

Nie przepadam za komarami, które często nie dają mi spokojnie wędrować po puszczy. A w szkole fizyki bałem się jak ognia. Po lekturze Kudłatej nauki stał się cud – polubiłem jedno i drugie. To świetna pozycja opowiadająca o tym, jak prawa fizyki działają w świecie zwierząt.

Adam Wajrak



MATIN DURRANI

LIZ KALAUGHER

KUDŁATA NAUKA

MĄDROŚĆ W ŚWIECIE ZWIERZĄT

znak

MATIN DURRANI

LIZ KALAUGHER



KUDŁATA NAUKA

MĄDROŚĆ W ŚWIECIE ZWIERZĄT

Wydawnictwo Znak
Kraków 2017

*Dla moich rodziców, Saeeda i Inge
oraz dla Katii, Chiary i Alex*

Matin

*Dla Sue, Patricka, Mags, Catherine,
Justina, Daniela, Toma i Josha*

Liz

WPROWADZENIE

Kudłata fizyka

Trudno być zwierzęciem. Nie dla ciebie centralne ogrzewanie czy klimatyzacja, pomagające utrzymać właściwą temperaturę ciała, ani supermarket, gdzie mogłobyś się pożywić, kiedy poczujesz ochotę na małe co nieco, czy wreszcie bezpieczne ściany własnego domu. Jeśli wskoczysz do rzeki złapać rybkę, na brzegu nie czeka na ciebie suchy ręcznik, którym mogłobyś się wytrzeć, gdy wychodzisz przemoczone i zaczynasz trząść się z zimna. Aby przeżyć, zwierzęta muszą liczyć na swoje zmysły, spryt, partnerów, krewnych i członków stada (z wyjątkiem samotników takich jak lamparty), a także na swoje ciało, które w trakcie ewolucji ukształtowało się w sposób dostosowany do warunków życia danego gatunku. I właśnie w tym punkcie pojawia się fizyka. Biologowie i fizycy dopiero niedawno uświadomili sobie, że zwierzęta potrafią w niezwykle sposób wykorzystywać prawa fizyki w życiu codziennym, kiedy szukają jedzenia, picia oraz partnerów w okresie godowym i ogólnie starają się, aby nie dać się zabić. Nawet domowy pies, kiedy zmoknie, korzysta z praw fizyki, żeby się szybko osuszyć, a przy okazji ochlapać każdego, kto nie ma dość refleksu i nie zdąży się w porę odsunąć.

Oczywiście nie chodzi o to, że zwierzęta poznały wcześniej zasady fizyki

i odpowiednio do nich dostosowały swoje ciało. To ewolucja, w powolnym procesie kolejnych prób i błędów, stworzyła organizmy, które skutecznie funkcjonują w realnym świecie, wykorzystując prawidłowości istniejące w przyrodzie, prawa i zasady nazwane przez ludzi fizyką.

Zwierzęta sięgnęły po nie pierwsze. Węgorz elektryczny zabijał kraby za pomocą wyładowań elektrycznych o wysokim napięciu (por. rozdział 5), wykorzystując prawidłowości związane z elektrycznością o wiele wcześniej, nim naukowcy poznali to zjawisko. Węgorz nie wie, na czym polega prąd elektryczny, ale i my nie musimy nic wiedzieć o tranzystorach czy obwodach scalonych, żeby posługiwać się smartfonem. Dopóki nasz telefon jest inteligentny (*smart*), sami nie musimy się o nic martwić.

Robaki bez tuneli

(czasoprzestrzennych)

Zanim zaczniemy, słowo pocieszenia. Nasza książka opowiada o tym, jak wybrane gatunki zwierząt posługują się zasadami fizyki, aby przeżyć w warunkach naturalnych. Jeśli fizyka budzi w was lęk, nie martwcie się. Postaraliśmy się, aby wszystko było proste. Nie trzeba mieć umysłu Einsteina, żeby zrozumieć, o co tu chodzi. Nie obawiajcie się, że będziemy mówić o jakichś dziwnych rzeczach, takich jak ciemna energia, bozony Higgsa czy tunele czasoprzestrzenne (*wormholes*) – choć w pewnym momencie rzeczywiście wspominałyśmy o robakach, a w każdym razie o węzłach. Z drugiej strony, jeśli interesujecie się fizyką, będziecie zdumieni tym, jak często i jak sprytnie wasza ulubiona dziedzina wiedzy daje o sobie znać w życiu zwierząt. Od gęsto porośniętych sierścią kotów i psów po

bezwłose homary, komary i ogromne kałamarnice – fizyka jest wszędzie.

Miłośnikom fizyki pragniemy przypomnieć, że niemal wszystko, co się dzieje w biologii, kręci się wokół pożywienia i seksu. Fizyka, mimo swojej obsesji na punkcie Wielkiego Wybuchu, podąża jednak inną drogą. Zwierzęta, aby gatunek, do którego należą, mógł przetrwać, muszą przekazywać dalej swoje geny i dlatego wydają na świat potomstwo. Niemal we wszystkich przypadkach potrzebują pożywienia, jeśli chcą dożyć do chwili rozplodu, a potem jeszcze mieć siłę do opiekowania się młodymi do czasu, gdy i one osiągną dorosłość. Godnym uwagi wyjątkiem jest samiec osy figowej. Ten niewielki owad w stadium larwalnym żyje wewnątrz owocu figi, ale z chwilą gdy przekształci się w postać dorosłą, nie może już dłużej się odżywiać, ponieważ jego aparat gębowy zanika. Jedynym celem jego dalszej egzystencji jest akt rozmnażania się, po czym traci resztki energii i umiera.

Jeśli jesteś fanem / fanką biologii, przede wszystkim pamiętaj, że fizyka jest znacznie łatwiejsza niż biologia. Mówimy serio. Kiedy pracuje się w laboratorium, można o wiele skuteczniej kontrolować swój eksperyment. Jeśli chcemy zmienić w nim tylko jeden element (czyli jedną zmienną, jak mówią uczeni), aby sprawdzić, jaką rolę odgrywa, o wiele łatwiej będzie to zrobić w osłoniętym przed działaniem zewnętrznych warunków atmosferycznych pomieszczeniu laboratorium, w którym panuje kontrolowana temperatura i wilgotność powietrza, niż w dżungli. A nawet na kwitnącej łące czy, jak się przekonamy w rozdziale 4, w ogrodzie zoologicznym. Jeśli wyjmemy zwierzę, które pragniemy zbadać, z jego naturalnego otoczenia, nie będziemy wiedzieli, czy ta zmiana wpłynie na jego zachowanie. Ale jeżeli pozostawimy zwierzę w jego środowisku naturalnym, nie będziemy pewni, czy modyfikacja wybranej przez nas zmiennej nie pociągnęła za sobą zmian – dotyczących życia innych zwierząt albo wartości

innego parametru – których istnienia nawet sobie nie uświadamiamy. W rezultacie modyfikacja mogłaby wpłynąć na wyniki naszych badań i nawet nie będziemy o tym wiedzieli. A zatem: biologia jest trudna, fizyka łatwa.

A teraz zastrzeżenie. W *Kudłatej nauce* czasami posługujemy się antropomorfizacją, czyli wypowiadamy się w taki sposób, jakbyśmy w pewnym sensie umieścili się w głowie zwierzęcia i przypisywali mu myśli, jak gdyby było człowiekiem. Biolodzy nie lubią takich chwytów, ale w ten sposób łatwiej opowiadać różne historie, więc nie będziemy się z tego tłumaczyć, a w każdym razie tylko trochę. No i czasami, ale o tym cicho sza, odrobinę upraszczamy opisywane zjawiska fizyczne, żeby nie hamować toku narracji.

Niektórzy ludzie sięgają po literaturę popularnonaukową, szukając w niej odrobiny ładu i logiki w naszym zagmatwanym świecie. Ale życie jest skomplikowane. Czasami, im bardziej przyglądamy się jakiejś rzeczy, tym bardziej okazuje się złożona. Cieszymy się na przykład piękną barwą i delikatnym zapachem róży, a następnie zaczynamy oglądać w powiększeniu aksamitną powierzchnię jej płatków, delikatne żyłki u ich bladej nasady, złożony las mikroskopijnych pręcików z pyłkiem w jej centrum i drobne włoski na spodniej powierzchni liści okalających kwiatostan. Jeśli sięgniemy po silny mikroskop, zobaczymy struktury biologiczne zapewniające róży funkcjonowanie – jej hydraulikę i pojedyncze komórki. I tak, o ile nie jesteśmy poważnie zainteresowani botaniką, w miejsce naszej wcześniejszej radości i zachwytu niepostrzeżenie pojawi się zdumiewający świat dziwnie brzmiących nazw, a sam kwiat gdzieś po drodze straci swój urok. To samo można powiedzieć o wyjaśnieniach proponowanych przez fizykę – otrzymujemy opis kolejnych warstw zjawisk, z których część budzi niemal powszechne zainteresowanie, ale inne lepiej pozostawić zapaleńcom

i geniuszom. W naszej książce staraliśmy się ograniczać do poziomu zjawisk, które wydają się przystępne i zrozumiałe, co oznacza, że czasami – w interesie piękna i prostoty – pomijaliśmy pewne nazbyt specjalistyczne szczegóły, mamy jednak nadzieję, że czytelnicy nam wybaczą. A jeśli nie, przypuszczalnie większą frajdę przyniesie wam samodzielne poszukanie odpowiednich równań i zgłębianie subtelności.

Nasza książka nie przynosi wyczerpującego omówienia zachowań i charakterystyki wszystkich gatunków zwierząt, które w swoim życiu wykorzystują zasady fizyki. W tym celu musielibyśmy napisać opasłe tomy. W kolejnych rozdziałach staramy się raczej omawiać zjawiska związane z jakimś jednym ważnym aspektem wybranej przez nas dziedziny wiedzy – takim jak ciepło, siła, płyny, dźwięk, elektryczność i magnetyzm oraz światło – i pokazywać jej podstawowe zasady na przykładzie zachowań starannie wybranych gatunków zwierząt. Ponieważ skupiamy się na tym, jak zwierzęta wykorzystują fizykę w życiu codziennym, wybraliśmy różne stworzenia – od pawia po ośmiornicę i od słonia po pszczołę – które aktywnie wykorzystują zasady fizyki, kiedy chcą się napić, schwytać pożywienie, regulować temperaturę ciała, bronić się przed zagrożeniami itp. Skupiamy się bardziej na tym, co się stało, niż kto to zrobił, choć wydaje się mało prawdopodobne, żebyście sami wpadli na niektóre odpowiedzi.

Natomiast w ogóle nie zajmujemy się tym, jak ludzie spożytkowują dla własnej korzyści wiedzę na temat świata zwierząt – po prostu dlatego że opis tych zjawisk wystarczyłby na osobną książkę. Nie będziemy więc opowiadali o tym, jak fizycy, zainspirowani strukturą skrzydeł motyla, opracowali czujniki ciepła, ani o tym, jak stworzyli materiał *velcro* (potocznie rzep), przyglądając się, w jaki sposób rzep (łopianu) trzyma się psiego ogona. Ta dziedzina badań, znana jako biomimetyka albo bioinspiracja, jest interesująca, ale wystarczająco dobrze opisana. Choć w pewnym momencie –

krótko – wspominamy o pomysłach na urządzenia wspomagające słuch, które odwołują się do sposobu porozumiewania się słoni. Innym tematem, który pozostawiliśmy na uboczu – ponownie dlatego że inni się już nim zajmowali – są zbiorowe zachowania zwierząt, takie jak lot stada ptaków poruszających się w zgodnym rytmie, ruchy pingwinów w obrębie stada tulących się do siebie osobników albo budowanie przez mrówki tratwy z własnych ciał.

W naszej książce gwiazdami przedstawienia są pojedyncze osobniki.

ROZDZIAŁ 1



CIEPŁO

ROZDZIAŁ NA ROZGRZEWKĘ

**Węże zmieniające płęć – Psy o luźno ruszającej się skórze –
Komary sikające krwią – Mordercze pszczoły – Wiewiórki
o gorących ogonach – Żmije, które „widzą” ciepło – Żuki, które
„słyszą” promieniowanie podczerwone**

Robi się gorąco

W filmie *Poszukiwacze zaginionej Arki* dziarski archeolog Henry Indiana Jones, grany przez Harrisona Forda, przeżywa nagle swój najgorszy koszmar. Chociaż panicznie boi się węży, aby zapobiec przechwyceniu Arki Przymierza przez wrogów, musi wdrzeć się do sekretnej komory egipskiego grobowca, w której wręcz roi się od tych gadów. Podobnie jak w wielu innych filmach, autorzy *Poszukiwaczy...* odwołują się w tej scenie do klasycznego obrazu węża jako stworzenia zarazem złowrogiego i obdarzonego potężną mocą.

Jednak Steven Spielberg miał na głowie nie tylko symbolikę. Przetrzęsnięwszy w poszukiwaniu węży wszystkie londyńskie sklepy zoologiczne, członkowie jego ekipy musieli w końcu pociąć na kawałki kilka gumowych szlauchów, aby uzupełnić brakujące sztuki. Choć, prawdę mówiąc, nawet część żywych „węży” grających w tej scenie to nie były węże, ale beznogie jaszczurki – różnica istotna dla biologów, ale bez znaczenia dla zrozpaczonej ekipy filmowej. Podobnie jak padalce z ogrodowego kompostu, beznogie jaszczurki są – jak wskazuje ich nazwa – jaszczurkami, których odnóża skurczyły się albo zaniknęły.

Znana aktorska maksyma: „Nigdy nie pracuj z dziećmi ani ze zwierzętami”, powstała przypuszczalnie z myślą o wężach. Te gady mogą ukąsić. Wiją się. Budzą lęk. Ale nie tylko twórcy filmowi mają z nimi problemy. Biolodzy badający węże w warunkach naturalnych także nie mają łatwego życia. Węża trudno wytropić, a kiedy się zorientuje, że go znalazłeś, szybko odpełźnie albo, co gorsza, strzyknie w twoją stronę jadem, który może cię zabić, jeśli dostanie się pod skórę albo do oka.

Na szczęście dla bohatera naszej opowieści, Ricka Shine'a z Uniwersytetu w Sydney w Australii, istnieje gatunek węży stanowiący wyjątek od zasady mówiącej, że to typy, z którymi trudno się pracuje. Jeśli złapiesz takiego osobnika w odpowiednim momencie, nie zwraca większej uwagi na to, co z nim zrobisz. Shine mógł na przykład spokojnie wkładać te węże do samochodu i zabierać na przejażdżkę. I jak się wkrótce dowiemy, tak właśnie robił. Jesienią, zimą i wiosną pewna odmiana ogrodowca zwyczajnego, inaczej pończoszника (ang. *red-sided garter snake*, *Thamnophis sirtalis parietalis*), żyje, podobnie jak węże, które stanęły na drodze Indy'ego w *Poszukiwaczach zaginionej Arki*, w ogromnych skupiskach liczących czasami dziesiątki tysięcy egzemplarzy (ta liczba musi budzić zawiść każdego reżysera filmowego). Nie spotkamy ich jednak w sekretnej komorze egipskiego grobowca, ale w szczelinach wapiennych skał, pod zamarzniętą warstwą gleby kanadyjskiej prerii w stanie Manitoba. Ten gatunek węży dzierży bowiem pewien rekord: to najdalej na północ żyjący gad na półkuli zachodniej.

Życie w miejscu, gdzie temperatura spada do – 40 stopni C, a śnieg pokrywa ziemię przez 8 do 9 miesięcy w roku, wydaje się pomysłem szalonym. Gady są zwierzętami zmiennocieplnymi (ektotermicznymi, od greckiego: ciepło pochodzące z zewnątrz) i nie mogą wytworzyć energii niezbędnej do ogrzania swojego ciała, spalając pożywienie. Polegają więc na zewnętrznych źródłach ciepła takich jak słońce. Wylegają się w jego promieniach, dopóki nie ogrzeją się na tyle, aby móc szybko poruszać się i reprodukować. Natomiast na okres mrozów pończosznik o czerwonych bokach w poszukiwaniu ciepła zbija się w swoich podziemnych kryjówkach w ogromne stada i zimuje, co stanowi u węży odpowiednik hibernacji.

Niemniej życie węży ogrodowców w Manitobie ma także swoje dobre strony, i to samo dotyczy badających je uczonych. Przede wszystkim latem,

kiedy już się zacznie, jest ciepło, temperatura sięga + 30 stopni C. W kwietniu albo maju węże wyłazą więc na powierzchnię i wijąc się, pełzają po jałowej ziemi w grupach liczących setki albo tysiące osobników. Ten widok, przypominający stertę wijącego się na wszystkie strony spaghetti, od dawna intrygował uczonych. O co chodzi tym węzom?

W intrydze z udziałem czerwobokich pończoszników, której nie powstydziliby się sam Spielberg, splata się czysta fizyka, mnóstwo seksu i odrobina zmiany płci. Choć w tym ostatnim przypadku, spieszymy dodać, nie chodzi jednak o Shine'a i jego kolegów, ale o same węże.

Wielkie podwiązki

(pończosznika)

Ale gdzie nasze maniery? Powinniśmy odrobinę poznać tego węża, zanim zaczniemy wścibiać nos w jego życie seksualne. Zacznijmy więc od rodziny. Pończoszniki występują w całej Ameryce Północnej, choć tylko gatunki zamieszkujące tereny, gdzie panują ostre mrozy, zimują. Można spotkać te gady w lasach, zagajnikach, na łąkach – wszędzie tam, gdzie w pobliżu jest jakaś woda. Wąż, długości około pół metra, potrafi swoim jadem zabijać niewielkie stworzenia, ale nie jest groźny dla człowieka. Jego ulubione przekąski to żaby i ryby, choć nie pogardzi także dżdżownicami, gryzoniami i małymi ptakami.

Wąż ogrodowiec o czerwonych bokach na pierwszy rzut oka nie budzi skojarzeń ze swoją nazwą. Jest czarny z kremowym paskami biegnącymi wzdłuż ciała. Jego czerwone boki kryją się pod zachodzącą na siebie łuską i można je zobaczyć tylko wtedy, gdy zaniepokojony gad nastroszy swoje

ciało. Podczas lata, trwającego w Manitobie 3 albo 4 miesiące, pończosznik stara się maksymalnie wykorzystać ciepło promieni słonecznych i wyprawia się ze swojego siedliska na ponadpiętnastokilometrowe wędrówki w poszukiwaniu żywności.

Kiedy w powietrzu pojawiają się pierwsze fale chłodu – już w sierpniu! – węże wyruszają w stronę zimowych kryjówek. Początkowo spędzają w nich tylko noce albo pochmurne dni. Kiedy jednak temperatura w ciągu dnia spada poniżej zera, gady nakładają na siebie areszt domowy i na czas trwającego przez następnych 9 miesięcy chłodu zbijają się w duże grupy. Ich zimowe siedziby znajdują się jakieś 6 metrów pod ziemią, poniżej poziomu zamarzania gleby. Panująca tam „domowa” temperatura, około + 10 C, z pewnością nie przywodzi na myśl letniego dnia, ale jest o wiele przyjemniejsza niż panujące na zewnątrz – 40 stopni C. Podczas zimowania węże prawie nie wydają energii, trwając w stanie bliskim zawieszenia wszystkich funkcji życiowych. Nie jedzą nic, oddychają z rzadka i jedynie od czasu do czasu poruszają się, aby napić się wody.

Ni stąd, ni zowąd

(wąż)

Kiedy późną wiosną, czując na twarzy upragnione promienie słońca, staniemy przy którejś z węzowych jam w okolicy wioski Narcisse, możemy podziwiać jeden z najbardziej niezwykłych widoków w naturze. Przed nami jak okiem sięgnąć rozpościera się wijący się na wszystkie strony dywan z pokrytych błotem gadów, które właśnie wyłoniły się ze swojej podziemnej kryjówki i ponownie zbijają się w ogromne stada. Ale kiedy przyjrzeć im się

bliżej, możemy dostrzec coś jeszcze bardziej zdumiewającego. Niemal wszystkie węże to samce. Mają około 45 centymetrów długości i są o jakieś 15 centymetrów krótsze niż samice.

