

Содержание

Введение	9
----------------	---

ЧАСТЬ I. Ингредиенты жизни

Глава 1. ДНК: код и спираль	27
Глава 2. Белки: молекулярное оригами	45
Глава 3. Гены и механика ДНК	63
Глава 4. Хореография генов	82
Глава 5. Мембраны: жидкая кожа	100
Глава 6. Предсказуемая случайность	117

ЧАСТЬ II. Жизнь во всей полноте

Глава 7. Сборка эмбрионов	135
Глава 8. Конструирование органов	159
Глава 9. Экосистема внутри вас	172
Глава 10. Восприятие масштаба	198
Глава 11. Жизнь на поверхности	220
Глава 12. Загадки размера и формы	233

ЧАСТЬ III. Конструирование организмов

Глава 13. Как мы читаем ДНК	251
Глава 14. Генетические комбинации	278
Глава 15. Как мы пишем ДНК	304
Глава 16. Конструирование будущего	333
<i>Благодарности</i>	355
<i>Рекомендуемая литература</i>	357
<i>Примечания</i>	359

*Памяти моих родителей
Калиани и Сампата Пармасарати*

Введение

Как устроена жизнь? Этот вопрос может показаться обескураживающим и даже абсурдным. Как один и тот же ответ может быть справедливым по отношению и к стремительному гепарду, и к неподвижному дереву, и к *вашей* уникальности, и к триллионам бактерий, которые живут внутри вас? Опыт даже одного-единственного организма головокружительно разнообразен: представьте, например, как маленькая курочка вылупляется из яйца, как затем она впервые взмахивает крыльями, как стучит ее сердце при виде лисы и как пища и вода внутри нее превращаются в ее собственные яйца. Можно ли уместить все это в какой-то одной интеллектуальной рамке?

Поиск ответа на этот вопрос — поиск какого-то единства в разнообразии жизни — отражается в нашем исконном стремлении к категоризации живых существ на основе сходств в их внешнем виде и поведении. Аристотель делил животных на группы по таким признакам, как яйцо- и живорождение. В древнеиндийских текстах применялся целый ряд критериев, включая и способ появления на свет: “те, что из яйца; те, что из зародыша; те, что из влаги; те, что из ростка”¹. Современная таксономия выросла из трудов Карла Линнея, ученого XVIII века, который систематизировал названия живых существ и разработал применяемую по сей день иерархическую систему классификации на основе общих характеристик ор-

ганизмов. И все же одной классификации недостаточно. Мы хотим понимать, *почему* появляются общие черты, объединяющие организмы, а не только знать, *каковы* они.

В этой книге мы будем рассматривать то самое “*почему*” сквозь призму физики и прольем свет на удивительную изящность и упорядоченность биологии. Разумеется, это не единственный ракурс, позволяющий заглянуть в глубины жизни. С позиции биохимии, например, можно увидеть, как из атомов формируются молекулярные компоненты органического вещества, как энергия запасается в химических связях и извлекается из них и как из постоянного преобразования вещества и энергии в ходе химических реакций выстраивается метаболизм живых организмов. Но с помощью одной лишь химии сложно переключаться с масштаба молекул на масштаб окружающих нас животных, растений и даже отдельных клеток, а также постигать концепцию формы.

Столь же всеобъемлющую картину рисует и теория эволюции. С середины XIX века, когда на Чарльза Дарвина и Альфреда Рассела Уоллеса снизошло озарение, мы видим в тех или иных чертах живых существ проявления более глубоких исторических процессов. Сходства — что в видимых анатомических характеристиках, что в скрытой от глаз структуре ДНК — могут говорить о происхождении от общих предков, и это позволяет нам строить дерево взаимосвязей, объединяющее все живое на планете. Различия возникают по воле случая и закрепляются под давлением неодинаковых факторов среды — опять же в современных формах жизни отражается история. Теория эволюции дает нам прекрасную систему координат для изучения жизни, однако не займет в этой книге центральное место. Отчасти потому, что ей посвящено немало популярной литературы. Но важнее другое: сама по себе теория эволюции больше отвечает на вопрос *как*, чем *почему*.

Поясню, что я имею в виду под “*почему*”, на примере плавающего пузыря — чаще всего двух заполненных газом камер, которыми обладают многие виды рыб. Сравнение со-

временных и вымерших организмов позволяет нам связать эволюционную историю этого органа с появлением легких у дышащих воздухом животных, что отмечал еще сам Дарвин. Но чтобы понять, как работает плавательный пузырь, нам нужно обратиться к физике: низкая плотность заполняющего его газа компенсирует высокую плотность костей у костных рыб, благодаря чему средняя плотность их тела сравнивается с плотностью окружающей воды, и рыбам без труда удается плавать на любой желаемой глубине. Плавательный пузырь — лишь одно из решений проблемы разницы плотностей. В других случаях в организме рыбы может содержаться большое количество низкоплотного жира или ее скелет может состоять из хрящей, а не из костей — обе эти стратегии используют акулы, у которых нет плавательного пузыря. Последний общий предок хрящевых и костных рыб жил более 400 миллионов лет назад. С тех пор эволюция этих групп шла разными путями, наделив их разными способами преодоления одних и тех же физических трудностей маневрирования в воде. Можно утверждать, что, поняв, *почему* возникли анатомические характеристики, имеющие отношение к контролю над плотностью, мы обнаружим неявное единство всех рыб за пределами плоскости их эволюционного расхождения. (Подобным углом зрения мы воспользуемся в этой книге еще не раз.) Не стоит, однако, забывать, что формы, которые мы наблюдаем сейчас, ковались с помощью таких инструментов, как изменчивость и естественный отбор: они обеспечивали растущие из поколения в поколение шансы выжить особям, лучше приспособленным к передвижению по своему водному миру.

