Bicarbonate- Induced Alkalinization of the Xylem Sap in Intact Maize Seedlings as Measured in Situ with a Novel Xylem pH Probe. *Plant Physiol.* 136(3): 3469–3477.
8. Klyuzhin I. S., Ienna F., Roeder B., Wexler A. and Pollack G. H. (2010): Persisting water droplets on water surfaces. *J. Phys. Chem. B* 114: 14020–14027.
- w1. <http://www.youtube.com/watch?v=45yabrnyXk>.
- w2. <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADB228588>.
- w3. http://www.bermuda-triangle.org/html/don_henry.html.
- w4. <http://www.youtube.com/watch?v=yf-1n00LW1Xl&feature=related>.
- w5. <http://www.youtube.com/watch?v=D-klIMEVnNDg>.
- (Institute of Physics): 172–175. doi:10.1088/0031-9120/4/3/312.
2. Mpemba E. B. and Osborne D. G. (1979): The Mpemba effect. *Physics Education* (Institute of Physics): 410–412. doi:10.1088/0031-9120/14/7/312. <http://www.iop.org/EJ/article/0031-9120/14/7/312/pev14i7p410.pdf>.
3. So E., Stahlberg R. and Pollack G. H. (2012): Exclusion zone as an intermediate between ice and water. In: *Water and Society*, ed. DW Pepper and CA Brebbia, WIT Press, pp. 3–11.
4. Hori T. (1956): *Low Temperature Science* A15:34 (English translation) No. 62, US Army Snow, Ice and Permafrost Res. Establishment, Corps of Engineers, Wilmette, Ill.
5. Ehre D., Lavert E., Lahav M., Lubomirsky I. (2010): Water Freezes Differently on Positively And Negatively Charged Surfaces of Pyroelectric Materials *Science* 327: 672–675.
6. Workman E. J. and Reynolds S. E. (1950): Electrical Phenomena Occurring during the Freezing of Dilute Aqueous Solutions and Their Possible Relationship to Thunderstorm Electricity. *Phys. Rev.* 78(1): 254–260.
7. Woisetschlager J., Gatterer K. and Fuchs E. C. (2010): Experiments in a floating bridge *Exp Fluids* 48: 121–131.
8. Piatkowski L., Wexler A. D., Fuchs E. C., Schoenmaker H. and Bakker H. J. (2012): Ultrafast vibrational energy relaxation of the water bridge *Phys. Chem. Chem. Phys.* 14(18): 6160–6164.
9. Choi E. M., Yoon Y. H., Lee S., Kang H. (2005): Freezing Transition of Interfacial Water at Room Temperature under Electric Fields. *Phys. Rev. Lett.* 95, 085701.
- w1. <http://www.youtube.com/watch?v=G-p8vc0DWf3U>.

Глава 17

1. Mpemba E. B., Osborne D. G. (1969): «Cool?» *Physics Education*

- w2. <http://www.youtube.com/watch?v=y-wh5TQ5B4Es>.
- w3. <http://www.youtube.com/watch?v=b-DwZqBqrLQ&p=2556DBFD-5031F40F&index=39>.
- w4. <http://www.youtube.com/watch?v=x-uhUTaFmaX8&NR=1&feature=end-screen>.
- w5. http://www.youtube.com/watch?v=f-SPzMva9_CE.

Глава 18

1. Pollack G. H. (2001): *Cells, Gels and the Engines of Life: A New Unifying Approach to Cell Function*. Ebner and Sons, Seattle.
2. Klyuzhin I., Symonds A., Magula J. and Pollack G. H. (2008): A new method of water purification based on the particle-exclusion phenomenon. *Environ Sci and Technol* 42(16): 6160–6166.