Nie spieszone z powodu swoich mniejszych rozmiarów, wypływają na zewnątrz kilka tygodni przed samicami. I każdy ma nadzieję, że pierwszy zdoła spleść się z jedną z nich w miłosnym uścisku. Kiedy tak wiją się jeden obok drugiego, ocierając się o siebie, śmiało wyciągają języki w poszukiwaniu substancji chemicznych zwanych feromonami, wydzielanych przez skórę przez samice. Wydaje się, że po długich 9 miesiącach zimowania każdy samiec ma w głowie tylko jedno: seks.

Ale tu pojawia się problem. Gdy tylko samice wyłaniają się ze swoich kryjówek, większość z nich stara się czmychnąć co sił w nogach (o ile to możliwe w przypadku węży). Każda samica, która okaże się nie dość żwawa, staje się obiektem zainteresowania kuli złożonej z dziesiątek, a nawet setek podekscytowanych, pełnych miłosnych zapałów samców, z których każdy stara się owinąć wokół jej ciała, tak aby znaleźć się w odpowiedniej pozycji do zapłodnienia. Samice uważają, że te zaloty są dość stresujące, i starają się uciec, jak tylko się da. A skoro samców jest co najmniej 10 razy więcej niż samic, szanse pojedynczego osobnika na reprodukcję rysują się marnie.

Już same ogromne skupiska splecionych ze sobą samców i mniejsze kule złożone z osobników w akcie płciowym wydają się dość dziwaczne, ale dzieje się tu coś jeszcze bardziej osobliwego. Jeśli przyjrzeć się uważnie, od czasu do czasu można zauważyć samce, które zwracają uwagę nie na samice, lecz na innego osobnika tej samej płci. Jesteśmy jak najdalsi od seksizmu, jednak zachowanie niektórych z nich wydaje się wyjątkowo niedżentelmeńskie. Dosłownie. Wąż samiec udaje, że jest samicą, czy raczej, w naukowym żargonie, samico-samcem, wydzielając feromony. Samico-samce łatwo odróżnić od innych osobników: są tej samej długości co

pozostałe samce, ale ponieważ wypęły spod ziemi później, są nadal pokryte błotem. Te transgenderowe węże rzadko zwracają uwagę na inne samice i zamiast tego pełzną powoli jak ślimaki. Wkrótce rzucają się na nie „prawdziwe” samce.

O wiele trudniej niż rozpoznać samico-samca, jest odpowiedzieć na pytanie, o co im właściwie chodzi. Jeśli taki osobnik pragnie sparzyć się z samicą, czemu udaje, że jest tej samej płci co ona? Ta zagadka od dawna intrygowała biologów. Niewykluczone, że przekształcenie się w samico-samca daje samcowi jakąś przewagę reprodukcyjną, ponieważ może dzięki temu skrócić spermę innym samcom albo uniknąć ataku ze strony silniejszych rywali. Jednak Rick Shine zaczął się zastanawiać, czy w tym zbijaniu się w wielkie węzowe kłębowiska chodzi wyłącznie o reprodukcję. Czy przypadkiem nie chodzi także o ciepło?

Gady w worku

Na szczęście biologia była po stronie badaczy. Można by pomyśleć, że wąż ogrodowiec, który za wszelką cenę dąży do aktu reprodukcji, nie będzie życzliwie traktował wtrącania się w swoje sprawy. Jednak późną wiosną Shine i jego koledzy mogą robić z tymi gadami wszystko, na co mają ochotę – samcami, samico-samcami czy samicami. Mogą je podnosić z ziemi, mierzyć, wrzucać do worka. Węże mają za mało energii, żeby się tym przejmować, dzięki czemu stają się niemal niedorzecznie idealnym przedmiotem badań. Właśnie dlatego Shine w latach 1997–2004 niemal co roku pielgrzymował z Australii do węzowych jam w okolicach Narcisse. „Kiedy masz 10 tysięcy zakochanych węży na powierzchni domowego salonu, to jest prawdziwy raj dla biologa badającego życie tych gadów” –

mówi.

Aby poznać sekrety samico-samców, Shine i jego koledzy po prostu siadali w trawie obok czerwobokich pończoszników, które właśnie wypełzły na powierzchnię ze swoich zimowych kryjówek. Trzymając pojedyncze samico-samce za ogon, badacze pokazywali je „prawdziwym” samcom, żeby zobaczyć, jak te zareagują. Samce niemal zawsze uważały, że samico-samce są atrakcyjne, i starały się przycisnąć do któregoś / którejś z nich swoją głowę i całe ciało. A zatem samce zdecydowanie ulegały feromonowemu urokowi samico-samców. Ale co z tego mają samico-samce?

Czas na bardziej wyrafinowany eksperyment. Shine przetrzymywał grupę samico-samców w temperaturze +10 stopni C, czyli takiej, jaka panuje w podziemnej kryjówce pończoszników. Jednocześnie ogrzewał inną grupę samico-samców do temperatury 28 stopni C, wrzucając je do płóciennych worków i umieszczając na elektrycznie podgrzewanych przednich siedzeniach terenowego samochodu marki Yukon, wynajętego przez badaczy. Następnie uczeni sprowadzali obie grupy węży do tej samej temperatury + 25 stopni C, ogrzewając chłodne węże na siedzeniu samochodu i pozwalając wcześniej podgrzanym wężom, aby w sposób naturalny się ochłodziły.

Trzymając za ogon każdego samico-samca o temperaturze +25 stopni C, Shine pokazywał go / ją pięciu różnym samcom. Jak się spodziewano, samce zaczynały szybciej wywijać językiem i usiłowały się przytulić do samico-samca. Ale ich zainteresowanie nie trwało wiecznie. Po upływie trzech godzin przestawały rozglądać się za wężem z ciepłej grupy. Węże z grupy chłodnej budziły ich zainteresowanie przez 5 godzin. Utrata zainteresowania samico-samcami przez samce wskazywała, że samico-samce wracały do swojej normalnej postaci zwykłych samców, przy czym ciepłe samico-samce wracały do niej szybciej niż te chłodne. Wniosek był jasny: samce z gatunku

pończoszniaka o czerwonych bokach zmieniały się w samico-samce po to, aby się jak najszybciej ogrzać. Udając, że jest samicą, samico-samiec zachęca inne samce do tego, aby się do niego przytulały w przekonaniu, że jest potencjalną partnerką seksualną. Ocierając się o swoich cieplejszych rywali, chłodny samico-samiec przechwytuje ciepło wytwarzane przez ich mięśnie i ogrzewa własne ciało. Ciepło, jak dowiemy się później, zawsze przepływa od obiektu cieplejszego do chłodniejszego.

Węże i drabiny^[1]

Takie podkradanie ciepła od innego zwierzęcia można nazwać kleptotermią (nie należy mylić go z nieodpartym pragnieniem, aby natychmiast wybiec z supermarketu, chowając pod kurtką kilka słoików z kawą – to kleptomania). Węże, jako zwierzęta długie i cienkie, mają relatywnie dużą powierzchnię w stosunku do objętości i dlatego tracą ciepło szybciej, niżby traciły, gdyby były stworzeniami okrągłymi i miłutkimi. A ciepło to cenne dobro chłodną wiosną w stanie Manitoba. Jeśli masz szczęście, temperatura sięga +10 stopni C, czyli jest taka sama jak pod ziemią. Przywierające do siebie w wielkim kłębowisku pończoszniaki mogą ograniczyć swoje straty ciepła. To zupełnie tak samo jak na kempingu w chłodną noc: kiedy przytulasz się do kogoś w namiocie, wszystkim jest cieplej.

Wchodząc w rolę samico-samca, osobnik, który dopiero co wypełzł spod ziemi, może się szybciej ogrzać i wyjść z zimowego otępienia. A szybkość działania ma tutaj decydujące znaczenie. Wychłodzony wąż po miesiącach spędzonych pod ziemią jest powolny jak ślimak i staje się łatwym łupem dla wron, które z wielkim smakiem zjedzą ospałego pończoszniaka. Ogrzawszy się, wąż może się szybciej poruszać i dzięki temu uniknąć ptasich szponów.

Ze zmiany płci samico-samiec czerpie także dodatkowe korzyści: odciąga uwagę innych samców od prawdziwych samic, dzięki czemu jego rywale tracą cenną energię na bezproduktywne zaloty. W tym czasie samico-samiec zachowuje swoją energię, nie kłopotując się uprawianiem seksu. Jak mówi porzekadło: trzymaj swoich przyjaciół blisko siebie, ale wrogów jeszcze bliżej.

Początkowo biolodzy sądzili, że tylko niektóre samce z gatunku pończoszніка o czerwonych bokach przechodzą po zimowaniu fazę samico-samca. Okazuje się jednak, że robią tak wszystkie, choć zmiana płci nie trwa w nieskończoność. Ogrzewając się w ten sposób przez dzień albo dwa, większość samico-samców wraca do postaci samca i wyrusza na letnią wędrówkę. Większość zalotów i kopulacji prawdziwych samców i samic odbywa się w małych grupach, z dala od zimowych kryjówek.

Pończoszniki o czerwonych bokach są wiosną tak absurdalnie łatwym przedmiotem badań, że Shine zdołał wyprodukować ponad 40 naukowych artykułów na podstawie swoich 7 wypraw w kanadyjskie pustkowia. „Człowiek może jednego wieczoru wpaść na nowy pomysł, nazajutrz poddać go weryfikacji, a następnego dnia przy kolacji wymyślić kolejny eksperyment” – mówi Shine. Zażywszy na taką masę potulnych węży, gdyby Spielberg miał okazję zajrzeć do książki Shine’a, mógłby swoją sławną scenę z węzami z *Poszukiwaczy zaginionej Arki* nakręcić w Kanadzie.

Robi się gorąco

Opowiadając tę pełną namiętności historię węzowych machlojek, niefrasobliwie używaliśmy co jakiś czas takich słów jak „ciepło” czy „temperatura” i niewykluczone, że nawet nie zwróciliście na to uwagi.

„Ciepło” to słowo, którym posługujemy się na co dzień. Mówimy o ciepłe słońca albo o tym, że wdaliśmy się w gorący spór, i wszyscy wiemy, co to znaczy, że jest nam zimno albo gorąco. Jednak nawet największe umysły w dziedzinie fizyki nie potrafiły niegdyś zrozumieć, czym tak naprawdę jest ciepło. W XVIII wieku większość uczonych sądziła, że ciepło to niewidoczny, nieważki fluid zwany cieplikiem, który przenika jakoś z gorącego przedmiotu do chłodniejszego. Chociaż dziś idea cieplika może wydawać się zabawna, aby ją ostatecznie obalić, potrzeba było eksperymentu przeprowadzonego w 1798 roku z udziałem zwierząt – dwu koni – oraz pewnego człowieka, który studiował w Monachium sztukę wytwarzania armat. Urodzony w Ameryce Brytyjczyk Benjamin Thompson (1753–1814) wywiercił, posługując się kieratem poruszonym przez konie, otwór w ważącym 2,7 kilograma mosiężnym walcu zanurzonym w naczyniu z wodą. Kiedy po upływie dwu i pół godzin, zaudziwszy zapewne konie na śmierć, przewiercił w końcu żelaznym wiertłem mosiężny walec na wylot, zarówno mosiądz, jak i woda były niezwykle gorące. „Trudno wręcz byłoby opisać zdumienie i zaskoczenie, jakie malowało się na twarzach zgromadzonych widzów, kiedy uświadomili sobie, że tak ogromna ilość zimnej wody została ogrzana niemal do stanu wrzenia bez użycia ognia” – pisał Thompson.

Skąd pochodziło to ciepło? Potrzyjcie dłonie, a poczujecie wskazówkę. Kiedy dwie powierzchnie, takie jak wnętrza dłoni albo żelazne wiertło i powierzchnia walca z litego mosiądzu, ocierają się o siebie, wytwarzają siłę znaną jako tarcie. Ta siła stawia opór wobec ruchu i przekształca część jego energii kinetycznej – energii ruchu – w energię wewnętrzną, w tym przypadku w energię kinetyczną cząsteczek obu ciał. Tarcie pojawi się w następnym rozdziale razem ze starożytnymi Grekami i hokejowym krążkiem. Pokazując, że materialne własności użytych wiertel, mosiądzu

i wody nie uległy zmianie oraz że woda ogrzewała się, dopóki konie znajdowały się w ruchu, Thompson wykazał, że żaden z elementów nie zyskał ani nie stracił ciepła. Ciepło, choć mógłby wydawać się wygodnym wyjaśnieniem, nie istnieje. Thompson uważał, że ciepło stanowi postać ruchu, co – jeśli potraktować oba zjawiska jako formę energii – jest prawdą. Niemniej mimo wysiłków Thompsona i jego koni potrzeba było jeszcze dokonać wielu innych błyskotliwych pomysłów – w tym urodzonego w Salford, w pobliżu Manchesteru, Jamesa Prescottta Joule’a (1818–1889) – aby po upływie kolejnych 50 lat uczeni mogli ostatecznie rozstać się z teorią ciepła.

Rusz się

Joule zarządzał rodzinnym browarem, ale bardziej pasjonowała go wiedza naukowa. W swoim laboratorium podgrzewał wodę, wykorzystując ruch, podobnie jak wcześniej Thompson. Jednak nie potrzebował siły koni pociągowych. Wystarczyło, że przymocowywał do sznura ciężar, a ten, spadając na ziemię, poruszał koło łopatkowe obracające się w naczyniu z wodą. Joule mógł następnie obliczyć ilość pracy mechanicznej wykonanej przez spadający ciężar. Mierząc ilość ciepła, jakie dzięki tej pracy powstawało w zbiorniku z wodą, powiązał energię mechaniczną, niezbędną do wykonania tej pracy, z energią cieplną, jaką ta praca wytworzyła. Eksperyment Joule’a przyczynił się do sformułowania zasady zachowania energii, która w skrócie powiada, że „energia nie powstaje i nie ulega zniszczeniu”. Po prostu przechodzi jedynie z jednej postaci w inną. W eksperymencie Joule’a – z mechanicznej w cieplną. W żarówce energia elektryczna płynącego prądu przekształca się w światło i ciepło, podczas gdy

zwierzęta, poruszając się, zamieniają energię chemiczną zawartą w pożywieniu w energię mechaniczną.

Dział fizyki zajmujący się transferem energii między ciepłem a innymi jej postaciami nazywamy termodynamiką, przy czym pierwsza zasada termodynamiki obejmuje zasadę zachowania energii. W sumie istnieją 4 zasady termodynamiki, które noszą nazwy – dość osobliwie – od zerowej do trzeciej. A to dlatego że fizycy dodali zerową zasadę termodynamiki dopiero w XX wieku, odkrywając wcześniej pierwszą, drugą i trzecią. A zatem należało nieco zmienić ich kolejność, traktując zerową zasadę jako coś w rodzaju prequelu. Jeśli pierwszą, drugą i trzecią zasadę termodynamiki potraktować jako kolejne filmy gwiazdnej sagi: *Gwiezdne wojny*, *Imperium kontratakujące* i *Powrót Jedi*, zerowa zasada termodynamiki odpowiadałaby filmowi *Mroczne widmo* (albo, jeśli już ktoś jest purystą w sprawach *Gwiezdných wojen*, *Zemsta Sithów*. No tak, fizycy powinni dorzucić jeszcze kilka zasad termodynamiki, żeby ta analogia miała sens).

W uznaniu dla naukowych osiągnięć Joule'a, z użyciem koła łożatkowego i innych, stosowana obecnie jednostka energii nosi nazwę dżula. Jeden dżul (J) to ilość energii (albo wykonanej pracy), jaka przechodzi do jakiegoś przedmiotu, gdy ten przedmiot zostanie przesunięty o 1 metr z użyciem siły 1 niutona (N). To mniej więcej energia, jakiej potrzeba, aby podnieść w powietrzu małe jabłko na wysokość metra (więcej o siłach i niutonach dowiemy się w następnym rozdziale, w tym także o tym, jak powstają niezwykle fryzury i jak można chodzić po suficie). W 2010 roku, po prawie czterdziestoletniej przerwie, marka piwa wytwarzanego przez Joule'a wróciła na rynek, ale pewne rozczarowanie budzi to, że nie oferuje żadnych produktów o nazwach związanych z fizyką (może kufelek Ciemnej Energii albo Stellar Artois?). Z nazwiskiem Joule'a spotkamy się także na opakowaniach żywności. Ważąca 25 gramów paczka solonych chipsów

o smaku winegretu, jaką spożyliśmy w celach badawczych, dostarcza 540 000 J (540 kJ) energii. Odpowiada to 130 kaloriom (jedna kaloria czy też, ściśle biorąc, 1 kilokaloria równa się 4184 J). Termin „kaloria”, utworzony na cześć cieplika (ang. *caloric fluid*), jest przestarzały, ale kalorie nadal dobrze smakują, nawet jeśli już nie warto ich liczyć.

Współcześnie definiujemy ciepło jako sposób przekazywania energii. Ciepło, w odróżnieniu od cieplika, którego po prostu nie ma, istnieje tylko wtedy, gdy 2 przedmioty mają różną temperaturę. Przepływa między nimi, dopóki nie osiągną tej samej temperatury lub też, mówiąc w języku naukowym, równowagi termicznej. W tym momencie przekazywanie energii ustaje i ciepło przestaje istnieć. Energia poprzednio znana – i przekazywana – jako ciepło wchodzi teraz w obręb energii kinetycznej atomów albo cząsteczek wibrujących we wnętrzu uprzednio chłodniejszych przedmiotów, dzięki czemu te cząsteczki poruszają się szybciej. W dowolnej temperaturze powyżej zera absolutnego ($-273,15$ stopni C lub też, w ulubionej przez jajogłowych skali Kelvina, w temperaturze 0 stopni K) takie cząsteczki wibrują przez cały czas. W gazie albo cieczy poruszają się swobodnie, podczas gdy w ciele stałym wibrują wokół swoich ustalonych pozycji. Tym właśnie jest temperatura: miarą przeciętnej energii kinetycznej atomów albo cząsteczek danego obiektu. Coś, co ma wyższą temperaturę, a więc większą średnią energię kinetyczną cząsteczek, może przekazać ciepło czemuś, co jest chłodniejsze. Czyli zachować się tak jak gorąca szarlotka, na której położymy gałkę lodów. Innymi słowy, temperatura jest miarą zdolności danego przedmiotu do przekazywania ciepła.

Ale w jaki sposób ciepło może być przekazywane przez ciało o wyższej temperaturze ciała o temperaturze niższej? Wróćmy do naszych węży pończoszników. Kiedy chłodnemu i apatycznemu samico-samcowi uda się dzięki sztuczce z jego / jej feromonami udającymi żeńskie skłonić

„prawdziwe” samce do tego, aby stłoczyły się wokół niego, w jaki sposób ciepło przedostaje się przez ich skórę i przenika do ciała samico-samca? Nie chodzi przecież o to, że węże wymieniają się cząsteczkami, nawet jeśli przekazywanie swojego DNA stanowi cel numer jeden oszukanych samców. Zamiast tego, jeśli chcą podkraść ciepło z ciała innego węża, wykorzystują przewodzenie (ang. *conduction* – w sensie fizycznym; nie mówimy o wymachiwaniu pałeczką przed orkiestrą symfoniczną ani o sprawdzaniu biletów w pociągu). Kiedy przyciskają się blisko do chłodnego samico-samca, szybciej poruszające się cząsteczki w ciepłych, „prawdziwych” samcach zderzają się z wolniej poruszającymi się cząsteczkami samico-samców. Podczas tych zderzeń następuje przekazanie części energii szybko mknących cząsteczek sąsiednim, wlokącym się ślamazarnie. Zupełnie jakby cząsteczki samico-samców zostały porwane przez szybko poruszający się tłum; w końcu same zaczynają poruszać się szybciej. Przekazanie ciepła, będące następstwem tych zderzeń, obniża średnią energię kinetyczną cząsteczek u prawdziwych samców, obniżając ich temperaturę, i zwiększa średnią energię kinetyczną cząsteczek samico-samców, podnosząc ich temperaturę. Niemniej zachodzące w ten sposób przewodzenie, w sytuacji gdy 2 ciała o różnej temperaturze znajdują się blisko siebie, to tylko jeden ze sposobów przekazywania ciepła. Więcej o dwu pozostałych wkrótce. Ale najpierw będziemy musieli zejść na psy...