Помимо биохимии и теории эволюции есть и другие курсы для изучения многообразия жизни. Впрочем, вместо того чтобы перечислять все подходы, к которым мы не станем прибегать, давайте обратимся к тому, что нас интересует.

Я уже намекал, что в этой книге буду рассматривать природу с ракурса, который называю *биофизическим*. Это понятие объединяет в себе биологию и физику и подразумевает, что

вещества, формы и действия, из которых складывается жизнь, управляются и сдерживаются универсальными законами физики и что, проливая свет на связи между физическими законами и биологическими проявлениями, мы обнажаем каркас поразительного многообразия жизни. Утилитарность и популярность физики объясняются именно ее универсальностью. Один и тот же закон гравитации применим как к яблоку, падающему с дерева, так и к планетам, которые вращаются вокруг Солнца, и сейчас ведется работа по расширению сферы его действия даже на странное поведение квантового мира. Биофизика привносит в живой мир стремление к единству, лежащее в основе физики.

Утверждение, что живые организмы подчиняются законам физики, может показаться банальностью. В конце концов, организмы состоят из тех же элементарных частиц, что и все остальное, и, следовательно, подчиняются тем же правилам. Но можно было бы подумать, что после того, как под действием физических сил образуются атомы и молекулы, явная роль физики заканчивается, дальнейшие же молекулярные перестроения определяются сложной химией, а более заметные особенности — характерной предрасположенностью клеток и организмов. Это, однако, не так. Подобно тому как физические силы руководят замысловатым ветвлением морозных узоров на окне и определяют ритмику изгибов огромных песчаных дюн, не вынуждая нас обращаться к субатомным частицам для объяснения механики этих процессов, физические механизмы придают жизни форму на любых уровнях. Одним из величайших триумфов физики, особенно за последние полвека, стало выяснение того, как общие правила задействованы во всевозможных природных явлениях, этакая расчистка дебрей сложности ради обнажения глубинных принципов. Магниты, например, теряют магнетизм при нагревании до определенной “критической” температуры*,

* Такая температурная отметка называется *точкой Кюри*. — *Здесь и далее прим. ред., если не указано иное.*

и хотя их можно изготавливать из множества разных элементов и сплавов с уникальным атомным строением, паттерн* ослабления их магнитного поля при приближении к критической температурной отметке будет неизменным. Оказывается, трехмерного расположения взаимодействующих атомов достаточно для определения последствий их взаимодействия, каким бы ни было атомное строение вещества. Вот другой пример: представьте, что вы многократно встряхиваете банку с разными видами орехов. Как правило, более крупные орехи оказываются наверху, почему этот феномен и назвали *эффектом бразильского ореха*. Разумеется, он наблюдается при встряхивании не только орехов, но и зерен, гальки и любых других смесей неоднородных объектов. Чтобы объяснить его, нужно прибегнуть к общему понятию “потoki в зернистых средах” и показать, как сталкивающиеся частицы в любой смеси создают и заполняют пустоты, благодаря которым и могут перемещаться.

Биофизика ищет способы применять универсальные физические законы к миру живых организмов. Работа в этом направлении не завершена, но уже оказалась куда более успешной, чем мы могли мечтать всего несколько десятилетий назад. С помощью физики мы можем понять, как ДНК выходит из вирусов, каковы неоспоримые пределы скорости мысли и почему именно так устроен наш позвоночник. Мы применяем новые знания, чтобы выращивать органы на полимерных подложках и читать геномы с помощью световых квантов. Мы обнажаем скрытую доселе простоту и элегантность живого мира. Простота возникает потому, что многое вполне возможно объяснить горсткой принципов, а не бездной деталей, элегантность же рождается из единства живой и неживой природы. Это необычная точка зрения, и мне остается наде-

* *Паттерн* (англ. “шаблон”, “узор”, “схема”) — определенный способ организации элементов или процессов (атомов, клеток, экспрессии генов, распределения веществ и т. д.); часто понимается как повторяющаяся устойчивая картина, закономерность.

яться, что благодаря последующим страницам книги она покажется вам убедительной.