Авторские права на иллюстрации

Глава 1

Рис. 1.4: Elmar Fuchs

Глава 2

Рис. 2.3: С разрешения правообладателя

Глава 3

Рис. 3.19: С разрешения правообладателя, Dr. Maewan Ho

Глава 5

Рис. 5.1: Basil Novakeemian

Рис. 5.5: Li Zheng and Ronnie Das

Рис. 5.6: Hyok Yoo

Врезка (нервы, боль, анестезия): Nenad Kundacina

Рис. 5.8: С разрешения правообладателя

Глава 6

Рис. 6.1: Binghua Chai

Рис. 6.3: Bora Kim

Рис. 6.5: С разрешения правообладателя

Рис. 6.12: С разрешения правообладателя, Национальное управление по исследованию океанов и атмосферы, NOAA

Глава 7

Рис. 7.6: С разрешения правообладателя

Глава 8

Рис. 8.4: С разрешения правообладателя

Рис. 8.11: С разрешения правообладателя

Глава 9

Рис. 9.1: С разрешения правообладателя

Рис. 9.4: С разрешения правообладателя

Рис. 9.8: Derek Nhan

Рис. 9.9: Ronnie Das

Рис. 9.10: Rainer Stahlberg

Рис. 9.12: Kate Ovchinnikova

Глава 10

Рис. 10.6: Eugene Khijniak

Рис. 10.9: Anna Song

Рис. 10.10: Anna Song

Глава 11

Рис. 11.2: Ronnie Das

Глава 13

Рис. 13.3: С разрешения правообладателя

Рис. 13.6: Sudeshna Sawoo

Рис. 13.7: Rolf Ypma, Orion Polinsky

Рис. 13.8: Georg Schröcker

Рис. 13.9: Eric Gupta

Рис. 13.10: Hyok Yoo

Глава 14

Рис. 14.5: George Danilov

Рис. 14.6: Hyok Yoo

Рис. 14.7: Hyok Yoo

Рис. 14.10: George Danilov

Рис. 14.11: Rainer Stahlberg

Глава 15

Рис. 15.1: Ethan Pollack

Рис. 15.2: С разрешения правообладателя

Рис. 15.3: С разрешения правообладателя

Рис. 15.4: С разрешения правообладателя

Рис. 15.5: Hyok Yoo, Ethan Pollack

Рис. 15.6: Federico Ienna

Рис. 15.7: ZiYao Wang

Рис. 15.8: Yan Dong

Рис. 15.9a: Federico Ienna

Рис. 15.9b: ZiYao Wang

Рис. 15.10: Federico Ienna

Рис. 15.11: Federico Ienna

Врезка (отскакивание капель, капельница Кельвина): Zheng Li

Глава 16

Рис. 16.3: Laura Marshall, Hyok Yoo

Рис. 16.14: Patrick Belenky

Рис. 16.16: Ivan Klyuzhin

Рис. 16.17: С разрешения правообладателя

Глава 17

Рис. 17.3: Hyok Yoo

Рис. 17.5: С разрешения правообладателя

Рис. 17.7: Rainer Stahlberg

Рис. 17.8: Rainer Stahlberg

Рис. 17.9: Rainer Stahlberg

Рис. 17.10: Hyok Yoo

Рис. 17.16: Elmar Fuchs

Словарь

Аннулюс (annulus): кольцеобразная структура.

Анод (anode): положительный электрод, через который протекает электрический ток в цепи. Исторически принято считать, что направление электрического тока противоположно направлению движения электронов.

Везикула (vesicle): небольшая полость, особенно содержащая жидкость.

Горб Бернулли (Bernoulli hump): выпуклости на поверхности океана, созданные движущимся под водой объектом.

Дальтон (Dalton): стандартная единица измерения массы в атомном или молекулярном масштабе.

Двулучепреломление (birefringence): оптическое свойство материала, в котором показатель преломления зависит от направления. Кристаллические минералы, такие как кальцит и кварц, обладают двойным лучепреломлением.

Диполь (dipole): объект с разделением положительных и отрицательных зарядов. Простейший пример – это пара электрических зарядов равной величины, но противоположного знака, разделенных некоторым (обычно небольшим) расстоянием.

Диэлектрик (dielectric): электрический изолятор, молекулы которого можно поляризовать. Когда диэлектрик помещают в электрическое поле, электрические заряды не протекают через материал, как в проводнике, а вместо этого слегка смещаются, придавая одной стороне положительный, а другой стороне отрицательный заряд.

Дьюар (dewar): колба, обеспечивающая хорошую теплоизоляцию. Налитая в дьюар холодная или горячая вода будет

сохранять свою температуру намного дольше, чем в обычном контейнере.

Газовый клатрат (gas clathrate): кристаллическое твердое тело, напоминающее лед, в котором молекулы газа заключены в клетки из молекул воды.

Гексамер (hexamer): структура, состоящая из шести одинаковых звеньев.