Obracaj się i trzęś...

... zahaczając po drodze o jeden z największych wynalazków ludzkości – gorącą kąpiel w wannie. Wanna to idealne miejsce na leniwe rozmyślenia i zdarzający się od czasu do czasu moment olśnienia w stylu Archimedesza:

„Heureka!”. Prysznic, nawet jeśli pozwala oszczędzić wodę, nie daje jednak czasu na namysł. A zatem: leżysz sobie w wannie pełnej gorącej wody, trzymając w rękach swoją ulubioną książkę popularnonaukową; w oparach czuć delikatny zapach lawendy. W tle rozbrzmiewa muzyka Vivaldiego, na rogu wanny stoi kubek z miętową herbatą. Po prostu raj. Udało ci się nawet nie zamoczyć stron książki. Na chwilę odpływasz myślami i budzisz się w chwili, gdy woda zaczyna wlewać ci się do ust. Hm. Lawendowe mydło nie smakuje jednak aż tak dobrze, jak pachnie.

Niemniej poza tym wszystko jest idealne. Jeśli poczujesz chłód, można łatwo temu zaradzić. Wystarczy na chwilę odkręcić kurek z gorącą wodą i dalej oddawać się beczynności. Gorąca woda pod wpływem siły ciężenia opada na dno, a potem unosi się do góry, ponieważ jest mniej gęsta – zawiera mniej cząsteczek w danej objętości niż reszta twojej wody, obecnie zbyt chłodnej jak na odczuwanie rozkoszy. W miarę unoszenia się do góry gorąca woda przyciąga w miejsce, które zostawia po sobie, zimniejszą, bardziej gęstą wodę z drugiego końca wanny. W efekcie powstaje prąd konwekcyjny, dzięki któremu następuje wymieszanie wszystkiego i równomierny rozkład temperatury, nie wymagający od ciebie najmniejszego kiwnięcia palcem (choć jeśli energicznie zamieszasz wodę dłonią, ten cud nastąpi jeszcze szybciej).

Konwekcja – drugi sposób przekazywania ciepła – występuje we wszystkich cieczach i gazach, ponieważ ich cząsteczki mogą poruszać się swobodnie. Natomiast przewodzenie działa najlepiej w ciałach stałych, bo atomy albo cząsteczki mogą się w nich poruszać jedynie wokół swoich ustalonych pozycji i są zwykle szczelnie upakowane, choć może także występować w cieczach i gazach. A zatem w wannie robi się cieplej dzięki dwu rodzajom zjawisk fizycznych: dzięki konwekcji gorąca woda płynie w twoją stronę, a dzięki przewodzeniu ciepło przenika w głąb twojego ciała,

tak samo jak ogrzewa samico-samca w kłębowisku parzących się węży. A tym samym znowu wszystko wygląda pięknie.

W końcu jednak czubki palców ci bieleją, skóra robi się pomarszczona i uznajesz, że pora wyjść z wanny. Katastrofa! Ledwo wynurzasz się z wody i drobne strumyczki zaczynają spływać po twoim ciele, gdy nagle przypominasz sobie, że twój ręcznik został w wiklinowym koszu na bieliznę, stojącym w sypialni. Tym, który dostałeś od ciotki. Sypią się przekleństwa. W wannie było tak rozkosznie ciepło, a teraz po prostu zamarzasz, kiedy pospiesznie gnasz korytarzem, zostawiając na dywanie mokre ślady stóp.

Kiedy wychodzisz z wanny, na powierzchni twojego ciała pozostaje około 0,5 kilograma płynu, czyli około 0,5 procent całkowitej masy (solennie przepraszamy za te aluzje do twojej wagi). W kategoriach objętości to z grubsza pół litra albo niewielki karton mleka. Większość tej wody spływa z ciebie, ale to, co pozostaje, paruje: najszybciej poruszające się cząsteczki uciekają przez powierzchnię płynu w powietrze, zostawiając za sobą te bardziej ospałe. Średnia temperatura wody, jaka jeszcze pozostała, spada i ochładza twoje ciało.

Parowanie jest dobre latem, kiedy się pocisz i twoje ciało z rozmysłem tworzy na powierzchni skóry jeziorka potu, dzięki czemu się ochładzasz. Jest także pożyteczne, kiedy pies ziaje z wywalonym językiem, dzięki czemu ślina może parować z powierzchni jego pyska. Ale to zjawisko fizyczne odsłania swoją mniej przyjemną stronę, gdy tuż po kąpieli stoisz bez ręcznika i ociekając wodą, czekasz, aż wyschniesz w zimnym powietrzu. Wystarczy jakiś przeciąg z nieszczelnego okna, a zaraz poczujesz, że zrobiło się jeszcze zimniej, gdy poruszające się powietrze porywa uciekające cząsteczki wody z powierzchni kropel na twojej skórze, dając także innym szansę oderwania się, co przyspiesza parowanie. Właśnie dlatego wyjście z basenu na otwartym powietrzu w wietrzny dzień jest takie orzeźwiające. Przynajmniej

w Zjednoczonym Królestwie.

Woda znajdująca się na twojej skórze ochładza cię także, wyciągając energię termiczną z twojego ciała za pośrednictwem przewodzenia. Woda przewodzi ciepło jakieś 25 razy lepiej niż powietrze, ponieważ jej cząsteczki są gęściej upakowane. W sumie, jeśli na powierzchni twojej skóry znajduje się warstwa wody, dzięki przewodzeniu i parowaniu jest ci znacznie zimniej, niż gdyby otaczało cię tylko powietrze. Jedyne sposoby, aby temu zaradzić, to chwycić szybko ręcznik i osuszyć się możliwie jak najprędzej.

Gęste futro

My przynajmniej mamy ręczniki, nawet jeśli zostawiliśmy je w sypialni, ale zwierzęta niczego takiego nie mają. Ich gęste futro – czy będzie to pies, niedźwiedź, panda czy chomik – może zatrzymać między swoimi włoskami mnóstwo wody. Sierść przemoczonego szczura zatrzymuje w postaci płynu około 5 procent całkowitej masy zwierzęcia. Oznacza to, że gdybyśmy mieli podobne futro, wychodząc z wanny, dźwigalibyśmy na sobie od 4 do 5 litrów wody, czyli 10 razy więcej niż zwykle. A bywa jeszcze gorzej. Szczur może się zawsze pocieszyć, że nie jest mrówką. Drobne włoski pokrywające jej ciało mogą uwięzić 3 razy więcej wody, niż sama waży.

Mokre futro może przyczynić się do poważnego spadku temperatury ciała, jeśli zwierzęta będą czekać, aż wyschną w następstwie parowania. Albo też – jeśli jak psy oraz inne ssaki, ptaki i niektóre gatunki ryb są endotermiczne, czyli same wytwarzają energię niezbędną do ogrzania organizmu – nasiąknięcie futra może doprowadzić do nagłego spadku poziomu ich energii, ponieważ będą się starały spalać zapasy, aby się nadmiernie nie wychłodzić. Zwierzęta robią, co mogą, aby utrzymać tę samą

temperaturę, ponieważ ich ciało dobrze funkcjonuje tylko w pewnym zakresie temperatur. U zwierząt endotermicznych ten zakres zwykle obejmuje jedynie kilka stopni Celsjusza (pomijamy tutaj zjawisko hibernacji). Gady, motyle, ćmy i inne zwierzęta ektotermiczne, które same nie wytwarzają ciepła, często radzą sobie dobrze w większym zakresie temperatur. Wężę ogrodowce o czerwonych bokach, na przykład, czują się całkiem nieźle w temperaturze 10 stopni C podczas kanadyjskiej wiosny, ale poruszają się znacznie zwawiej i czują się bezpieczniej, kiedy ich ciało ma 25 stopni C. Zwierzęta ektotermiczne zasadniczo nie muszą jeść tak dużo jak endotermiczne, ale to nie znaczy, że nie mają problemów. Jeśli zwierzę ektotermiczne pragnie udać się na dłuższą wędrówkę, musi najpierw wylegiwać się na słońcu; poza tym nie może poruszać się szybko przez dłuższy czas ani zamieszkać w miejscach, gdzie jest zbyt chłodno. Pewnych trudności nastręcza im także aktywność w nocy (choć gekony – por. rozdział 2 – są zwierzętami nocnymi).

Ale dosyć już o gekonach, szczurach, pandach i mrówkach – mieliśmy mówić o psach. Jako ssaki psy są endotermiczne; ich ciało musi mieć temperaturę 38–39 stopni C. Jeśli ma poniżej 37 stopni C albo powyżej 40 stopni C, należy szybko zabrać pupila do weterynarza (choć nie powinniście szukać u nas porad medycznych – tylko jedno z nas ma świadectwo kursu pierwszej pomocy, a i to przestarzałe). Podobnie jak ludziom, jeśli psom jest zbyt gorąco, ich metabolizm (tempo, w jakim ciało spala pożywienie, aby wyzwolić energię) przyspiesza i zbyt szybko zużywają swoje zasoby. Poza tym jeśli enzymy, które umożliwiają reakcje wyzwolenia energii, za bardzo się ogrzeją, przestaną działać. A kiedy nie ma energii, nie ma życia. Ale jeśli enzymy znajdują się w temperaturze zbyt niskiej, zanadto odbiegającej od temperatury dla nich idealnej, także nie będą działać prawidłowo. Wtedy metabolizm psa spowalnia, podobnie jak rytm jego serca,

oddech i aktywność mózgu. Jeśli zwierzę będzie zbyt wychłodzone, wszystkie podstawowe funkcje jego organizmu ustaną.

Ciało psa

Mokra sierść to podwójne nieszczęście: nie dość, że w wyniku parowania pies się wyziębia, to jeszcze futro przestaje go grzać. Normalnie między włoskami utrzymuje się warstwa powietrza, która słabo przewodzi ciepło, dzięki czemu futro lepiej spełnia funkcję izolującą i zwierzę mniej się wychładza (w kieszonkach uwięzionego powietrza powstają wprawdzie prądy konwekcyjne, ale działają one jedynie na niewielką odległość). Z ludźmi jest podobnie, choć straciliśmy większość owłosienia; jeśli zmarzniemy, stają nam włoski na ramionach, czyli pojawia się gęsia skórka, zatrzymując cienką warstwę powietrza przylegającego do skóry i przerywając ruchy konwekcyjne. Ale kiedy nasz psiak się przemoczy, futro przewodzi ciepło jego ciała szybciej, ponieważ miejsce powietrza, poprzednio uwięzionego między włoskami, zajęła woda. Więcej ciepła ucieka w otaczające zwierzę powietrze i powstają silniejsze prądy konwekcyjne, które zabierają jeszcze więcej ciepła, nie licząc tego utraconego przez nie w następstwie parowania. Brrr.

Krótko mówiąc: suche futro psa minimalizuje straty ciepła następujące w wyniku przewodzenia i konwekcji. Ale gdy futro się zamoczy, zwierzę musi spalać cenną energię, jeśli chce zachować temperaturę ciała niezbędną do skutecznego funkcjonowania. Żaden psiak nie jest tak głupi, o czym możesz łatwo się przekonać (choć sam zmokniesz przy okazji), jeśli staniesz obok swojego pupila, który właśnie wyskoczył z rzeki. Ociekający wodą pies otrząsa się, dopóki się wystarczająco nie wysuszy. Wierząc się szybko z boku

na bok, uwalnia się od nadmiaru wody, posyłając krople na wszystkie strony niczym prysznic, który wypadł ci z rąk. Dotyczy to nie tylko psów: wszystkie włochate zwierzęta osuszają się podobnie: otrząsając się.

Spróbujmy zatańczyć

Kiedy pewnego dnia David Hu z Georgia Institute of Technology w USA przyglądał się, jak jego pies, niewielki pudel o imieniu Jerry, szybko otrząsnął się do sucha, postawił sobie kilka pytań. Ile energii zużywa zwierzę, aby się otrząsnąć? Oraz ile energii zachowuje w ten sposób, powstrzymując parowanie, które pozbawiłoby jego ciało cennego ciepła? Powodowany naukową ciekawością Hu, z pomocą swoich studentów Andrew Dickersona i Zachary'ego Millsa, postanowił dowiedzieć się, dlaczego otrząsanie się jest taką skuteczną metodą osuszania się psów i innych ssaków.

Zamiast jednak założyć obóz badawczy w dzikich ostępach i obserwować zwierzęta w naturze, w stylu telewizyjnych filmów przyrodniczych, trzej uczeni nagrywali na wideo ruchy otrząsających się zwierząt, które należały do szesnastu różnych gatunków i pochodziły z zoo w Atlancie, laboratoriów badawczych Georgia Institute of Technology oraz miejskich parków. Najmniejszym z nich była nieduża myszka, największym brunatny niedźwiedź, a do tego kilka innych, od szczura po wiewiórkę, kota, kangura, lwa i tygrysa. Oprócz pudła należącego do Davida Hu zespół obserwował także zachowania 4 innych ras psów: chihuahua, chow-chow, dwu syberyjskich husky i 4 labradorów o imionach Belle, Molly, „obawiam się, że nie pamiętam”, i Chipper.

Testy były proste. Badacze polewali mniejsze zwierzęta, takie jak szczury i myszy, wodą z butelki ze spryskiwaczem, a większe z gumowego węża.

Następnie filmowali te, które osuszały się, stosując metodę otrząsania się. Posługiwali się kamerami pracującymi z prędkością do tysiąca klatek na sekundę, a więc około 40 razy szybciej niż kamera telewizyjna. Szczury i myszy wydawały się najzgrabniejsze; mrużąc oczy, unosiły przednie łapki, po czym poruszały ciałem tam i z powrotem, tak jak rusza się bęben mechanicznej suszarki, wierząc się szybko najpierw w jedną stronę, a potem w drugą.

Jak odkryli badacze, wszystkie zwierzęta, niezależnie od swoich rozmiarów, otrząsają się mniej więcej w taki sam sposób. To wirowanie nie tylko słodko wygląda, ale jest także bardzo skuteczne. Zwierzę potrzebuje jedynie kilku sekund, aby się osuszyć, nawet jeśli nie zdoła strząsnąć z siebie całej wody. Ogromna różnica między gatunkami zwierząt polega natomiast na tym, jak szybko każdy z nich potrząsa swoim ciałem. Jeśli przyjrzymy się, od strony głowy, myszy stosującej tę naturalną wirówkę i postaramy się utrzymać spojrzenie na jakimś fragmencie futra na jej grzbiecie, zauważymy, że punkt, na który patrzymy, poruszy się zgodnie z ruchem wskazówek zegara, potem wróci na środek grzbietu i poruszy się w przeciwnym kierunku na mniej więcej taką samą odległość, po czym wróci do punktu wyjścia. Trzej badacze przekonali się, że u najmniejszych zwierząt ta oscylacja, tam i z powrotem, następuje najszybciej, podczas gdy u największych – najwolniej. Zwycięstwo w tym konkursie na najszybszą autowirówkę przypadło myszy. W jej przypadku cały cykl zamykał się w ciągu 31 sekund. Niedźwiedź brunatny, największe ze zwierząt poddanych badaniom, okazał się też najbardziej ospały. Zdołał wykrzesać z siebie zaledwie 4 wstrząsy na sekundę. Domowe koty, z tempem otrząsania się 9 ruchów na sekundę, lokowały się pewnie w środku tabeli.

Gramy dalej

A co z najlepszym przyjacielem człowieka? Labradory wystąpiły w 1975 roku w sławnej, dziś ikonicznej reklamie papieru toaletowego Andrex (Cottonelle w Stanach Zjednoczonych), w której szczeniaczek o piaskowym futerku, trzymając w pyszczku koniec rolki papieru, wesoło biegał po domu, dopóki nie udało mu się rozwlec jej do końca. Wkrótce pojawiła się setka podobnych reklam: miękkie, opadające uszka szceniąt, wraz z ich niewinnym spojrzeniem sarny, nakręcały koniunkturę, sprzedaż rosła. Labradory okazały się także świetnymi współpracownikami w badaniach Davida Hu i Zachary'ego Millsa, którzy dzięki temu mogli bardziej szczegółowo przeanalizować poczynania czwórki swoich podopiecznych, niż to było możliwe w przypadku innych zwierząt – na ogół. „Możesz zawsze liczyć na psa, że się otrząśnie, choć nie zawsze robi to przed kamerą” – mówi Dickerson, który kierował tym fragmentem eksperymentu.

Po oblaniu labradora wodą Dickerson mierzył częstotliwość ruchów jego ciała, która wynosiła około 4,5 razy na sekundę, a więc wolniej niż u kota, ale zgodnie z ogólną zasadą korelacji wielkości i prędkości. Następnie postanowił trochę poeksperymentować. Dickerson przykleił na grzbiecie labradora kawałek różowej słomki do picia, mniej więcej w połowie jego ciała, dzięki czemu mógł zmierzyć, jak daleko – nie tylko jak szybko – sięgała rotacja. Okazało się, że słomka przewędrowała niemal całe 90 stopni w jedną i drugą stronę psiego ciała. Pies w każdym momencie tego ruchu wysyłał w powietrze krople wody, przy czym najwięcej z nich odrywało się w chwili, gdy następowała zmiana kierunku ruchu jego skóry. Podobnie jak inne zwierzęta, labradory otrząsają się przez kilka sekund, po czym przestają.

Psia umiejętność poruszania owłosioną skórą w takim zakresie – w sumie

o 180 stopni, czyli połowę pełnego obrotu – robi wrażenie. Jej tajemnica kryje się w tkance łączącej zewnętrzną warstwę skóry i mięśnie. Ta miękka gąbczasta warstwa, złożona z kolagenu i elastycznych włókien, występuje szczególnie obficie u psów i chroni je przed urazami. Trzymając dłonią skórę na grzbiecie labradora stojącego bez ruchu, Dickerson mógł obrócić tę luźną tkankę prawie o 60 stopni w każdą stronę, licząc od kręgosłupa. Pozostałe 30 stopni ruchu dopełniającego do 90 stopni jest następstwem obrotów samego kręgosłupa zwierzęcia.

Potrząsać, ale nie mieszać

Ten rodzaj ruchu, tam i z powrotem, jaki obserwowano podczas otrząsania się wszystkich zwierząt badanych przez Dickersona, nie tylko labradorów, jest czymś powszechnym w przyrodzie. Znany jest jako „prosty ruch harmoniczny” i występuje na przykład, kiedy wahadło kołysze się z boku na bok albo gdy jakiś ciężarek zawieszony na sprężynie podskakuje w górę i opada w dół. Poruszający się obiekt – w przypadku psa będzie to skóra – ma największą prędkość w środkowym punkcie ruchu, po czym zwalnia i zatrzymuje się w punkcie położonym najdalej od środka, a następnie znowu nabiera prędkości, wykonując ruch w przeciwną stronę.

Formuły matematyczne opisujące prosty ruch harmoniczny są znane od stuleci i zasadniczo są takie same niezależnie od sytuacji. A zatem aby oszacować, ile energii zużywa otrząsający się do sucha labrador, musimy jedynie tak dopasować standardową formułę, aby uwzględnić maksimum energii poruszającego się w ten sposób przedmiotu. W przypadku jednego z labradorów Dickersona oznaczało to pomnożenie masy wszystkich części ciała psa, biorących udział w ruchu zwierzęcia (mięśni, szkieletu, futra

i organów wewnętrznych), oraz wody przez kwadrat promienia klatki piersiowej psa (około 12 centymetrów) oraz kwadrat częstotliwości oscylacji (4,5 razy na sekundę), a następnie podzielenie uzyskanego rezultatu przez 2. Po czym wystarczyło pomnożyć uzyskaną wielkość przez całkowitą liczbę otrząśnień wykonanych przez zwierzę. Odpowiedź? Niestety, nie możemy sformułować dokładnej, ponieważ nie wiemy, jak duża część psa bierze udział w tych ruchach. „To równanie przybliżyło nas do odpowiedzi, ale nie wystarczy, aby wyliczyć dokładną wartość, przynajmniej na użytek publikacji w czasopiśmie [naukowym]” – przyznaje Dickerson.