Не стоит, однако, забывать, что в стремлении найти единство в сложности всегда есть риск впасть в излишнюю самоуверенность. Возникает соблазн закрывать глаза на уроки, которые дает нам разнообразие, или загонять разнородные данные в необоснованно упрощенные рамки. Рассматривая вопросы с позиции физики, мы особенно часто совершаем такие ошибки — вероятно, в силу изящества физических теорий и их прошлых успехов. Хотя и сам я физик, но готов признать, что не так уж далеко от реальности карикатурное изображение физиков, которые, подобно слонам, беспечно топчут по смежным областям науки, не оценивая по достоинству сокровища у себя под ногами. В своей книге я буду славить биофизику, но опишу и несколько ее неудач: в частности, в главе 12 речь пойдет о спорных вопросах метаболизма, которые, похоже, оказались биофизике не по зубам.

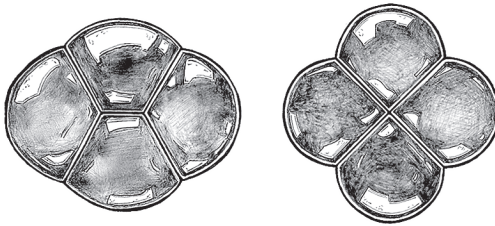


Каким же физическим законам подчиняются живые организмы? Мы могли бы обратиться здесь к законам, которые связаны с фундаментальными взаимодействиями, термодинамикой, теорией вероятности и так далее и поддаются точной математической формулировке. Это было бы абсолютно справедливо, но сухо и к тому же напускало бы тумана на глобальные уроки, извлеченные биофизиками из природы. Лучше я направлю наше внимание на четыре принципа, или мотива, которые снова и снова появляются в биофизических изысканиях.

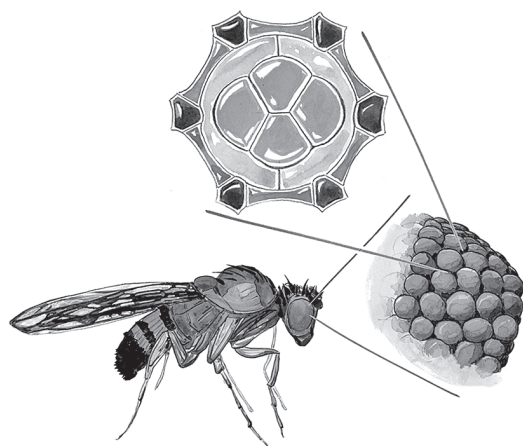
Первый из них — *самосборка*. Этот принцип подразумевает, что инструкции по созданию объектов из биологических компонентов (будь то молекулы, клетки или ткани) закодированы в физических характеристиках самих этих компонентов. Может показаться очевидным, что организм содержит

инструкции по собственной сборке. Ведь никто же не вырезает дерево в форме дерева и не приклеивает пять лучиков к морской звезде — живые существа формируются вполне самостоятельно. Но при этом их внутренние инструкции совершенно не обязаны храниться в виде перечня задач, записанного в одном наборе компонентов и выполняемого другим. Часто инструкциями служат *сами* физические характеристики биологических структур. Определять взаиморасположение фрагментов целого могут такие свойства, как размер и форма, наряду с менее заметными атрибутами вроде электрического заряда, эксплуатирующими законы физики.

Приведу пример. Если вы когда-нибудь пускали мыльные пузыри и наблюдали за образующимися конфигурациями, то, возможно, замечали, что в одной точке никогда не соприкасается больше трех пузырей. Четыре пузыря могут контактировать только так, как показано на рисунке слева, образуя линию соприкосновения в виде искаженной буквы Н, но не Х, как это показано справа.



Под действием физических сил площадь поверхности мыльных пленок стремится к минимуму, что и порождает непреложные законы стыковки мыльных пузырей. Эти правила, экспериментально установленные еще в XIX веке бельгийским физиком Жозефом Плато, не допускают объединение четырех пузырей, поскольку оно не позволяет свести площадь поверхности к минимуму. Пузыри располагаются не в случайном порядке. Однако никакая невидимая рука не расставляет их согласно стереотипной схеме: законы их организации за-



ложены в их же физической природе. Больше века ученые замечали, что расположение смежных клеток в разных тканях напоминает расположение мыльных пузырей, и пытались понять, совпадение ли это или результат работы сходных механизмов². Так, в 2004 году Такаси Хаяси из Токийского университета и Ричард Картью из Северо-Западного университета США обратили внимание на скопление фоторецепторных клеток в фасеточных глазах плодовой мушки³. Обычно их четыре, и они расположены ровно так, как четыре мыльных пузыря (см. рисунок выше). Изучая мушек-мутантов с одной, двумя, тремя, пятью и шестью фоторецепторными клетками в группе, ученые увидели, что клетки располагаются так же, как мыльные пузыри в группах той же численности. Судя по всему, для организации важнейших клеток сетчатки мушка прибегает к общим физическим механизмам минимизации площади поверхности. Вместо того чтобы тщательно выверять положение каждой клетки, мушка создает их и позволяет самим сортировать варианты соприкосновения и, минимизировав площадь поверхности, выстроиться в правильном порядке. Клетки, как и мыльные пузыри, компонуется сами. Да и в бесчисленном множестве других контекстов мы обнаруживаем, что струк-