Гидратация (hydration): получение и удержание воды веществом.

Гидроксил-ион (OH⁻): отрицательно заряженный ион, содержащий атом кислорода, ковалентно связанный с атомом водорода.

Гомогенный (homogeneous): однородный по составу.

Градиент (gradient): изменение любой величины в пространстве, которое может быть условно представлено наклоном. Градиент представляет крутизну и направление этого наклона.

Инициировать (nucleate): служить местом образования зародыша или начальной точки чего-либо.

Ион гидроксония (hydronium ion, H₃O⁺): ион, возникающий в результате присоединения протона к молекуле воды.

Ионосфера (ionosphere): верхняя часть атмосферы, ионизированная солнечным излучением.

Катализ (catalysis): увеличение скорости химической реакции, возникающее из-за присутствия вещества, называемого катализатором. Катализатор в реакции не расходуется.

Катод (cathode): отрицательный электрод, через который протекает электрический ток в цепи. Исторически принято считать, что направление электриче-

ского тока противоположно направлению движения электронов.

Клетка Фарадея (Faraday cage): кожух, сделанный из проводящего материала или сетки, используемый для блокировки внешних электрических полей.

Коллигативные свойства (colligative properties): относятся к физическим свойствам (например, температурам замерзания и кипения) растворов. Коллигативные свойства зависят от отношения количества частиц растворенного вещества к количеству молекул растворителя и значительно меньше зависят от природы растворенного вещества.

Коллоид (colloid): вещество, равномерно распределенное по всему объему другого вещества; диспергированные вещества часто представляют собой частицы размером от 1 нм до 1000 нм.

Коэффициент трения (coefficient of friction): между двумя телами – соотношение силы трения скольжения и силы, прижимающей эти тела друг к другу.

Кювета (cuvette): маленькая камера квадратного или круглого сечения, запаянная с одного конца, используемая для спектроскопических измерений.

Люминол (luminol, $C_8H_7N_3O_2$): химическое вещество, которое испускает сильнее свечение при смешивании с подходящим окислителем.

Межфазный (interfacial): имеющий отношение к границе раздела между двумя частями вещества или пространства.

Оксид (oxide): химическое соединение, содержащее хотя бы один атом кислорода и какой-либо другой элемент.

Осаждение (precipitation): образование в растворе твердого материала, обычно оседающего на дно.

Осмоз (osmosis): движение молекул растворителя, обычно через мембрану, в область с более высокой концентрацией растворенного вещества.

Пирозлектрический эффект (pyroelectric): в химии – склонность некоторых материалов к генерации электрического заряда при нагревании или охлаждении.

Поверхностная энергия (surface energy): избыточная энергия на поверхности материала по сравнению с остальным объемом.

Показатель преломления (refractive index): число, которое описывает, как свет или любое другое электромагнитное излучение распространяется через среду.

Полиакриловая кислота (polyacrylic acid): общее название синтетических высокомолекулярных полимеров акриловой кислоты.

Полимер (polymer): большая молекула, состоящая из повторяющихся элементов.

Полупроводник (semiconductor): материал, электрическая проводимость которого находится между проводником и изолятором.

Полюс (pole): в источниках тока – две клеммы, положительная и отрицательная.

Постоянный ток (direct current): электрический ток, протекающий в одном направлении – в отличие от переменного тока, который периодически меняет направление.

Преобразователь (transducer): устройство, преобразующее одну форму энергии в другую.

Работа (work): изначально «подъем единичного веса на единичную высоту», но в более общем смысле произведение действующей на тело силы на путь, пройденный телом по направлению этой силы.

Рамановская спектроскопия (Raman spectroscopy): метод, используемый для изучения колебательных, враща-

тельных и других низкочастотных колебательных мод в системе.

Растворитель (solvent): вещество, способное растворять другие твёрдые, жидкие или газообразные вещества, не изменяя их химически.

Решетка (lattice): регулярная периодическая конфигурация частиц или объектов, распределенных по площади либо пространству, особенно расположение ионов или молекул в кристаллическом твердом теле.

Светодиод (Light-emitting diode, LED): полупроводниковое светоизлучающее устройство.

Среднее квадратичное (mean square): среднее квадратов набора чисел.

Стехиометрический комплекс (stoichiometric complex): обозначает фиксированное соотношение компонентов вещества.