Wielką niewiadomą jest to, jaką część wody labrador otrząsa w ten sposób. Aby ją wyliczyć, można spróbować zważyć mokrego psiaka przed otrząśnieniem się i po jego zakończeniu. Jednak to nie jest takie proste: ustawić ociekającego wodą psa na wadze. Dickerson poszedł więc inną drogą i zbudował „automatyczny symulator ruchów-otrząsającego-się-psa”. Brzmi to dość fantastycznie, ale chodziło po prostu o kępy nasiąkniętej wodą psiej sierści przyłączone do silnika wyjętego z domowej wiertarki elektrycznej. Wprawiając w ten sposób namoczoną sierść w ruch obrotowy, Dickerson przekonał się, że ostatecznie około 70 procent wody odrywa się od niej, ulatując w powietrze w postaci serii kropel. Tym samym, jeśli pies nosi w namoczonej futrze pół kilograma wody, udaje mu się otrząsnąć jakiegoś 350 gramów, mniej więcej tyle, ile się mieści w zwykłej butelce napoju gazowanego. Nie najgorszy wynik.

Dickerson oblicza, że gdyby ważący 30 kilogramów labrador, który ma w swoim futrze 500 gramów wody, nie poruszał swoją skórą, musiałby zużyć około 480 kJ, aby uzupełnić ciepło, jakie by utracił, czekając, aż 70 procent wody z jego mokrego futra wyparuje, zamiast ją otrząsnąć. Te 480 kJ to ekwiwalent mniej więcej 110 kalorii. Biorąc pod uwagę to, że pies zjada dziennie jakiegoś 800 kalorii, mokry labrador – gdyby nie otrząsał się do

sucha – aby zachować odpowiednią temperaturę musiałyby spalić około jednej siódmej swojego dziennego spożycia kalorii, przyjmując, że zamienia całą energię zawartą w pożywieniu na energię cieplną. To mniej więcej jedna trzecia puszki psiej karmy, której z pewnością żaden psiak nie miałby ochoty zmarnować tylko po to, aby utrzymać swoją temperaturę. Dickerson ostrożnie podchodzi do szacunków mówiących, ile energii pies zużywa, aby strząsnąć z siebie wodę, ale przypuszcza, że to około 100 J, a więc prawie 5 tysięcy razy mniej niż wspomniane 480 kJ.

Wygląda na to, że wystarczy odrobina twista i luźna skóra, aby pies mógł się osuszyć. My jednak nie mamy dość luźnej tkanki podścielającej skórę, aby osuszać się w ten sposób – i dlatego potrzebujemy ręczników. Podobny los jest udziałem odmiany świnek morskich pozbawionych owłosienia. Te łyse świnki, po raz pierwszy wyhodowane w latach osiemdziesiątych XX wieku, mają na ogół skórę gładką jak u niemowlęcia, różową lub brązową, a czasami stanowiącą mieszanekę obu kolorów. Dickerson odkrył, że ich skóra, dokładnie tak samo jak nasza, zbyt ściśle przylega do mięśni, aby mogły się otrząsnąć, a ponieważ nie mają ręczników, muszą po prostu trząść się z zimna, jeśli zmokną.

Kiedy więc twój pies następnym razem wyskoczy z morza i stanie obok ciebie, aby się osuszyć, pamiętaj o dwu rzeczach. Po pierwsze, najpierw otrząśnie około 70 procent wody ze swojego futra, zanim uprzejmię się oddali. Po drugie, pies potrzebowałby od tysiąca do 10 tysięcy razy więcej energii, aby osuszyć się dzięki parowaniu, niż zużywa na otrząsanie się. To szybka decyzja, nad którą nie warto się długo zastanawiać, leżąc w wannie.

Promieniować, aby akumulować

W opowieści o wannach i mokrych psach występowały dwie metody przekazywania ciepła: przewodzenie i konwekcja. Zanim dowiemy się, w jaki sposób pewien owad potrafi uniknąć śmierci z powodu tego samego gorącego napoju, którego potrzebuje, aby złożyć jaja, porozmawiamy chwilę o trzeciej i ostatniej metodzie przekazywania ciepła. A przy okazji dowiemy się, dlaczego czarny mokry labrador marznie odrobinę szybciej niż mokry złoty labrador.

Trzecia metoda przekazywania ciepła, znana jako promieniowanie, w ogóle nie wymaga udziału atomów ani cząsteczek. Energia cieplna wędruje w powietrzu jako fale elektromagnetyczne, złożone z pulsujących na przemian pól magnetycznych i elektrycznych (wrócimy do tego w rozdziale 5). Kiedy takie fale trafią na jakiś przedmiot, przekazują energię jego atomom i cząsteczkom, dzięki czemu poruszają się one szybciej i ogrzewają dany obiekt. Właśnie dlatego wąż pończoszniczek wygrzewa się w kanadyjskim słońcu – wchłania wysyłane przez Słońce fale elektromagnetyczne, które mkną w stronę Ziemi w przestrzeni kosmicznej i potrzebują zaledwie 8 minut i 19 sekund, aby pokonać drogę 150 milionów kilometrów.

Ale nie trzeba być gwiazdą, jak Słońce, żeby wypromieniowywać fale elektromagnetyczne. Wystarczy, że twoja temperatura jest wyższa niż zero absolutne (0 stopni K albo $-273,15$ stopni C). A wszystko we wszechświecie jest odrobinę cieplejsze; wprawdzie naukowcom udało się ochłodzić niewielkie cząstki materii do temperatury o jedną miliardową stopnia wyższej od zera absolutnego, ale zera nie udało im się osiągnąć (i nigdy im się nie uda, nieważne, jak bardzo będą się starali, ponieważ fizyka im na to nie pozwoli). A zatem wszystkie przedmioty emitują fale elektromagnetyczne, takiego lub innego rodzaju, ponieważ ich cząstki lub atomy znajdują się w nieustannym ruchu. Długość wysyłanej przez rozgrzane ciało fali

elektromagnetycznej, dla której energia promieniowania jest największa, zależy od temperatury ciała. Jeśli rozgrzejemy w palenisku pogrzebacz, zaczyna promieniować głównie w zakresie podczerwieni; w miarę jak rośnie jego temperatura, zaczyna promieniować fale krótsze, widoczne dla naszego oka, czyli światło, najpierw czerwone, a gdy rozgrzeje się jeszcze bardziej, jaśniej światłem żółtobiałym o jeszcze krótszej fali. A kiedy go wyjmemy z ognia, zobaczymy, że stygnąc, zmienia barwę z żółtej na pomarańczową, a potem na czerwoną, w miarę jak długość fal świetlnych rośnie. Nawet kiedy pogrzebacz osiągnie temperaturę pokojową i wygląda jak zwykły kawałek zimnego metalu, nadal emituje fale, tyle że są to fale podczerwone, których nie potrafimy dostrzec (użyteczne jednak dla naszych pilotów telewizyjnych).

Te zmieniające się pola elektryczne i magnetyczne pulsują z różną częstotliwością, szybciej lub wolniej, w zależności od energii danej fali. Aby postępować zgodnie z prawami fizyki, fale muszą w danym środowisku wędrować zawsze z tą samą prędkością. To zaś oznacza, że fale podczerwone, które mają mniejszą energię niż widoczne światło czerwone, a tym samym ich pola pulsują wolniej, muszą za każdym razem gdy pole pulsuje, wędrować szybciej. Innymi słowy: długość fali promieniowania podczerwonego jest większa niż fal światła czerwonego. Oko ludzkie widzi jedynie długości fal od czerwieni do fioletu. Więcej na ten temat w rozdziale 6, gdzie poznamy także pisklęta kukułki, które aby wyprowadzić w pole swoich przybranych rodziców, używają pigmentów widocznych w świetle ultrafioletowym, o mniejszej długości fali.

Podobnie jak pogrzebacz, zwierzęta w temperaturze pokojowej emitują fale podczerwone. Nie widzimy tych fal, ale fizyka mówi nam, jak się zachowują. Czarne przedmioty wydają się czarne, ponieważ pochłaniają wszystkie długości fali światła widzialnego i nie odbijają żadnych

z powrotem w stronę naszych oczu. To dlatego na plaży pokrytej czarnym piaskiem wulkanicznym z większym prawdopodobieństwem poparzymy sobie stopy niż na plaży usianej złotym piaskiem – czarna plaża wchłonęła więcej światła i stała się bardziej gorąca. Podobnie czarne przedmioty skuteczniej emitują promieniowanie elektromagnetyczne o wszystkich długościach fal – w tym podczerwone – i dlatego mokry czarny labrador wychładza się nieco szybciej niż jego kuzyn o złotej sierści.

Ostatecznie to właśnie promieniowanie elektromagnetyczne docierające ze Słońca – zarówno to widoczne, jak i podczerwone – daje napęd całej biologii, dostarczając naszej planecie odpowiednią ilość ciepła, aby podtrzymać na niej życie, oraz światła, dzięki czemu rośliny mogą, w wyniku fotosyntezy, wytwarzać pożywienie dla siebie samych i zwierząt. O ile jednak odpowiednia ilość ciepła jest niezbędna do życia, o tyle w pewnych okolicznościach za dużo ciepła może okazać się zabójcze. Przyjrzyjmy się teraz zwierzęciu, które wykorzystuje fizykę ciepła do tego, aby się ochłodzić. Ten owad czasem bywa dla ludzi zabójczy. I chociaż Manop Rattarithikul, kiedy poznacie jego historię, mógłby wydawać się ostatnią osobą, po której spodziewalibyśmy się, że je uwielbia, niemniej jest jednym z największych fanów tych stworzeń. Pora na wycieczkę do Tajlandii, aby przyjrzeć się sekretom życia komarów.

Przyjemny, ciepły napój

Dziś Manop Rattarithikul razem ze swoją żoną Rampą, specjalistką w dziedzinie życia owadów, są właścicielami Muzeum Owadów Świata i Cudów Przyrody w tajlandzkim mieście Chiang Mai. Jego muzeum może się poszczycić setkami okazów komarów różnych gatunków,

prezentowanych w drewnianych gablotach, obok licznych żuków, stonóg oraz liśców (*Phyllium*). Na ścianach muzeum można także podziwiać krzykliwe malowidła przedstawiające ogromne komary, dzieła samego Manopa, w tym obraz ukazujący czarnego osobnika o długości metra, który przysiadł na łonie kobiety gdzieś w głębi szmaragdowej dżungli. Sympatia Manopa dla komarów może wydawać się zaskakująca, ponieważ niewiele brakowało, a w latach drugiej wojny światowej jako dziewięcioletnie dziecko umarłoby na malarię, zabójczą chorobę roznoszoną przez te owady. W dodatku przy tej okazji poddano go pewnej niesłychanie bolesnej terapii.

Podczas wojny w Chiang Mai, gdzie mieszkał mały Rattanarithikul, w miejscowej świątyni stacjonowały oddziały japońskie, miasto stało się więc celem amerykańskich nalotów. Aby ocalić życie swojego synka, rodzice wysłali go do wioski położonej wśród pobliskich wzgórz. Wprawdzie uchroniło go to przed bombami, ale właśnie tam Manop zaraził się malarią. Wieśniacy nie mieli pod ręką żadnych środków medycznych, zaprowadzili więc chłopca do pewnej kobiety zajmującej się uzdrawianiem. Według opisu tej historii, jaki można przeczytać w muzeum, uzdrawiaczka razem z mężem najpierw zdjęli chłopcu spodnie, o tym, co było dalej, pan Rattanarithikul pisze: „zerwali kolec z drzewa cytryny, przekłuli skórę wokół mojego odbytu i pociągnęli”. Manop Rattanarithikul nie potrafi sobie przypomnieć, ile razy uzdrawiaczki dokonali tego barbarzyńskiego aktu, ale nie ustawali, dopóki z jego tyłka nie siknęła krew. „Ból był rozdzierający – opowiada Rattanarithikul. – Pod wpływem tego bólu zacząłem się intensywnie pocić”.

Jakkolwiek może to się wydawać szalone, chodziło o to, że intensywne pocenie się może uwolnić go od choroby; w sumie w ciągu dwu miesięcy poddano dziewięcioletka tej „terapii” dziesięciokrotnie. W jakiś sposób Rattanarithikul zdołał przeżyć to okrutne traktowanie. Wyzdrowiał całkowicie, a z czasem poświęcił swoje życie badaniu komarów i stworzeniu

muzeum. Nie opowiadamy tej historii po to, żeby kogoś zaszokować, ale ze względu na ukrytą w niej osobliwą paralelę z życiem samych komarów. Niektóre z nich chwilę po wyssaniu krwi z człowieka – albo jakiegoś innego zwierzęcia – wydalają krwawą wydzielinę z własnego odwłoka. Pozbywanie się substancji, którą przed chwilą wypity, może wydawać się dziwne. Ale dzieje się tak nie bez powodu. I jak się zapewne domyślicie, ma to coś wspólnego z fizyką.

Czerwony bzyk

Na świecie żyje ponad 3,5 tysiąca gatunków komarów (po angielsku nazwanych *mosquito*, słowem pochodzącym z języka hiszpańskiego, oznaczającym „małą muszkę”). I wszystkie wydają dobrze znane, irytujące bzyczenie, kiedy machają swoimi skrzydełkami z częstotliwością od 500 do 600 razy na sekundę. Ciało przedstawicieli niektórych gatunków komara zakrzywia się na wysokości „ramion” w taki sposób, że głowa owada zwisa ku dołowi, co budzi skojarzenia z sylwetką czarownicy pochylonej nad parującym tygłem. Komary zasadniczo karmią się nektarem i sokiem, ale wiele gatunków – choć nie wszystkie – żywi się także wysysaną krwią. Tylko samice pragną naszej krwi, ponieważ potrzebują zawartych w niej protein, aby móc złożyć jaja. Ze złożonych w wodzie jaj wykluwają się larwy, które następnie przekształcają się w poczwarki, wypuszczając odnóża i skrzydła. Ostatecznie wyłaniają się z nich w pełni rozwinięte, dorosłe osobniki, które unoszą się na powierzchni wody, dopóki nie nabiorą siły, aby wznieść się do lotu. Później, w rozdziale 3, dowiemy się, że niektóre owady potrafią także chodzić po wodzie.

Dorosłe komary żyją zaledwie kilka tygodni, więc samica nie ma przed

sobą zbyt wiele czasu. Niezbędną dla siebie krew zdobywa, przebijając skórę ofiary długą rurką zwaną trąbką (inaczej: *proboscis*, od słowa w języku greckim „karmiący od przodu”), która znajduje się na głowie owada. Na filmie nakręconym w 2013 roku przez Valerie Choumet i jej kolegów z Instytutu Pasteura w Paryżu widać, że trąbka komara nie jest sztywna jak słomka do picia, ale zagina się i zakrzywia, kiedy owad poszukuje krwi na dużym obszarze ciała ofiary. A gdy już samica komara ją wytropi, wstrzykuje do ciała ofiary ślinę wzbogaconą o antykoagulanty, które zapobiegają krzepnięciu krwi, ponieważ mogłoby ono spowodować zatkanie jej trąbki, zanim zdąży się napić tak pożądanego płynu. Czasami komarzyca przysysa się tak mocno, że przekłute naczynie pęka i pod skórą ofiary powstaje jeziorko krwi, do którego może potem wracać, aby ponownie napęłnić zbiornik. Jak ujął to Rudyard Kipling w wierszu z 1911 roku, „samica tego gatunku jest stokroć gorsza niż samiec”. Z pewnością nie ze względu na niewielką ilość krwi, jaką komarzyca odsysa, ale dlatego że wiele gatunków może przenosić przy tej okazji różne choroby.

Samice gatunków komarów roznoszących malarię zwykle atakują między zmierzchem a świtem, dlatego ofiara często budzi się rano pokryta swędzącymi śladami ukąszeń. Przyczyną swędzenia jest reakcja immunologiczna organizmu na ślinę wstrzykniętą przez żeńskiego drapieżnika. Mówiąc bardziej poważnie, ślina komarzycy może zawierać pasożyty wywołujące malarię albo wirusy powodujące żółtą febrę, gorączkę zika i dengę. Według danych Światowej Organizacji Zdrowia z 2013 roku z powodu samej malarii rocznie umiera ponad 600 tysięcy chorych. Jedną z osób, które poświęcają swoje pieniądze na walkę z tą chorobą, jest Bill Gates, były szef Microsoftu. Ale jeśli wydaje wam się, że możecie uniknąć ukąszeń, wypatrując pilnie samic komarów, mylicie się. Gołym okiem nie sposób odróżnić, jakiej płci jest dany osobnik. Choć przez mikroskop

moglibyśmy dostrzec jedną wielką różnicę. Czułki samicy są gładkie, podczas gdy u samca pokryte są włoskami, które pomagają mu odbierać fale dźwiękowe wydawane przez skrzydła samic, dzięki czemu wie, gdzie szukać partnerki.

Niebezpieczne związki

Komary bywają niebezpieczne dla ludzi, ale to nie znaczy, że same mają życie usłane różami. Wystarczy zrolowana gazeta albo zręczny ruch dłoni i można jednym ciosem odprawić komara w niebyt. Nawet Dalajlama nie jest przeciwnikiem aktywnej obrony w tym przypadku. Podczas rozmowy z amerykańskim dziennikarzem Billem Moyersem duchowy przywódca dał do zrozumienia, że jeśli nie uda mu się zdmuchnąć ani odpędzić komara, który na nim wylądował, raczej go pacnie. Czy buddysta powinien zabijać komary, których ukąszenie może przenosić śmiertelne choroby? To interesujący dylemat.

Jednak największe niebezpieczeństwo, z jakim musi się liczyć samica komara, nie kryje się w zrolowanej gazecie Dalajlamy, ale w samym procesie wysysania krwi z ofiary. Komarzyca potrzebuje krwi do złożenia jajek, ale zwierzę, z którego stara się ją wyssać, zwykle nie jest z tego zadowolone i stara się rozgnieść intruza podczas posiłku. Dlatego właśnie komary wolą kąsać nocą – ich ofiary odpoczywają wtedy albo śpią. Niemniej nawet w takim przypadku operacja jest ryzykowna, ponieważ „dawca” może w każdej chwili się obudzić. Starając się za wszelką cenę uniknąć kłopotów, samica próbuje jak najszybciej wypić jak najwięcej krwi. To tak, jakbyśmy chcieli wdrzeć się do restauracji, w której wprawdzie można się najeść do woli, ale właściciel może nas zabić, jeśli przyłapie nas na chłeptaniu gorącej

zupy. Nie ma sensu się ociągać. Samica komara opija się więc nierozważnie swoim płynnym lunchem i zwykle przy tej okazji ciężar jej ciała ulega potrojeniu, gdy przy każdym posiłku wchłania w siebie kilka miligramów krwi. Gdybyśmy chcieli uzyskać podobne potrojenie wagi ciała, musielibyśmy wlać w siebie dobrze ponad 100 litrów zupy za jednym posiedzeniem.

Takie ucztowanie ma sens, jeśli utrzymuje cię przy życiu. Ale kłopot polega na tym, że ludzie i inne ssaki mają ciepłe ciała, zwykle o temperaturze około 34–40 stopni C. A zatem kiedy samica komara wysysa naszą krew, to ciepło przenika także do jej organizmu. A to jest już problem, ponieważ nie może rozgrzać się za bardzo, jeśli chce kontynuować proces reprodukcji, a jednocześnie jej życie jest za krótkie, aby mogła marnować czas. Opita i nadmiernie rozgrzana komarzyca może nawet sama stać się ofiarą ssania krwi, gdy jakaś inna samica zanurzy swoją trąbkę w zapas krwi świeżo zdobyty przez rywalkę. To wcale nie jest takie nieprawdopodobne. Komary są dobrymi myśliwymi albo dzięki swojemu zmysłowi wzroku, albo znajdującym się w czułkach receptorom wykrywającym dwutlenek węgla w oddechu ofiary. Kiedy samica wykryje inną samicę opitą gorącą krwią, może poczuć przemożne pragnienie, aby się posilić.

Komarzyca znajduje się więc między młotem a kowadłem (gorącym). I co ma zrobić w tej sytuacji? Jeśli pije powoli, aby uniknąć zbytniego rozgrzania się za szybko, jej ofiara może zamienić się w zabójcę i ją rozgnieść. Natomiast jeśli pije szybko, aby uniknąć ciosów kończyną, ogonem lub gazetą, może się przegrzać, a wtedy jej ciało przestanie funkcjonować prawidłowo i może sama zostać wyszana do sucha przez jedną ze swoich sióstr.

Odpowiedź na pytanie, w jaki sposób samica komara rozwiązuje ten problem, zawdzięczamy Claudiowi Lazzariemu i Chloé Lahondère

z Université François-Rabelais w Tours, we Francji. Odkrywszy w 2012 roku, w jaki sposób inny owad – płaskogrzbiety krwio pijca, z podrodziny *Triatominae*, który przenosi chorobę Chagasa – znajduje swoją ofiarę, wykrywając temperaturę jej ciała, para uczonych zainstalowała w swoim laboratorium klatkę wielkości skrzynki na narzędzia, pełną komarów z gatunku *Anopheles stephensi*. Ta odmiana komara, występująca w wielu rejonach Indii, Azji Południowo-Wschodniej i na Bliskim Wschodzie, należy do głównych winowajców w roznoszeniu malarii, dlatego dobrze byłoby dowiedzieć się nieco więcej na temat jej obyczajów. Claudio Lazzari i Chloé Lahondère pozwalali komarom wysysać krew z ludzkich dłoni albo z ciała myszy pozbawionych owłosienia – w obu przypadkach dzięki gładkiej skórze ofiary łatwiej mogli zaobserwować, co się dzieje. W duchu prawdziwego poświęcenia się dla dobra nauki oboje wykorzystywali przy tej okazji własne dłonie. „Zarówno Chloé, jak i ja zostaliśmy pogryzieni około 30 razy” – opowiada Lazzari. Oczywiście komary używane podczas tych badań były wolne od zarazków choroby.

Biolodzy wiedzieli od lat trzydziestych XX wieku, że samice komara wydalają ze swojego odwłoka kropelki krwi, ale dopiero Claudio Lazzari i Chloé Lahondère pierwsi posłużyli się kamerą termowizyjną, aby zmierzyć promieniowanie podczerwone emanowane przez owady w chwili ich wydalania. W rezultacie otrzymali niezwykle barwne „mapy termiczne”, na których kolor czerwony oznaczał gorący obszar, żółty ciepły, a zielony i niebieski chłodniejsze rejony. Te obrazy przypominają trochę malowidła Andy’ego Warhola przedstawiające Marilyn Monroe, z tą różnicą, że twarz Marilyn zastąpił na nich profil komara przekłuwającego skórę swojej ofiary. Ujęcia rejestrowane co 5 sekund odnotowują dokładnie temperatury w obrębie ciała samicy *Anopheles stephensi* przed wysysaniem krwi, w trakcie wysysania i po zakończeniu przez nią wysysania krwi z dłoni

badaczy, w zakresie od 28 do 37 stopni C.

Na pierwszej mapie cieplnej, przedstawiającej dłoń o temperaturze 36 stopni, można zobaczyć głowę komarzysty, która jest równie gorąca jak dłoń: jest jasnoczerwona. Jej ciało jest nieco chłodniejsze, jego temperatura wynosi 34 stopnie C (kolor pomarańczowy), choć nadal znacznie powyżej bezpiecznej dla niej strefy 25 stopni C, która miałaby barwę niebieską. Jakież 5 sekund po rozpoczęciu przez samicę ssania krwi u dołu jej odwłoka pojawia się kulka płynu – mieszanina krwi i moczu, pół na pół. Na mapie cieplnej zabarwione na zielono kropelki mają początkowo 31 stopni C. Po następnych 25 sekundach stają się większe i ochładzają się do 26 stopni, na mapie barwnej przybierając kolor niebieski. Po czym kropelka odrywa się od odwłoka. Niczym nie zniechęcona komarzystka natychmiast zaczyna wydalać następną kropelkę płynu.

W ciągu 25 sekund, jakie zajmuje uformowanie się kropelki, zanim się oderwie, na mapie barwnej widać spadek temperatury ciała komarzysty (a nie kropelki) o jakieś 3 stopnie, do mniej więcej 31 stopni C. Transfer ciepła zaczyna się po upływie kilku sekund po ukształtowaniu się kropelki. Kiedy samica komara ostatecznie przestaje pić i wyciąga swoją trąbkę z ciała ofiary, jej ciało ochładza się do temperatury powietrza w klatce, wynoszącej 23 stopnie C. Aby potwierdzić, że samice komara ogrzewają się pod wpływem krwi, którą wysysają, a nie z powodu przewodzenia ciepła z dłoni, na której siedzą, uczeni poddali badaniom także samce. Okazało się, że kiedy samiec komara ląduje na dłoni, pozostaje w temperaturze pokojowej, co dowodzi, że to właśnie wysysanie krwi rozgrzewa ciało samicy.

Dzięki odwzorowaniu temperatury ciała komarzysty podczas wysysania krwi Claudio Lazzari i Chloé Lahondère wykazali, że wydała ona kropelkę moczu i krwi, aby się ochłodzić i uniknąć stresu spowodowanego przegrzaniem. Podobnie jak my czujemy chłód, gdy po wyjściu z ciepłej

kąpieli na powierzchni naszej skóry utrzymują się kropelki wody, tak samo dzięki wodzie parującej z kropelki płynu wydalanego przez komarzącę jej także robi się chłodniej. Samica komara wykorzystuje ochładzanie się dzięki parowaniu w taki sam sposób jak my, kiedy się pocimy. W dodatku w sytuacji gdy niektóre części jej ciała są cieplejsze niż inne, ustanawia ona gradient temperatury sprzyjający przepływowaniu ciepła z bardziej rozgrzanych miejsc jej ciała do chłodniejszych.

Podawać schłodzone

Komary nie są jedynymi owadami, które ochładzają się, wydalając kropelki płynu. Podczas lotu w gorące dni pszczoła miodna wypłwuje nektar ze swojego otworu gębowego, aby zapobiec przegrzewaniu się nóg, dzięki czemu może latać w temperaturze do 46 stopni C. Niektóre ćmy wypłwują płyn na swoje trąbki, aby ochłodzić głowę, podczas gdy mszyce (wróg każdego hodowcy pomidorów) wydalają ze swojego odwłoka spadź – płyn bogaty w cukier – aby ochłodzić swoje ciało.

Zanim zostawimy komary w spokoju, tylko jeszcze jedno pytanie, jak zwykł mawiać porucznik Columbo z telewizyjnego serialu z lat siedemdziesiątych. Dlaczego samica komara, aby się ochłodzić, w wydzielanych kropelkach płynu pozbywa się nie tylko moczu, ale także krwi? Przecież marnuje w ten sposób pożywienie i musi dłużej wysysać krew ofiary, narażając w ten sposób swoje życie. Lazzari sądzi, że dzięki przymieszce krwi komar może wydalać za każdym razem większą kroplę. A ponieważ większe krople mają większą powierzchnię, przyspiesza to proces parowania, a zatem chłodzenia. Wydalanie krwi oznacza również, że komar waży mniej i może w razie czego latać szybciej, gdyby coś poszło nie

tak. Zagadka rozwiązana. Jednak nie każdy gatunek komara pozbywa się w ten sposób kropelek krwi. Claudio Lazzari i Chloé Lahondère odkryli, że *Aedes aegypti*, gatunek roznoszący żółtą febrę, dengę i gorączkę zika, nie przejawia żadnych oznak wydalania krwi. Zamiast się ochładzać podczas posiłku, komary tego gatunku wytwarzają cząsteczki, zwane proteinami szoku cieplnego, służące do naprawy ewentualnych zniszczeń w komórkach, które się przegrzały.

Ale w przypadku *Anopheles stephensi*, dzięki fizyce przepływu ciepła, samice jednego z najbardziej niebezpiecznych gatunków komarów mogą czuć się bezpieczniej, wysysając naszą krew. I chociaż wiedza tego rodzaju nie doprowadzi nas do znalezienia lekarstwa na malarię, stanowi kolejny krok na drodze do poznania mechanizmu roznoszenia tej choroby przez komary. To cenne osiągnięcie, ale Lazzari – w odróżnieniu od Rattanarithikula – prawdę mówiąc, nie lubi komarów. Przyznaje, że jeśli nie jest w swoim laboratorium, po prostu ich nienawidzi. „Ale jako naukowiec – dodaje – uważam, że komary są fascynujące”.

Żądło w ognie

Ciepło jest ważne nie tylko tam, gdzie chodzi o utrzymanie właściwej temperatury. Niektóre zwierzęta, od japońskich pszczół po kalifornijskie wiewiórki, wykorzystują tę formę przekazywania energii bardziej pomysłowo, aby bronić siebie albo swoje młode przed napastnikiem. Zacznijmy od pszczoły. Jej angielska nazwa (*bee*) znajduje się niemal na początku słownika, a fizycy niczego nie uwielbiają tak bardzo jak systematyczności. Jeśli nie liczyć równań. No i laboratoryjnych kitlów. No, ale do rzeczy.

Życie ogromnego szerszenia japońskiego (*Vespa mandarinia japonica*) może się wydawać prawdziwą sielanką; nikt nie może mu zagrozić. Owad o długości 5 centymetrów, a więc wielkości mniej więcej małego palca naszej dłoni, jest wyposażony w żądło, którym corocznie zabija w Japonii od 30 do 50 osób. Jego zewnętrzna^[2] powłoka, czyli kutikula, o biegnących horyzontalnie połyskliwych żółtopomarańczowych i czarnych paskach, jest zbyt twarda, aby pszczoła mogła ją przebić swoim żądłem. Jednak szerszeń to nie tylko sama siła fizyczna. Ten olbrzym wypracował także bardzo sprytny sposób atakowania gniazd europejskich pszczół miodnych (*Apis mellifera*), sprowadzonych do Japonii ze względu na wysoką wydajność w produkcji miodu.

Najpierw ogromny szerszeń japoński wysyła szerszenia zwiadowcę, który ma namierzyć dobrze zapowiadające się gniazdo pszczół albo ul, a przy okazji dziabnąć kilka robotnic. Wysłannik swoimi potężnymi żuwaczkami (szczękami) urywa zabitym pszczołom głowy i nogi, po czym przynosi ich soczyste, ożywcze korpusy do własnego gniazda, aby nakarmić nimi larwy. Po kilku takich wyprawach, tam i z powrotem, zwiadowca wraca jeszcze raz, aby rozsiać na siedlisko pszczół feromony (jak pamiętamy, węże ogrodowce używają takich chemicznych sygnałów, aby ujawnić – albo zafałszować – swoją płęć). Inne szerszenie podchwytyją zapach i gromadzą się wokół ula. Najpierw polują indywidualnie, po czym, gdy zbiorą się przynajmniej trzy z nich, przygotowują się do ataku grupowego. Biolodzy, nie przebierając w słowach, całkiem trafnie nazywają tę fazę wspólnego ataku fazą rzezi.

Nazwa wydaje się stosowna – każdy szerszeń potrafi zabić około 40 europejskich pszczół na minutę. Atakując w grupie liczącej od 20 do 30 osobników, japońskie szerszenie mogą w ciągu trzech godzin zgładzić cały rój liczący nawet 30 tysięcy europejskich pszczół miodnych; niemniej, jeśli chodzi o działanie zespołowe z tak morderczym zamiarem, w świecie

szerszeni stanowią wyjątek. Następnie przychodzi faza okupacji. Szerszenie przejmują ul i w ciągu 10 dni całkowicie ogołacają „spizarnię” złożoną z osieroconych, bezbronnych larw pszczół europejskich i poczwerek (osobników nie w pełni przekształconych jeszcze w dorosłe), które zabierają do swojego gniazda, aby nakarmić nimi młode. Zadanie wykonane.

Istnieje jednak gatunek pszczół, które ewolucyjnie wykształciły sprytny sposób obrony przed szerszeniami. To japońska pszczoła miodna (*Apis cerana japonica*), która znacznie dłużej miała do czynienia z ogromnym szerszeniem japońskim niż jej europejskie kuzynki. Jej żądło także nie potrafi przebić zewnętrznego szkieletu szerszenia, ale wykorzystuje w walce przewagę liczebną, zwłaszcza gdy ma do czynienia z pierwszym samotnym zwiadowcą. Jak odkryli badacze Masato Ono, Masami Sasaki oraz ich koledzy z tokijskiego Uniwersytetu Tamagawa, japońska pszczoła miodna potrafi, dzięki wykorzystaniu praw fizyki oraz odrobiny fizjologii, zespołowo stawić czoło śmiertelnemu wrogowi. Decydującą rolę w tej walce odgrywa niewielka różnica dotycząca pewnego aspektu funkcjonowania organizmu owadów, coś, co w innych okolicznościach byłoby zupełnie bez znaczenia. Zachowując się w pewien sposób, japońskie pszczoły miodne stwarzają odpowiednie warunki, w których mogą wykorzystać jedyny skuteczny oręż, jaki mają w swoim arsenale, i pokonać szerszenia. Można powiedzieć, że są kowalami własnego losu.

W przypadku pojedynczego zwiadowcy walka przypomina pojedynek Dawida z Goliatem, z tą różnicą, że Dawidów jest pięciuset. Na zdjęciach, które ukazały się wraz z artykułem Ono w czasopiśmie „Nature”, pszczoły są niewiele większe od pomarańczowej głowy szerszenia. Są małe, ale mają pewną tajną broń równie potężną jak proca Dawida (nie licząc kamienia). Na początek, choć to jeszcze nie jest ich najsprytniejszy ruch, pszczoły wychwytyują feromonowy sygnał zwiadowcy „tu jest obiad” i zmieniają go

w sygnał wczesnego ostrzegania, traktując tę substancję chemiczną jako kairomon (sygnał, który służy zwierzęciu odbiorcy, ale szkodzi nadawcy). Kiedy jakiegoś jesiennego dnia dostrzegą i wyczują w okolicy zwiadowcę, około 100 robotnic japońskiej pszczoły miodnej gromadzi się wokół wejścia do gniazda. A kiedy gość się zbliży, pszczoły strażniczki podrywają się i potrząsają swoim odwłokiem, jak gdyby wymachiwały pięścią, starając się odstraszyć napastnika. Następnie potulnie wracają do środka. Zwiadowca, pewny swego, zabiera się do ataku, nie uświadamiając sobie, że to pułapka.

Gdy tylko szerszeń wpłynie do gniazda, wpada w zasadzkę. W tym czasie jakieś 1000 robotnic zdążyło porzucić swoje obowiązki przy plastrach, aby stanąć w obronie swojego domu. Około 500 z nich skupia się wokół bezradnego szerszenia, tworząc gęsto upakowaną, szczelną kulę pszczół, o średnicy zbliżonej do szerokości ludzkiej dłoni. Po jakichś 20 minutach tego złowrogiego uścisku pszczoły rozpraszają się, a szerszeń zwiadowca leży martwy obok dwu albo trzech zabitych robotnic. Pszczoły strażniczki odciągają zwłoki i wszelkie dowody podjętej przez szerszenia próby inwazji znikają bez śladu.

Biolodzy sądzili niegdyś, że japońskie pszczoły miodne po prostu zabijają szerszenia żądłami. Okazuje się jednak, że ich żądła są na to za słabe. Na szczęście ograniczenia dotyczą obu stron: pszczoły tak szybko skupiają się wokół szerszenia i otaczają go tak ściśle, że szerszeń także nie jest w stanie użyć żądła, bo nie ma na to czasu i może jedynie kąsać w samoobronie. A zatem w jaki sposób szerszenia znajdującego się we wnętrzu tej ogromnej kuli spotyka taki smutny los, jeśli nie zostaje zakłuty przez 500 żądeł? I jak to się dzieje, że pszczoły znajdujące się tuż obok szerszenia, nie licząc tych kilku, które zdołał zagryźć, potrafią przeżyć, jeśli warunki panujące we wnętrzu tej kuli są tak zabójcze?

Aby dowiedzieć się więcej, w 1995 roku Ono i jego koledzy zbadali

temperaturę panującą we wnętrzu kuli pszczół, posługując się kamerami termowizyjnymi, rejestrującymi promieniowanie podczerwone. Jak pokazały sporządzone przez nich mapy rozkładu temperatur, w centrum kuli panowało 47 stopni C. Na ilustracjach kula pszczół przypominała psychodeliczną głowę kalafiora, z plamami fluorescencyjnego różu i czerwieni, oznaczającymi najcieplejsze miejsca w morzu żółtych punkcików na fioletowym tle. Nawet około 100 pszczół, które w odpowiedzi na chemiczny sygnał szerszenia zwiadowcy zbierają się wokół wejścia do ula, ma wyższą temperaturę. Ich ciała widać jako pojedyncze żółte plamki z różowym środkiem okolonym czerwienią; temperatura tułowia (*thorax*) każdej z nich jest znacznie wyższa niż znajdujących się na zewnątrz gniazda, niepodekscytowanych robotnic.

Pochłonie cię kula

W jaki sposób pszczoły, które są zwierzętami ektotermicznymi i potrzebują zewnętrznych źródeł ciepła, rozgrzewają się? Stosują prostą metodę: wprawiają w wibracje mięśnie swojego korpusu, które generują nie tylko ruch, ale także ciepło (energię wewnętrzną). Możemy sami zaobserwować podobne zjawisko, jeśli wybierzemy się na przebieżkę w chłodny dzień. Po kilku minutach od startu bez wątpienia poczujemy, że jest nam cieplej i mamy ochotę ściągnąć wełnianą czapkę. Setki pszczół tworzących obronną kulę wytwarzają w sumie ogromną ilość ciepła. A ponieważ ich ciała – podobnie jak ciała węży ogrodników (o czerwonych bokach) w zimowej kryjówce – są gęsto upakowane, ciepło w sposób naturalny przechodzi od jednej pszczoły do drugiej, a następnie do ciała szerszenia, dzięki przewodzeniu, być może z odrobiną konwekcji i promieniowania

w niewielkich poduszkach powietrznych. Temperatura 47 stopni C, najwyższa, jaka panuje we wnętrzu kuli, równa się mniej więcej średniej temperaturze latem w kalifornijskiej Dolinie Śmierci. Dla człowieka to nieprzyjemna temperatura o 10 stopni wyższa od temperatury naszego ciała. Jeśli nasze systemy regulacji termicznej zawiodą i temperatura naszego ciała wzrośnie do 40 stopni C albo więcej, jesteśmy narażeni na atak serca i śmierć. Jednak dla pszczoł to także niezbyt wesoła sytuacja. Biolodzy wiedzą, że potrafią one radzić sobie z temperaturami do 48–50 stopni C, więc temperatura 47 stopni to niemal górna granica ich tolerancji. Nawet żyjąca na Saharze mrówka *Cataglyphis bicolor* – jedno z najlepiej przystosowanych do wysokich temperatur zwierząt na świecie – nie wytrzymuje temperatur wyższych niż 50 stopni C (zob. rozdział 6, z którego dowiemy się więcej na temat zdumiewających umiejętności tego owada w dziedzinie nawigacji). Dla wielkiego szerszenia japońskiego to już za wiele. Potrafi przeżyć w temperaturze najwyżej 44–46 stopni C. I właśnie ta niewielka różnica w zakresie tolerancji na wysokie temperatury daje pszczołom przewagę. Co oznacza, że kula złożona z japońskich pszczoł miodnych potrafi uśmiercić szerszenia dzięki prawom fizyki i fizjologii.

Różnica w zakresie tolerancji cieplnej między tymi gatunkami owadów powstała być może dlatego, że pszczoły potrafią wspólnie, jako kolonia, przetrwać zimę, wytwarzając ciepło i dzieląc się nim, aby zachować odpowiednią temperaturę. Z czasem być może ta umiejętność przyczyniła się do powstania ich wyższej tolerancji na ciepło. W odróżnieniu od pszczoł u szerszeni jedynie młode królowe przeżywają zimę. Pozostałe szerszenie żyją tylko jeden sezon. Umierają jesienią i pozostawiają samotną królową, która wiosną musi od podstaw założyć nową kolonię, składając swoje zapłodnione jaja.