Стехиометрия (stoichiometry): относительное количество реагентов и продуктов химической реакции, обычно выражаемое целыми числами.

Теплоемкость (heat capacity): количество тепла, необходимое для повышения температуры вещества на один градус Цельсия.

Термодинамика (thermodynamics): раздел естествознания, изучающий тепло и его связь с другими формами энергии и работы.

Тиксотропность (thixotropy): свойство некоторых гелей, которые могут течь при встряхивании или сдвиге.

Трибоэлектрический эффект (triboelectric effect): тип контактной электризации, при котором определенные материалы становятся электрически заряженными после трения о другой материал.

Электрод (electrode): электрический проводник, используемый для контак-

та с устройством или материалом. Ток входит в цепь или выходит из нее через электроды.

Электромагнитный спектр (electromagnetic spectrum): диапазон всех возможных частот электромагнитного излучения.

Электроотрицательный (electronegative): обладание отрицательным зарядом; получение отрицательного потенциала при контакте с положительно заряженным веществом; также склонность атома или функциональной группы к притягиванию электронов.

Электростатика (electrostatic): явления, возникающие из-за сил, благодаря которым электрические заряды действуют друг на друга.

Энтальпия (enthalpy): мера полной энергии термодинамической системы; количество тепла, которое потребляется или выделяется в системе при постоянном давлении.

Энтропия (entropy): выражение беспорядка или случайности; мера тепловой энергии системы, которая недоступна для выполнения полезной работы.

Филамент (filament): в биологии длинная цепь белков.

Флуоресценция (fluorescence): излучение света веществом, которое поглотило свет или другое электромагнитное излучение.

Фотон (photon): наименьшая возможная порция электромагнитного излучения, часто используемая применительно к свету.

Фотоэлектрический эффект (photoelectric effect): эмиссия электронов из вещества в результате поглощения электромагнитной энергии.

Шероховатость (asperity): мелкие неровности поверхности.

Предметный указатель

В

- Везикула 29
- Вискозиметрия
 - с падающим шариком 72
- Водный мост 38

Г

- Гидрофильность 64
- Гидрофобность 64

Д

- Двойное лучепреломление 74
- Дебаевский радиус экранирования 59

И

- Ион гидроксония 27
- Исключающая зона 58

К

- Капельница Кельвина 39
- Коллоид 44
- Коллоидный раствор. См. Коллоид
- Конвекционный поток 60

Л

- Лучистая энергия 28

М

- Магнитно-резонансная томография 71
- Микросферы 37
- Модель
 - мерцающих кластеров 45
- Молекулярная матрица 64

Н

- Нафион 64

О

- Объемная вода 26

П

- Память воды 50
- Поверхностная батарея 28
- Поливода 48
- Поливодный разгром 48
- Полимерная кисть 60
- Протон 27
- Пузырек 29

С

- Самоорганизующийся монослой 60
- Сотовый слой 28

Т

- Теория
 - двойного слоя 58

У

- Упорядоченная вода 74

Ф

- Химический сдвиг 72

Э

- Электрон 27

Е

- EZ, exclusion zone 58

Книги издательства «ДМК Пресс» можно заказать в торгово-издательском холдинге «Планета Альянс» наложенным платежом, выслав открытку или письмо по почтовому адресу:

115487, г. Москва, 2-й Нагатинский пр-д, д. 6А.

При оформлении заказа следует указать адрес (полностью), по которому должны быть высланы книги; фамилию, имя и отчество получателя.

Желательно также указать свой телефон и электронный адрес.

Эти книги вы можете заказать и в интернет-магазине: www.a-planet.ru.

Оптовые закупки: тел. (499) 782-38-89.

Электронный адрес: books@aliants-kniga.ru.

Джеральд Поллак

Четвертая фаза воды

Главный редактор *Мовчан Д. А.*
Зам. главного редактора *Сенченкова Е. А.*
dmkpress@gmail.com
Перевод *Яценков В. С.*
Редактор *Воейков В. Л.*
Корректор *Синяева Г. И.*
Верстка *Луценко С. В.*
Дизайн обложки *Мовчан А. Г.*

Формат 70×100 1/16.

Гарнитура «PT Serif». Печать цифровая.

Усл. печ. л. 17,88. Тираж 200 экз.

Веб-сайт издательства: www.dmkpress.com