Szerszeń nie tylko znajduje się w środku kuli złożonej z pszczoł, gdzie

jest mu za gorąco, ale w dodatku jest jeszcze otoczony przez dwutlenek węgla wydychany przez wszystkie pszczoły. Szerszeń na pewno się przegrzewa, a prawdopodobnie także się dusi, choć niewykluczone, że dodatkowa porcja dwutlenku węgla powoduje jedynie, że słabiej radzi sobie z wysoką temperaturą. Tak czy inaczej, po upływie około 20 minut pszczoły rozpraszają się i znikają, osiągnąwszy całkowite zwycięstwo.

Spółeczny wir

W przypadku wielkiego szerszenia japońskiego cała rzecz sprowadza się do prostej zasady: jeśli słabo znosisz gorąco, trzymaj się z dala od gniazda pszczoł. Ale dlaczego szerszeń w ogóle ryzykuje i napada na gniazda japońskich pszczoł miodnych, skoro może zostać upieczony żywcem? I dlaczego igra z tą nieprzyjemną ewentualnością jedynie jesienią? Odpowiedź, jak to się często dzieje w biologii, ma związek z reprodukcją. O tej porze roku szerszenie hodują larwy, które mają być następnym pokoleniem reproduktorów – nowe królowe i płodne samce. Owe larwy potrzebują więcej białka niż te ich siostry, które zamienią się w zwykłe robotnice szerszenia. A zatem robotnice opiekunki muszą dostarczyć larwom mnóstwa pożywienia najwyższej jakości. I z pewnością nie pomaga im to, że jesienią coraz trudniej o duże gąsienice i chrząszcze chwytane przez nie we wcześniejszych miesiącach. Dlatego szerszenie, które potrzebują teraz bardziej pożywnych substancji, uciekają się do bardziej ryzykownych sposobów zdobywania żywności, atakując kolonie japońskich pszczoł miodnych albo innych mniejszych szerszeni. Poza tym nie są z góry skazane na porażkę. Jeśli kilka szerszeni zdoła dotrzeć do pszczelej kolonii, zanim japońskie pszczoły miodne uśmiercą pierwszych zwiadowców, pszczołom

pozostaje jedynie ucieczka. Ocalają własne życie, ale pozostawiają w gnieździe larwy, które szerszenie mogą spokojnie zabrać do domu i nakarmić nimi swoje młode.

Strategia tworzenia przez japońskie pszczoły miodne obronnej kuli nie zawsze może sprostać swojemu zadaniu, nawet jeśli przypuszczalnie powstała ewolucyjnie w odpowiedzi na brutalną taktykę stosowaną przez wielkie szerszenie japońskie, atakujące zespołowo (jedyne znany gatunek szerszenia, który poluje stadnie na inne owady społeczne, takie jak pszczoły i osy). Ogromny szerszeń japoński, który jako samotny zwiadowca musi stoczyć walkę z 500 małymi dawidami, zwiększa swoje szanse, łącząc siły z innymi szerszeniami z gniazda i zmieniając się w 30 goliatów. Europejskie pszczoły miodne, które zanim ludzie przenieśli je do Japonii, nie musiały sobie radzić z takimi zespołowymi atakami, zdecydowanie nie dorównują japońskim kuzynkom w tworzeniu takich obronnych kul. Najlepsze, co potrafią, to kłuć szerszenia zwiadowcę żądłami i chociaż ich żądła są za słabe, aby przebić jego kutikulę, przy odrobinie szczęścia mogą uszkodzić powłoki między segmentami jego korpusu albo wokół stawów i skrzydeł. Jednak taka próba ataku żądłami oznacza, że nie mogą uformować wokół napastnika szczelnej kuli, co ogranicza ilość ciepła, jakie mogą wytworzyć, oraz ich zdolność od upieczenia go żywcem. Dla szerszeni zaś oznacza to, że są w stanie zbić się w stado i zniszczyć całą kolonię europejskich pszczół miodnych. Poza tym Ono i jego koledzy odkryli, że europejskie pszczoły nie reagują na feromonowe sygnały japońskiego szerszenia zwiadowcy. W ewolucyjnym wyścigu zbrojeń są znacznie w tyle za japońską pszczołą miodną w walce z ogromnym japońskim szerszeniem, natomiast japońska pszczoła miodna często okazuje się dla niego zbyt gorącym kąską.

Wymachiwanie ogonem

Jak widzieliśmy, węże ogrodowce, psy i komary stosują sztuczki odwołujące się do zjawisk fizycznych związanych z ciepłem, aby chronić się przed zmianą temperatury ciała; nie chcą zbyt się wychłodzić ani zbyt się rozgrzać. Japońskie pszczoły miodne z kolei wykorzystują ciepło do ochrony przed przerażającymi ukąszeniami ogromnego szerszenia japońskiego. Ale co można zrobić, jeśli twój przeciwnik wykorzystuje fizykę zjawisk cieplnych, żeby na ciebie zapolować? Wkrótce dowiemy się, w jaki sposób pewien skromny gryzoń stosuje klasyczną taktykę militarną i aby się obronić, stara się zwieść przeciwnika i wyprowadzić go w pole. Mowa o wiewiórkach. Nie o tych szarych (*Sciurus carolinensis*), jakie Ronald Reagan karmił na trawnikach Białego Domu w latach osiemdziesiątych XX wieku, ani nie o rudych wiewiórkach (*Sciurus vulgaris*) żyjących w Wielkiej Brytanii i uwiecznionych przez autorkę książek dla dzieci Beatrix Potter dzięki wiewiórcie o imieniu Orzeszko (Nutkin). Te ostatnie zostały już zresztą wyparte przez szare wiewiórki przywiezione zza Atlantyku przez bogatych wiktoriańskich właścicieli ziemskich, którzy koniecznie chcieli mieć jakieś „egzotyczne” stworzenia na terenie swoich posiadłości.

W odróżnieniu od żyjących na drzewach wiewiórek rudych i szarych nasza wiewiórka stoi mocno na ziemi, ściśle biorąc – ziemi kalifornijskiej, toteż nie będzie nagród za odgadnięcie, jak się ją potocznie nazywa. Kalifornijska wiewiórka ziemna (*Otospermophilus beecheyi*), albo susłouch plamkowany, występująca na terenie całego stanu, od którego wzięła swoją nazwę, a także w Oregonie i w stanie Waszyngton, kopie w ziemi nory i żyje w nich ze swoją rodziną. Kalifornijska wiewiórka – należąca do rodziny ponad 300 gatunków – ma cętkowane szaro-brązowe ciało i piaskowoszare podbrzusze. Jej ciemne oczy otaczają obwódki jasnego futerka, a jej uszy na

brzegach są zabarwione na czarno. Jej gęsty ogon, o długości 15 centymetrów, jest równie długi jak reszta ciała i odgrywa główną rolę w naszej opowieści. Albowiem to nieduże zwierzątko ma w zanadrzu, a raczej w swoim ogonie, zręczną sztuczkę związaną ze zjawiskami termicznymi.

Kalifornijska wiewiórka jest z natury domatorką. Kiedy już się wyprawia ze swojej nory w poszukiwaniu ziaren i niewielkich owadów, którymi się żywi, rzadko oddala się na odległość większą niż 25 metrów. Takie życie może wydawać się nudne, ale nasza wiewiórka wcale nie jest głupkiem. Po prostu dba o swoje bezpieczeństwo, ponieważ jest łakomym kąskiem dla orłów, szopów, lisów i borsuków. Jednak jej wrogiem numer jeden jest grzechotnik, który wręcz uwielbia pokrzepić się małą wiewiórką. Mimo to wojna między węzem a wiewiórką wcale nie jest tak jednostronna, jak mogłoby się wydawać.

Pełzaj i grzechocz

Grzechotnik, niemal obowiązkowy statysta w filmach kowbojskich, kiedy gasnąca fabuła wymaga nagłego zwrotu akcji, nie należy do gadów, z którymi warto zadzierać. Kiedy dostrzeże potencjalny łup – czy będzie to mysz, ptak czy kalifornijska wiewiórka ziemna – zakrada się bezszelestnie, starając się znaleźć jak najbliżej ofiary, po czym nagłym skokiem rzuca się na nią i zatapia w jej ciele swoje zęby. W tym samym momencie, na skutek skurczu gruczołów umieszczonych z tyłu głowy węża, przez jego kły do ciała nieszczęsnego zwierzęcia dostaje się śmiertelna trucizna. Jad paraliżuje zdobycz, atakując jej tkanki, i po kilku minutach zabija. Połknąwszy martwe zwierzę, od głowy poczynając, grzechotnik bezszelestnie odpełza w ustronne

miejsce, żeby spokojnie je strawić swoimi mocnymi sokami żołądkowymi.

Przedstawiciele 36 gatunków grzechotnika, żyjących w Ameryce Północnej i Południowej, zasługują na respekt także z naszej strony. Dla człowieka ukąszenie grzechotnika oznacza śmierć, co stanowi niedobłą wiadomość dla kowbojów oraz dla każdego, kto uważa, że to dobry pomysł złapać węża za ogon i zrobić sobie z nim *selfie*. Nie żartujemy: pewien Kalifornijczyk w 2015 roku postanowił spróbować tej sztuczki, ale wężowi wcale się to nie spodobało i nieszczęsny amator fotografii wylądował w szpitalu, co kosztowało go 150 tysięcy dolarów. W większości takich sytuacji, jeśli człowiek w ciągu dwóch godzin po ukąszeniu przez grzechotnika otrzyma surowicę, ma szansę przeżyć. Niemniej w sumie to ludzie są bardziej niebezpieczni dla tych węży niż one dla nas. Dotyczy to zwłaszcza tak zwanych grzechotnikowych rodeo – rzekomo zabawnych imprez organizowanych w stanach środkowego zachodu i na południu USA, podczas których widzowie chwytają, oglądają, zjadają i sprzedają te gady. Zagrożeniem dla grzechotników są także inne zwierzęta, od kruków i szopów po skunksy i łasice, które chętnie na nie polują, zwłaszcza na smaczne młode osobniki. To tego dochodzi jeszcze lancetogłów królewski (*Lampropeltis getula*), wąż dusiciel, który jest odporny na jad grzechotnika i potrafi połknąć swojego rywala w całości.

Aby się obronić przed tymi przeciwnikami, grzechotnik ma na ogonie 10 do 20 pustych pierścieni z twardej keratyny, rodzaju białka, które występuje także w ludzkich paznokciach. Skurczając mięśnie na końcu ogona – zwykle jaśniejszego niż reszta jego ciała – wąż wprawia w ruch pierścienie, które uderzając o siebie, wytwarzają charakterystyczny grzechot. To dźwięk ostrzegający drapieżniki, żeby trzymały się z dala, jeśli nie chcą się narazić na śmiertelne ukąszenie. Grzechot ma tak wielkie znaczenie w samoobronie węża, że zazwyczaj chroni on swój ogon, unosząc go podczas

ruchu do góry.

Wśliznąć się

Interesujący nas gatunek to grzechotnik pacyficzny (*Crotalus oreganus*), jeden z siedmiu gatunków tego węża żyjących w Kalifornii. Ma około metra długości, jest brązowy albo szary, z linią ciemniejszych plam okolonych jaśniejszą barwą, które swoim romboidalnym kształtem przypominają siatkę rajstop. Czy biorąc pod uwagę zabójczy jad węża, nie powinien on zwyciężyć w każdej konfrontacji z wiewiórką? Jednak na szczęście kalifornijska wiewiórka ziemna (susłouch) jest stworzeniem o wiele groźniejszym, niż na pierwszy rzut oka wygląda. Te 2 gatunki zwierząt walczą ze sobą od tak dawna – żyją obok siebie miliony lat, jeśli wierzyć odnalezionym szczątkom kopalnym – że niektóre kalifornijskie wiewiórki ziemne zyskały nawet odporność na jad grzechotnika. Samica wiewiórki czasami żuje jego zrzucaną skórę, po czym oblizuje siebie samą i swoje małe, aby w ten sposób ukryć swój naturalny zapach.

Jeśli kalifornijska wiewiórka ziemna spotka na swojej drodze grzechotnika, ma do dyspozycji cały arsenał środków obronnych, aby odstraszyć napastnika. Może na przykład szybkimi kopnięciami wzbijać piach w powietrze, prowokując węża do potrząsania swoją grzechotką. Takie plażowe popisy mogą wydawać się nierozsądne, ale drażniąc węża, wiewiórka próbuje wysondować, jak duży i jak aktywny jest jej przeciwnik. Poza tym gryzoń unosi do góry swój gęsty szarobrązowy ogon, ustawiając go w pozycji wertykalnej, po czym macha z boku na bok kilka razy na sekundę niczym ktoś, kto macha chusteczką na pożegnanie. Następnie zastyga bez ruchu, przygląda się przeciwnikowi, podchodzi krok bliżej i ponownie

wymachuje ogonem.

Jeśli przyjrzymy się filmom zamieszczonym *on-line*, możemy zobaczyć zdumiewające sceny z udziałem wiewiórek i grzechotników. Podczas jednego z takich pojedynków wiewiórka rzuca się na węża i wbija w niego zęby. Wąż kontratakuję, zmuszając wiewiórkę do odwrotu. Gryzoń ponownie atakuje gada i ostatecznie udaje mu się go uśmiercić. Jeden do zera dla wiewiórki. Na innym filmie widzimy zwycięstwo węża, który połyka całego gryzonia. W trzeciej walce siły są wyrównane i po długiej próbie sił wąż ustępuje i odpełza w dal. Remis, ale ze wskazaniem na wiewiórkę, skoro to przeciwnik ustąpił.

Badacze sądzili niegdyś, że kalifornijska wiewiórka ziemna potrzęsa ogonem, żeby ostrzec węża i inne wiewiórki. Znow uciekamy się do antropomorfizacji, ale gdyby wiewiórki umiały mówić, kalifornijska powiedziałaaby: Jestem wielka i widziałam cię. Dam ci popalić, jeśli się nie zmyjesz i nie poszukasz sobie obiadu gdzie indziej. Dzięki badaniom Aarona Rundusa z West Chester University w Pensylwanii, w USA, wiemy dziś, że w tym wymachiwaniu ogonem jest więcej, niż potrafi dostrzec oko. Wiewiórka ma bowiem pewien sekret. I wiecie co? Pewne prawidłowości fizyki, ustawiona walka oraz mechaniczna wiewiórka (ciekawe, co powiedziałaaby o tym Beatrix Potter) pomogły nam odkryć, co tak naprawdę się dzieje.

Czas próby

W 2007 roku Rundus, pracujący wówczas na Uniwersytecie Kalifornijskim w Davis, postanowił zorganizować coś na kształt ostatecznego pojedynku „Wiewiórka kontra grzechotnik”. Gdyby to był mecz zapaśniczy w stylu

wolnoamerykanki, wczuwając się w rolę mistrza ceremonii, moglibyśmy zawołać: „A teraaaaaz, w szaryyyym narożniku-u-u-u, aż z Winters, sto kilometrów na północny wschód od San Francisco, Kalifornijska Wiewiórka Ziemna! A w narożniku brązowym... Tak! Powitajcie Grzechotnika z kalifornijskiej Doliny Centralnej! Panie i panowie, szykujcie się na mecz!”. Tłumy szaleją.

Rundus nie napuścił jednak tych dwojga na siebie tak po prostu na środku laboratorium. To byłoby nienaukowe. Zbudował więc klatkę wielkości mniej więcej biurowej szafki na segregatory, przy czym dwie boczne ściany klatki były wykonane z metalowej siatki, a pozostałe z drewna. To było mieszkanie wiewiórki. Następnie zbudował większą komorę testową, wielkości mniej więcej niemowlęcego kojca. Grzechotnik nie dostał własnego domu: musiał się zadowolić siatkową klatką w kształcie piramidy, umieszczoną w rogu komory testowej. Zaczynamy.

Kiedy wiewiórka zadomowiła się już w swoim nowym mieszkanku, Rundus postawił jej klatkę tuż obok komory testowej i otworzył niewielkie drzwiczki łączące. Chciał zobaczyć, co się stanie, kiedy wiewiórka wejdzie do komory. Podobnie jak podczas niektórych pojedynków zapaśniczych, walka nie toczyła się jednak naprawdę. Wąż przez cały czas pozostawał bezpiecznie zamknięty – to była walka w klatce, ale nie taka, jaką możecie oglądać w telewizji. Mimo to wiewiórka widziała, słyszała i czuła węża. Podczas typowej konfrontacji ostrożnie podchodziła do gada, wymachując swoim gęstym ogonem; czasami próbowała wzbijać piach w powietrze, choć na podłodze nie było ani ziarenka. Każdy eksperyment trwał około 10 minut, po czym Rundus wycofywał wiewiórkę z areny.

Aby móc w spokoju przeanalizować przebieg wydarzeń, badacz nagrywał je kamerą. Zamiast jednak sięgnąć po zwykłą kamerę wideo, użył kamery termowizyjnej, rejestrującej promieniowanie podczerwone. Mogłoby się to

wydawać dziwne, jednak grzechotniki należą do podrodziny grzechotnikowatych wyposażonych w termoreceptory reagujące na fale podczerwone. Członkowie tej rodziny węży oprócz oczu, które odbierają światło widzialne, mają także parę wrażliwych na ciepło kanalików wychwytyjących fale podczerwone, niewidoczne dla większości zwierząt, w tym także dla ludzi (wkrótce dowiemy się więcej o owadach, które „słyszą” promieniowanie podczerwone). Te kanaliki, położone po obu stronach głowy węża w połowie drogi między oczami i nozdrzami, nieco poniżej oczu, to milimetrowej wielkości otwory w skórze prowadzące do pustej komory.

Niemniej ta komora nie jest całkiem pusta. Pośrodku każdej komory znajduje się cienka pionowa membrana. Promieniowanie podczerwone uderzające w tę błonę pobudza nerwy, które wysyłają sygnały do mózgu węża. Wielkość sygnału zależy od temperatury obiektu emitującego promieniowanie podczerwone, takiego jak choćby ogon wiewiórki – jeśli obiekt jest ciepły, sygnał jest silny, jeśli obiekt jest chłodny, sygnał jest słaby. Dzięki kanalikom wąż tworzy sobie termiczną mapę otoczenia. W połączeniu z danymi, jakie odbiera za pomocą oczu, informacje z kanalików wyposażają węża w niezwykle dokładne wyobrażenie o tym, co się dzieje wokół. Zupełnie jak gdyby obok „normalnej” kamery wideo miał wbudowaną kamerę rejestrującą promieniowanie podczerwone. Nie wiemy, jak wygląda świat postrzegany przez węża, ale zdolność wizualizacji ciepłych przedmiotów na pewno stanowi przydatną umiejętność, zwłaszcza nocą, gdy zwierzęta posiadające zwykły organ wzroku nie widzą za wiele. Wyposażony w swoje dane termolokacyjne grzechotnik może niezauważony zacząć się na swoją ofiarę. To godna uwagi, choć niezbyt sympatyczna jego cecha.

Sygnalizowanie niebezpieczeństwa

Pamiętajmy, że kalifornijska wiewiórka ziemna toczyła taki pojedynek zapaśniczy już wielokrotnie i doskonale zdaje sobie sprawę z tego, że wąż ma tajną broń, dzięki której potrafi wyczuwać ciepło. Opracowała więc sprytną odpowiedź. Badania Rundusa wykazały, że kiedy wiewiórka spotyka w klatce grzechotnika i wymachuje ogonem, na zarejestrowanym przez kamerę obrazie termicznym puszyste zakończenie jej ciała zmienia barwę od fioletu (23 stopnie C) do czerwieni (25 stopni C). Wyższa temperatura oznacza, że długość fali promieniowania podczerwonego emitowanego przez ogon wiewiórki ulega skróceniu, a jednocześnie zwiększa się ilość tego promieniowania. I to właśnie rejestruje kamera. Wydaje się, że gryzoń podnosi temperaturę swojego ogona o 2–3 stopnie C powyżej temperatury ciała, wysyłając do ogona więcej krwi.

Wiewiórka wie, że wąż wyposażony w niezwykle kanaliki wyczuje, iż dzieje się coś dziwnego, dlatego z rozmysłem stara się zmylić przeciwnika, wysyłając ze swojego ogona silny sygnał promieniowania podczerwonego. To doskonały kontratak. Grzechotniki pamiętają, że wiewiórka wymachująca ogonem może oznaczać kłopoty – nikt nie chce zostać zagryziony na śmierć – dlatego informacja o gorącym ogonie skłania węża do defensywnych zachowań.

Skąd mamy pewność, że wiewiórka wykonuje sztuczkę z rozgrzanym ogonem z powodu grzechotnika? Może rozgrzewa swój ogon po prostu dlatego, że tak jej się podoba. Aby to sprawdzić, Rundus zaaranżował w klatce inną walkę, tym razem pojedynek kalifornijskiej wiewiórki ziemnej z wężem *Pituophis catenifer catenifer* z rodziny połozowatych. Te niejadowite węże, występujące w południowo-wschodnich rejonach Stanów Zjednoczonych, wyglądem przypominają grzechotnika – są piaskowej barwy

z brązowo-czarnymi plamami – ale ich głowa jest bardziej zaokrąglona i całe ciało nieco dłuższe. Poza tym, podobnie jak grzechotniki, także lubią się posilić małą wiewiórką. Różnica polega jednak na tym, że niejadowity wąż nie ma kanalików wrażliwych na podczerwień. Nie potrafi wyczuwać promieniowania podczerwonego i nie tworzy termicznej mapy otoczenia. Jak zaobserwował Rundus, wiewiórka na widok węża tego gatunku także unosi ogon, aby wydawać się większa, ale go nie rozgrzewa. Krótko mówiąc, wiewiórka rozgrzewa ogon tylko wtedy, gdy w pobliżu widzi grzechotnika, czyli węża czulego na promieniowanie podczerwone.

Czmychnąć w podskokach

A zatem wiewiórka zmienia swoje zachowanie w zależności od tego, jakiego rodzaju węża spotka na swej drodze: dla grzechotnika ma ogon gorący, dla innych gatunków zimny. Spójrzmy jednak na tę sytuację z punktu widzenia grzechotnika. Skąd mamy pewność, że to „widok” dodatkowego promieniowania podczerwonego emanującego z ogona wiewiórki go zniechęca? Może dałby za wygraną i odpełził nawet wtedy, gdyby wiewiórka wymachiwała ogonem o tej samej temperaturze co reszta jej ciała. Rundus nie mógł poprosić wiewiórki, żeby powstrzymała się od rozgrzewania ogona. Sięgnął więc po najlepszą możliwą alternatywę i zbudował sztuczną wiewiórkę – rodzaj wypchanej wiewiórki, która w ogonie miała ukryte cylindryczne podgrzewacze patronowe. W przemyśle zwykle używa się tych urządzeń do ogrzewania rozmaitych instalacji, takich jak metalowe rury, a nie wiewiórki, toteż Rundus wzbudził spore zdumienie, kiedy wybrał się na zakupy. „Było dużo zainteresowania i śmiechu, kiedy firmy, w których je zamawiałem, dowiadywały się, do czego zamierzam użyć ich

podgrzewaczy” – wspomina.

Umieściwszy swoją mechaniczną wiewiórkę niedaleko smakołyków, jakie lubią węże – wyglądała jak prawdziwa wiewiórka broniąca swoich małych – Rundus wypuścił grzechotnika z klatki. Na widok biorobota z wyłączonymi podgrzewaczami wąż ruszał do ataku, unosząc i odchylając do tyłu głowę, gotowy zadać cios. Ale kiedy sztuczna wiewiórka miała włączone podgrzewacze, czyli udawała żywą wiewiórkę, która rozgrzewa ogon, pompując do niego dodatkową krew, grzechotnik był znacznie ostrożniejszy. Spędzał mniej czasu w komorze testowej i na ogół zostawał w swojej klatce. Grzechotał jak opętany i zwijał się w kłębek, zastygając w końcu z głową i szyją odchylną do tyłu, gotowy do ataku z uniesioną pionowo grzechotką, która wystawała ze zwojów jego ciała. Czyli prezentował klasyczne obronne manewry grzechotnika.

Co się dzieje w głowie węża, który widzi gryzonia emitującego silne promieniowanie podczerwone z machającego ogona? „To pytanie za milion dolarów” – przyznaje Rundus. Zdaniem badacza gorący ogon wiewiórki może zaburzać postrzeganie węża na dwa sposoby. Albo wprawia go w dezorientację, ze względu na podwyższony poziom aktywności podczerwonej, jaką gad odbiera w swoich kanalikach wyposażonych w receptory ciepła. Albo, jak mówiliśmy wcześniej – i to może być bardziej prawdopodobne – wiewiórka wymachująca gorącym ogonem wydaje się większa, zwłaszcza o zmroku albo nocą, gdy brakuje światła. To sygnał ostrzegający węża, że może go spotkać przykra niespodzianka.

Dzięki swojemu biorobotowi i ustawionym walkom w klatce Rundus dowiedział, że kalifornijska wiewiórka ziemna wie, co robić, gdy zobaczy polującego grzechotnika: zaczyna pompować krew w stronę ogona. Rozgrzany ogon, za sprawą zjawisk fizycznych związanych z promieniowaniem, zbija gada z tropu i zmusza go do odwrotu w obliczu tak

groźnego i zdecydowanego przeciwnika. Wąż z niebezpiecznego drapieżnika zamienia się w mięczaka. Ale czy w odpowiedzi grzechotnik nie rozwija jakiejś strategii kontrataku? Rundus sądzi, że to możliwe. „Słyszałem opowieści o tym, że wąż, zanim zajrzy do jamy w poszukiwaniu młodych, ocenia zachowanie wiewiórki – mówi. – Matka broniąca swoich dzieci będzie zachowywała się bardziej defensywnie niż samica bez młodych”. A zatem choć grzechotniki na ogół wolą unikać wiewiórek groźnie wymachujących ogonem, niewykluczone, że część z nich, być może w poszukiwaniu małych wiewiórek na śniadanie, potrafi przezwyciężyć swój lęk. Gra w węże i drabiny toczy się dalej.

Szał na punkcie chrząszczy

Pozostańmy na chwilę w Kalifornii. W tym stanie dzieje się znacznie więcej niż pustynne pojedynki wiewiórek i grzechotników. Jedziemy do Berkeley, niedaleko San Francisco, na California Memorial Stadium. Jest rok 1943, zwykły dzień w dziejach rozgrywek futbolu amerykańskiego. Miejscowi Golden Bears grają z USC Trojans, którzy ostatnio mają dobrą passę. Tłumy spodziewają się dobrej zabawy i w oczekiwaniu na początek meczu śmieją się i palą papierosy w kalifornijskim słońcu. W powietrzu unosi się zapach hot dogów, z trzeszczących głośników rozbrzmiewa głos spikera podgrzewającego atmosferę. Jego nawoływania rywalizują z zaśpiewem czirliderek. Nikt nie przejmuje się Uskokiem Hayward, która przebiega dokładnie pod stadionem i w każdym momencie może zapoczątkować trzęsienie ziemi. Niedźwiedzie (Bears) potrzebują zwycięstwa. Łatwo poznać, gdzie siedzą kibice zespołu – to morze błękitu i złota.

– Hola, lepiej skończ z tym – rozlega się w tłumie jakiś głos.

– Niby co? – wrzeszczy mężczyzna z tyłu.

– Strącasz mi popiół za kołnierz. Co z tobą? Coś nie tak? – Pierwszy facet ogląda się, wypowiadając te słowa. Papieros kołysze mu się w kąciku ust.

– Słucham? – Facet w rzędzie powyżej ma tak szerokie ramiona, że koszula niemal pęka mu w szwach.

Mężczyźni siedzący obok odsuwają się trochę.

– Ał! – rozlega się kolejny głos – Rany, patrzcie na to! – Ktoś w uniesionej dłoni, między kciukiem i palcem wskazującym trzyma coś małego i czarnego.– Ten mały s...syn ugryzł mnie w rękę.

Podczas futbolowych rozgrywek w XX wieku niewątpliwie padały soczyste słowa, ale na usprawiedliwienie ostatniego mężczyzny można powiedzieć, że był w stresie. Wszędzie wokół niego widzowie nerwowymi gestami starali się odpędzić latających intruzów, a 20 tysięcy zapalonych papierosów kołysało się niebezpiecznie blisko twarzy sąsiadów.

Co właściwie się działo podczas tej nieco udramatyzowanej sceny? Agresorzy należeli do dwu gatunków chrząszcza, *Melanophila consputa* i *Melanophila acuminata* (ciemnik czarny, z rodziny bogatkowatych), które rojnie zjawily się na stadionie, przyleciawszy z pobliskich wzgórz porośniętych lasem sosnowym. Żuki zwykle nie atakują ludzi, zwłaszcza masowo. Czy były niezadowolone z wyniku?

Odpowiedź jest niemal równie niezwykła jak samo zdarzenie: winne były drzewa. Drzewa i... oczywiście prawa fizyki. Naprawdę nie sposób się od tych ostatnich uwolnić. W pewnym sensie żuki działały w samoobronie. Jednak ich gniew nie był zwrócony przeciwko wielbicielom futbolu, których przypuszczalnie gryzły w poszukiwaniu pożywienia albo w reakcji na próby rozgniecenia, ale przeciwko drzewom. Aby ochronić swoje larwy przed tym raczej mało prawdopodobnym źródłem ataku, wspomniane chrząszcze wypracowały sobie dość niezwykły sposób życia. Drzewa bowiem, jak się

okazuje, choć nie słyną ze swoich agresywnych zachowań, uwięły się na młode przyszłe żuki. Zresztą drzewa także mogłyby powiedzieć, że działają w samoobronie, ponieważ larwy żuków starają się przegryźć przez ich pnie. Drzewa mają do dyspozycji kilka możliwych zachowań: wydzielają soki i żywicę albo starają się, aby ich komórki dzieliły się w przyspieszonym tempie. „Te niewielkie larwy, których normalnie nie sposób dostrzec gołym okiem, ulegają zgnieceniowi w warstwie komórek dzielącego się kambium i ostatecznie giną” – wyjaśnia Helmut Schmitz z Uniwersytetu w Bonn, w Niemczech, ekspert w dziedzinie życia tych żuków. W starciu z larwami kora drzew okazuje się silniejsza.

Z punktu widzenia chrząszcza jedyne dobre drzewo to martwe drzewo. Drzewa, które są żywe, bronią się, martwe drzewa nie mogą odpłacić pięknym za nadobne. Ale w jaki sposób owad o długości zaledwie jednego centymetra może zabić drzewo wysokie na wiele metrów? Aby się tego dowiedzieć, musimy przyjrzeć się ukrytej broni owada. Chrząszcze z rodzaju *Melanophila* żyją na każdym kontynencie oprócz Antarktyki i Australii. Australijska odmiana tego żuka, *Merimna atrata*, kieruje się tą samą strategią przetrwania. Ponieważ chrząszcze z rodzaju *Melanophila* oraz *Merimna atrata* należą do tej samej rodziny bogatkowatych (*Buprestidae*), można się spodziewać, że chrząszcze ogniolubne (pirofilne) także będą miały jasne opalizujące barwy, które zmieniają się w zależności od kąta, pod jakim na nie patrzymy; to coś jak bańka mydlana albo hologram. Jednak 11 gatunków z rodzaju *Melanophila* gdzieś po drodze utraciło swoją zdolność do opalizowania. Są czarne jak węgiel. Może nie są takie ładne, ale przynajmniej są bezpieczne przed zakusami zbieraczy owadów. Jednak nie dlatego zmieniły barwę. W końcu, w skali ewolucji, kolekcjonerzy pojawili się stosunkowo niedawno, nie mogli więc wpłynąć na jej bieg. Skromny wygląd żuków z gatunku *Merimna atrata*, skazujący je na rolę młodszych braci

i siostr w rodzinie bogatkowatych, stanowi dobry kamuflaż i chroni je przed okiem drapieżników takich jak ptaki i jaszczurki.

Rozpal mój ogień

Krótko mówiąc, to nie widok tych żuków jest zabójczy. Swoją barwę wykorzystują do ukrywania się, nie do ataku. A zatem w jaki sposób te czarne insekty wkurzają swoich potężnych przeciwników zwanych drzewami? Ściągając posiłki, nie inaczej. Chrząższe ogniolubne zwracają się w stronę natury i praw fizyki – szukając wsparcia, wykorzystują potęgę pioruna. Jednak, co może być trochę rozczarowujące, nasze owady nie wspinają się na każde drzewo, aby przymocować do szczytu metalowy pręt, po czym stanąć z boku i czekać na uderzenie gromu, chichocząc przy okazji niczym czarny charakter z opowieści o Jamesie Bondzie. Nie, po prostu pozwalają, żeby sama natura zrobiła, co do niej należy. Prędzej czy później piorun uderza i wywołuje pożar lasu, który powala drzewa na rozległym obszarze. Zresztą pożary powstają również z innych powodów, a chrząszcze nie są wybredne i korzystają także z tych okazji. Niezależnie jednak od przyczyny pożaru, kiedy już kora przeciwnika uległa nadpaleniu, żuki wprowadzają się i składają jaja w zniszczonym, bezbronny drewnie pod spodem. Rozwijające się larwy nie przejmują się zbytnio tym, że ich obiad jest przypalony, teraz przynajmniej drzewo nie stara się ich utopić ani zgnieść.

Jednak na tym nie koniec kłopotów. Jeśli ktoś, jak nasze żuki, nie ma instynktu podpalacza, znalezienie pożaru może być trudne. Choćby z jednego powodu. W lasach na północy, gdzie żyje wiele chrząszczy ogniolubnych, pożar zdarza się zaledwie co jakieś 50 do 200 lat, a to oznacza, że biedne

owady musiałyby podejmować bardzo długie podróże, aby znaleźć bezpieczny dom dla swoich młodych. W dodatku, nawet jeśli gdzieś się pali, żuki są aktywne za dnia, nie widzą więc poświaty płomieni na nocnym horyzoncie. Muszą także mieć pewność, że widoczne w oddali kłęby to naprawdę dym, a nie jakaś nisko wisząca szara chmura. Widok nie wystarcza i zapach nie wystarcza – jeśli wiatr wieje w złą stronę, dym powędruje w przeciwnym kierunku i żuki nigdy nie będą miały okazji go powąchać.

Nawet jeżeli chrząszczom z tego rodzaju uda się zlokalizować swój cel – obszar, gdzie dopala się pożar – nadal stoją wobec problemu. Miejsce, w którym pragną wylądować, nie może być zbyt gorące. Prawdopodobnie nie wyróżniają się wśród innych owadów w kwestii radzenia sobie z temperaturą. Według Schmitza mogą wytrzymać na powierzchni rozgrzanej do temperatury najwyżej 50–55 stopni C. Jednak taka temperatura, zbyt wysoka na bezpieczne lądowanie, jest za niska na to, aby tłące się drewno albo pola rozgrzanego popiołu emitowały w ciągu dnia poświatę, którą mogłyby dostrzec swoimi oczami.

Gorące namierzanie

Aby z powodzeniem zakończyć swoją reprodukcyjną misję, chrząszcze ogniolubne muszą znaleźć pożar i wylądować w miejscu, które nie zwęgli im odnoży. Oba te wyzwania mają coś wspólnego: ciepło. Podobnie jak każda rzecz o temperaturze wyższej od zera absolutnego, te miejsca emitują promieniowanie podczerwone i wszystko, czego żuki potrzebują, aby rozwiązać swoje problemy, to wykryć to promieniowanie. „Najważniejsze to mieć czujniki promieniowania podczerwonego, dzięki czemu można wykryć, czy gdzieś znajduje się gorący punkt czy nie” – mówi Schmitz. Jeśli ci się to

uda, nie wylądujesz na czymś, co stanowi leśny odpowiednik rozgrzanego palnika. A jednocześnie czujnik pomaga ci odnaleźć takie miejsce: kiedy żuk dostrzeże dym na horyzoncie, jego detektory podczerwieni mogą potwierdzić, że to dym płonącego ognia, a nie chmura.

Powiedzieliśmy: „wszystko, czego żuki potrzebują”, ale wykrywanie ciepła tłącego się ognia wcale nie jest łatwe, jeśli nie jesteśmy wystarczająco blisko. Wyobraźmy sobie, że w zimową chłodną noc wylegujemy się na baraniej skórze przed kominkiem, wygrzewając się w ciepłe żółtych języków ognia, które hipnotyzująco migoczą nad płonącymi polanami. Wszystko jest cudownie aż do chwili, gdy uświadamiamy sobie, że swojego drinka zostawiliśmy w kuchni. Już dochodząc do drzwi, czujemy, że całe ciepło zostało za nami. Płomienie nadal emitują promieniowanie podczerwone, ale jego energia rozkłada się na całą przestrzeń pomieszczenia, więc u drzwi jest mniej intensywne. Jeśli jego intensywność spada tak szybko po przejściu kilku metrów, jakie mamy szanse, że wyczujemy jakiegokolwiek ciepło płomienia palącego się na horyzoncie?

Nasze żuki muszą więc mieć lepszy system wykrywania promieniowania podczerwonego niż ten, który oferuje ludzka skóra. Wszystkie owady są wyposażone w receptory ciepła, znajdujące się na zakończeniach czułków, które – podobnie jak termoreceptory w naszej skórze – wykrywają jedynie promieniowanie podczerwone o wysokiej intensywności. Chrzążcze ogniolubne mają jednak drugi, znacznie bardziej wyrafinowany zestaw receptorów, położonych niedaleko bioder środkowej pary odnóży, tuż pod skrzydełkami. Te detektory są dobre, ale z jakiej odległości można za ich pomocą wykryć ogień? Aby odpowiedzieć na to pytanie, Schmitz i jego kolega Herbert Bousack z Peter Grünberg Institute w Forschungszentrum Jülich, w Niemczech, zainteresowali się ogromnym pożarem, jaki szalał w zbiornikach ropy w Kalifornii w latach dwudziestych XX wieku. Wyniki

tych prawdziwie detektywistycznych dociekań, opublikowane w 2012 roku, okazały się niemal równie zdumiewające jak niezwykle umiejętności żuków w zakresie wykrywania ciepła. Starając się odtworzyć dzieje tamtego pożaru, uczeni przeprowadzili szeroko zakrojone badania: zbierali informacje u miejscowych władz, w lokalnych gazetach i wśród pracowników Sequoia National Park.

Co właściwie jest takiego specjalnego w starym pożarze rafinerii w Stanach Zjednoczonych, mniej więcej po drugiej stronie globu, jeśli patrzeć na to z punktu widzenia Niemiec? I czego brakuje współczesnym pożarom lasów? Z pewnością najprostszy sposób określenia, z jakiej odległości żuk potrafi wykryć ogień, polegałby na przymocowaniu mu do grzbietu transmitera i prześledzeniu trasy lotu. Jednak żuki mają zaledwie centymetr długości, a my nie zbudowaliśmy jeszcze tak małego urządzenia, aby owad mógł unieść je na swoim grzbiecie. Poza tym zasięg lotu ciężko obciążonego i zmęczonego żuka przypuszczalnie byłby znacznie mniejszy niż dystans, z jakiego może on dostrzec pożar. Dlatego właśnie Schmitz i Bousack musieli myśleć lateralnie. Szukając odpowiedzi w archiwach, dowiedzieli się nieco więcej na temat pożaru, który po uderzeniu pioruna w zbiorniki szalał przez 3 dni w sierpniu 1923 roku i ściągnął w to miejsce „nieprzebrane chmary” żuków interesującego nas gatunku, choć pożar wybuchł wiele kilometrów od jakiegokolwiek lasu.

Płonące zbiorniki z ropą leżały kilka kilometrów na wschód od miasta Coalinga, w kalifornijskiej Dolnie Centralnej, gdzie jest zbyt sucho, by mogły tam rosnąć drzewa. Żuki musiały zatem przylecieć z najbliższych lasów: albo położonych w pobliżu góry San Benito, 25 kilometrów na północny zachód, albo u podnóża gór Sierra Nevada, 130 kilometrów na wschód. Analizy źródeł wykazały, że w lasach wokół góry San Benito nie było pożarów przez kilka lat, toteż wydawało się mało prawdopodobne, aby

mogły tam mieszkać hordy młodych żuków, natomiast w pobliżu Sierra Nevada odnotowano kilka poważnych pożarów w ciągu dwu poprzednich lat przed wybuchem pożaru zbiorników z ropą. A zatem wszystko wskazuje na to, że żuki przyleciały do pożaru ropy aż z lasów u podnóży Sierra Nevada, pokonując odległość 13 milionów razy większą od długości ich własnego ciała.

Żar, żar, żar

Ta historyczna praca detektywistyczna przyniosła odpowiedź częściową – chrząszcz ogniolubny może przypuszczalnie wyczuć pożar z odległości 130 kilometrów. Przyszła pora na odrobinę fizyki. Aby obliczyć ilość promieniowania podczerwonego emitowanego podczas pożaru zbiorników ropy w Coalinga, Bousack sięgnął po współczesne metody analizowania pożarów, podobne do metod stosowanych przez strażaków albo inspektorów zajmujących się ochroną przeciwpożarową, przy określaniu ilości ciepła, jaką pożar, który wybuchł w danym miejscu, może wysłać w stronę sąsiednich budynków. „Światło ognia było tak wielkie, że można było bez trudu przy nim czytać w mieście, w odległości 9 mil” – donosił reporter „Coalinga Daily Record”. I dodawał, że promienie strzelały w niebo na dziesiątki metrów.

Schmitz oblicza, że tuż obok płonącego ognia, którego temperatura sięgała 1000 stopni C, jego natężenie – ilość energii na metr kwadratowy na sekundę – wynosiło aż 140 000 W/m² (watów na metr kwadratowy). Ogrzewanie podłogowe rozkręcone na cały regulator ma natężenie zaledwie 100 W/m². Ale w odległości 130 kilometrów od pożaru, w lasach Sierra Nevada, promieniowanie podczerwone, podobnie jak w naszej opowieści o palącym się kominku, było znacznie mniej intensywne. Jego irradycja

byłaby jakieś 100 milionów razy słabsza niż u źródła (mówiąc ściśle, 0,13 miliwatów na metr kwadratowy). Minimalne fluktuacje temperatury otoczenia skutecznie zamaskowałyby tak niewielką ilość ciepła, co sprawia, że jej wykrycie stanowi nie lada wyczyn. Nawet zbudowane przez człowieka detektory podczerwieni, aby osiągnąć taki poziom precyzji, muszą być utrzymywane w temperaturze poniżej 0 C. Jednak chrząszcze z rodzaju *Melanophila* mają detektory, które są tak czułe, że teoretycznie, jak powiada Schmitz, byłyby w stanie wyczuć promieniowanie podczerwone w jego najmniejszej możliwej postaci – pojedynczego fotonu.

„Kiedy oglądamy świeże pogorzelsko po pożarze lasu, od czasu do czasu znajdujemy zwęglone insekty: chrząszcze, pająki i muchy, ale nigdy nie znaleźliśmy spalonego żuka z rodzaju *Melanophila* – mówi Schmitz. – Te zwierzęta potrafią podczas lotu zlokalizować miejsca o wysokiej temperaturze i uniknąć lądowania w niebezpiecznym obszarze”. Co w ich przypadku ma wiele sensu, ponieważ gdy tylko przybędą na miejsce, tuż po pożarze, muszą zająć się rozmnażaniem. Pokryte popiołem szczątki dopalającego się lasu, wśród czarnych kikutów pni, nie wyglądają romantycznie, ale dla tych żuków to idealne miejsce. Samice żwawo się krzątają, składając zapłodnione jaja pod korą świeżo spalonych drzew. Kiedy z jaj wylegną się larwy, będą mogły pożreć tyle martwego drewna, ile zapragną, bez obawy, że drzewo będzie się bronić. Następnego lata larwy przekształcą się w dorosłe żuki. Dorosłe osobniki z tego roku będą mogły posilić się w nagrodę ciałami innych owadów i małych kręgowców zabitych przez ogień. Schmitz widział, jak australijskie chrząszcze ogniolubne „karmią się spaloną jaszczurką, jakby to było jakieś barbeque”.

Odpowiedź leży w uchu

Aby wykryć ciepło o tak niskiej intensywności, chrząszcze z rodzaju *Melanophila* niemal „słyszą” promieniowanie podczerwone, wykorzystując włosowate mechanoreceptory położone wewnątrz niewielkich kulistych zagłębień wypełnionych płynem. „Mechanoreceptory to najbardziej czułe [receptory] w królestwie zwierząt – wyjaśnia Schmitz. – Potrafią wyczuwać ruchy w skali atomowej, rzędu nanometrów, a nawet poniżej nanometrów”. Nanometr to milionowa część milimetra (jeszcze trochę w dół skali, a znajdziemy się wewnątrz atomu). My także mamy mechanoreceptory – w uchu wewnętrznym, w którym znajduje się wypełniona płynem komora wyściełana przez sensoryczne komórki rzęsate. Wibracje fal dźwiękowych, które uderzają w membranę naszych bębenków, wędrują przez 3 kostki ucha środkowego i docierają do płynu w uchu wewnętrznym, gdzie ich energia zakrzywia włoski komórek rzęsatych. Komórki przetwarzają mechaniczny ruch tego ugięcia na sygnały elektryczne przekazywane przez układ nerwowy.

Na razie wystarczy o uszach. W jaki sposób żuki posługują się swoimi czujnikami podczerwieni? Każdy detektor składa się z kanalika długości 0,3 milimetra, szerokości 0,12 milimetra i głębokości 0,1 milimetra. Kanalik zawiera od 70 do 90 mikroskopijnych kopulek o średnicy 0,02 milimetra, połączonych razem niczym swego rodzaju soczewki złożonego oka owada. Kopułki zrobione są z kutykuli, tego samego materiału co zewnętrzny szkielet owada. Wewnątrz kopułki kropelka twardej kutykuli przechodzi w niewielką sferę. Niczym obraz z reklamy kuszącej do zakupu nadziewanej czekolady ta sfera jest twarda na zewnątrz i gąbczasta w środku. Niewielkie przestrzenie wewnątrz tej gąbczastej materii są wypełnione płynem, a w jej środku znajduje się zakończenie wrażliwej na ciśnienie komórki

sensorycznej. Kiedy promieniowanie podczerwone dociera do detektora, ogrzewa płyn, który rozszerza się i napiera na to zakończenie. W rezultacie komórka nerwowa wysyła sygnał elektryczny, który dociera do mózgu.

Wrażliwy typ

Na razie wszystko się zgadza, ale w jaki sposób żuk radzi sobie z maskującymi sygnał wysyłany przez ogień fluktuacjami temperatury albo szumem? W tym punkcie Schmitz robi się naprawdę podekscytowany – ma pod ręką kilka teorii wyjaśniających, w jaki sposób detektor może osiągnąć taką czułość. Albo, jak przypuszcza, żuk posługuje się metodą rezonansu stochastycznego, czyli wprowadza losowo dodatkowy szum, który interferuje z sygnałem ukrytym w istniejącym szumie i wzmacnia go na tyle, aby stał się wyczuwalny; albo wykorzystuje tak zwane aktywne wzmocnienie. Podczas lotu chrząszcz uderza skrzydłami z częstotliwością 100 razy na sekundę. Być może wykorzystuje ten ruch do wprawiania w wibracje sfer znajdujących się wewnątrz swoich kopulek wykrywających ciepło, przygotowując je do wychwytywania najmniejszych zmian w poziomie promieniowania podczerwonego. Być może właśnie dlatego detektory są umiejscowione tuż pod jego skrzydłami. Wzmocnienie oznaczałoby, że wystarczałyby tylko 1 albo 2 fotony podczerwieni docierające do sfery czujnika po jednej stronie owada, aby wywołać odpowiednią reakcję nerwu i pokazać żukowi, w którą stronę ma lecieć, by znaleźć źródło ciepła. To samo zjawisko występuje w systemie wzmacniającym w ślimaku u ludzi i u innych ssaków, który umożliwia wychwytywanie cichych dźwięków dzięki wprawianiu w wibracje włosków ucha wewnętrznego. Ostatnio badacze odkryli tego rodzaju aktywne wzmocnienie także u owadów; muszka *Drosophila* wykorzystuje je w swoich

„uszach” położonych na czułkach. Schmitz z kolei, pracujący w Niemczech, stara się wykazać, że aby „usłyszeć” promieniowanie podczerwone, żuki wykorzystują zjawisko aktywnego wzmocnienia.

Pod pewnymi względami Niemcy nie są jednak najlepszym miejscem do takich badań. Zgodnie z narodowym stereotypem tamtejsi strażacy okazali się tak skuteczni, że ogniolubne chrząszcze są dziś w Niemczech gatunkiem wymarłym; nie ma tam dość spalonych lasów. Dlatego żuki *Melanophila* nie są wielkimi fanami strażaków. Dla odmiany strażacy pracujący w innych krajach nie są wielbicielami tych owadów. Kiedy służby ratunkowe dogaszają ostatnie tłące się rejony pożaru lasu, żuki czasami dostają się do ich kombinezonów i boleśnie kęsają. Coś podobnego zdarzyło się właśnie w 1943 roku, podczas wspomnianego wcześniej meczu futbolu amerykańskiego. Nie wiemy, co mówili widzowie na trybunach, gdy żuki przypuściły atak, ale ten incydent z całą pewnością się wydarzył. Przyciągnięte żarem 20 tysięcy zapalonych papierosów ogromne chmary *Melanophila consputa* i *Melanophila acuminata* obległy stadion i pogryzły widzów, jak donosił w 1943 roku periodyk Amerykańskiego Towarzystwa Entomologicznego, „Journal of Economic Entomology”. Ale jeśli żuki są dziś skazane na życie w pobliżu ludzkich siedzib, czy ich receptory ciepła nie stały się zbyt czułe i bardziej im szkodzą, niż pomagają? Te owady pojawiały się rojnie nie tylko na meczach futbolowych, lecz także w okolicach pieców do wypalania cementu, pieców hutniczych, zakładów produkcji smoły i wokół gorących pojemników w cukrowniach. Blisko, ale żadnych cygar.

Podsumowanie ciepła

Czas na podsumowanie. Wąż ogrodowiec, pies i komar wykorzystują

zjawiska fizyki cieplnej, żeby się ogrzać, otrząsnąć mokrą sierść albo wydalić krople krwi, aby zachować temperaturę, która najlepiej służy funkcjonowaniu ich organizmu. Japońska pszczoła miodna, kalifornijska wiewiórka ziemna i żuki szukające pożarów posuwają się o krok dalej i wykorzystują ciepło do tego, aby bronić siebie albo swoje młode przed szerszeniami, grzechotnikami albo drzewami. Grzechotnik „widzi” ciepło, podczas gdy żuk je „słyszy” po to, by się dowiedzieć więcej na temat otoczenia.

Wiemy, że ciepło stanowi formę przekazywania energii oraz że temperatura jest miarą intensywności nieustannego ruchu atomów lub cząsteczek danego przedmiotu, co pokazuje również zdolność tego przedmiotu do przekazywania ciepła. Transfer ciepła może przebiegać za pomocą przewodzenia (wtedy gdy węże ogrodowce starają się przytulać do siebie), konwekcji (jak w przypadku wody w wannie albo pęcherzyków powietrza uwieczonych między włosami futra) oraz promieniowania (jak wtedy gdy Słońce wysyła w przestrzeń kosmiczną energię pod postacią fal elektromagnetycznych). Żuki szukające pożarów wykrywają takie promieniowanie, wyczuwając siłę, jaka pojawia się, gdy rozgrzany płyn rozszerza się i napiera na mikroskopijne receptory. W następnym rozdziale dowiemy się więcej o siłach, w tym o pewnym smoku obdarzonym niezwykle delikatną budową, jaszczurkach, które dobrze radzą sobie na wysokościach, krewetkach, które potrafią rozpychać się wzmocnionymi łokciami, i komarach, które wiedzą, jak uniknąć niechybnej śmierci.

[1] Tradycyjna gra planszowa (wszystkie przypisy pochodzą od tłumacza).

[2] Chitynowa.

ROZDZIAŁ 2



SIŁY WIELKIE PCHNIĘCIE

Lekkogłowy smok – Komary omijają krople deszczu – Krewetka, która potrafi walnąć znacznie cięższego przeciwnika – Najszybsze zwierzęta świata – Zwinna mrówka – Jaszczurka, która myśli, że jest Spidermanem

Dalej smoki

Każdy miłośnik kotów wie, że kiedy jego ulubieniec, schowawszy pazurki, obraca się na grzbiet i odsłania brzuszek, najwyraźniej zachęcając, aby pogłaskać jego miękkie futerko, wcale niekoniecznie to właśnie ma na myśli. W jednej sekundzie gładzisz miękki puch, słysząc rozkoszne mruczenie jego właściciela, w następnej 18 pazurów, ostrych jak szpilki, boleśnie zahacza twoją skórę, kiedy pospiesznie usiłujesz cofnąć dłoń. A jeśli nie dopisze ci szczęście, kot potraktuje cię jeszcze zębami, wbijając mocno w twoją rękę swoje długie kły.

A teraz sobie wyobraź, jak byś się poczuł, gdyby tym zwierzęciem nie był milutki, sześciokilogramowy kiciuś, ale ważący 80 kilogramów waran z Komodo (*Varanus komodoensis*), który ciężko człapie w twoją stronę przez polanę w azjatyckiej dżungli, kołysząc z boku na bok głową, i swoim rozwidlonym jęzorem „smakuje” twój zapach unoszący się w powietrzu. Na szczęście dla większości z nas to mało prawdopodobny scenariusz, ale dla mieszkańców indonezyjskich wysp Komodo, Rinca, Flores, Gili Motang czy Gili Dasami to niebezpieczeństwo jest całkiem realne. Chociaż te zagrożone wyginięciem gady są ostrożne i nie szukają kontaktu z ludźmi, czasami potrafią zniemacka zaatakować. Nie stronią nawet od kanibalizmu i zjadają młode własnego gatunku, jeśli uda im się złapać nieszczęśnika, który nie zdążył się schować na drzewie.

A zatem smok z Komodo^[3] to postać z nocnego koszmaru. Ten potwór – albo jak biologowie wolą go nazywać, waran – zamieszkuje sawannę i nisko położone tropikalne lasy. Gad o długości 2,5 metra jest największą żyjącą na świecie jaszczurką i swoją budową przypomina nisko zawieszoną Godzillę.

Kiedy idzie, jego pokryte uzbrojoną łuską, mocno zbudowane ciało z długim ogonem, kłocowatymi nogami i łokciami sterczącymi na boki sprawia wrażenie, jak gdyby robił pompki. Naprawdę ma w sobie coś ze smoka. Potrafi nawet, jak smok, stanąć na dwu tylnych łapach. Jak pisał Douglas Adams, autor *Autostopem przez Galaktykę*, w swojej książce z 1990 roku *Ostatnia okazja, by ujrzeć*, napisanej wspólnie z przyrodnikiem Markiem Carwardine'em, niewykluczone, że to waran z Komodo był niegdyś przyczyną ostrzeżeń „dalej smoki”, jakie podróżnicy umieszczali na mapach przedstawiających krainy, do których woleli się nie zapuszczać. Być może szybki ruch żółtego języka tego stwora wprowadzał w błąd dawnych eksploratorów i skłaniał do snucia przypuszczeń, że gad zije ogniem. Niemniej waran z Komodo rzeczywiście ma w swoim pysku groźną broń – niezwykle cuchnący oddech. Jego paszcza to prawdziwy raj dla bakterii. Przyjrzyjmy się zatem, co może być gorsze: oddech warana czy jego ukąszenie.

Kiedy Stephen Wroe z Uniwersytetu Nowej Południowej Walii, w Australii, badał siłę szczęk warana z Komodo, razem ze swoimi współpracownikami dokonał niezwykłego odkrycia. Zanim jednak przejdziemy do rzeczy, należy dodać, że Wroe tak naprawdę wcale nie interesuje się waranem z Komodo, tylko gadem 2 razy większym, megalanią (*Varanus priscus*), pięciometrową jaszczurką z rodziny waranowatych, która jakieś 100 tysięcy lat temu przemierzała tereny Australii. Waran z Komodo jest przypuszczalnie najbliższym żyjącym krewnym tamtego olbrzyma. Wroe, obecnie pracujący na australijskim Uniwersytecie Nowej Anglii, ma nadzieję, że dzięki badaniom żyjących gadów zdoła dowiedzieć się nieco więcej o diecie megalanii.

Aby zbadać siłę ukąszenia warana i nie stracić przy okazji ręki, Wroe, Domenic D'Amore oraz ich koledzy starali się namówić 10 waranów,

żyjących w ogrodach zoologicznych w różnych miejscach świata, do zaciskania szczęk na kawałku mięsa przyczepionym do dwu aluminiowych drągów. Nie były to jednak jakieś zwykłe pręty, ale metalowe tyczki, które pokryto gumą, aby uchronić zwierzęta przed zniszczeniem zębów. Wewnątrz tyczek ukryto czujniki służące do pomiaru odkształcenia (tensometry), które rejestrowały napięcie elektryczne, gdy metal ugiął się pod naciskiem działającego obciążenia. Odkształcenie – miara deformacji przedmiotu w stosunku do jego długości – zależy zarówno od sztywności danego obiektu, jak i naprężenia, czyli wielkości działającej siły podzielonej przez powierzchnię, na jaką działa. Po zakończeniu prób badacze przełożyli zarejestrowane wartości napięcia elektrycznego na siłę ugryzienia, wykorzystując dokonane wcześniej pomiary obciążenia tyczki o znanej wartości.

Waran o najmocniejszych szczękach potrafił ugryźć z siłą 149 N (niutonów albo kgm/s^2 , więcej na ten temat dowiemy się później). Inne osobniki miały szczęki o nieco słabszym uchwycie. Ale domowy kotek, jakieś 20 razy lżejszy niż waran z Komodo, potrafi ugryźć z siłą 58 N, a zatem ten „intrygujący, seksowny, ikoniczny gad” wcale nie gryzie z siłą proporcjonalną do swojej masy. Niektórzy ludzie, ważący mniej więcej tyle samo co waran z Komodo, potrafią ugryźć z siłą 294 N. Z tego punktu widzenia ukąszenie warana z Komodo wydaje się mniej nieprzyjemne niż ugryzienie przez rugbystę czy gracza futbolu amerykańskiego. Gdyby liczyła się tylko siła jego ukąszenia, potyczka w dżungli sam na sam z waranem z Komodo nie byłaby czymś aż tak przerażającym.

Lekkie ukąszenie

Mimo dość słabego uścisku swoich szczęk waran z Komodo jest jedną z zaledwie dwu jaszczurek z rodziny waranowatych, które potrafią zabijać zwierzęta większe od siebie. Ulubionym pokarmem tego gada jest padlina, a więc ciało zwierzęcia, które już jest martwe. Kiedy jednak zdecyduje się zaatakować żywe stworzenie, poluje na sarny, świnie, ptaki, bezkręgowce (zwierzęta całkiem dosłownie pozbawione kręgosłupa), czasami na ludzi oraz na młode własnego gatunku, a nawet wodne bawoły ważące kilkaset kilogramów.

W jaki sposób waran z Komodo zabija tak ogromne zwierzęta, skoro dysponuje siłą ukąszenia niewiele większą niż domowy kotek? To byłaby jednak niespodzianka, gdyby twój kiciuś pojawił się nagle na progu, wlokąc za sobą świeżo zagryzioną świnie. Według Stephena Wroe, kiedy waran z Komodo już się zdecyduje zapolować, posługuje się metodą obezwładniania ofiary przypominającą ruch otwieracza do puszek. Przechyla głowę na bok, wbija zęby w gardło albo podbrzusze ofiary, po czym ponownie obraca głowę do wyjściowego położenia, swoimi 60 zębami wyrывая w ciele ofiary szarpaną ranę. W chwili gdy wbija zęby, jednocześnie cofa się i porusza głową, wykonując nogami ruch, jakby pedałowal do tyłu. Dzięki temu kompensuje marną siłę ugryzienia swoim masywnym korpusem i mocną szyją. A ponieważ zęby warana mają do 2,5 centymetra długości, ofiara traci mnóstwo krwi wypływającej przez wyszarpany otwór.

„W sumie więc chodzi o ruch rozpruwania i wyszarpywania – mówi Wroe. – Zważywszy na to, że waran ma bardzo ostre zęby, może spowodować mnóstwo zniszczeń. Na korzyść warana z Komodo przemawia także to, że nie potrzebuje szczególnie silnych mięśni szczęki ani ciężkiej, solidnej czaszki; przeciwko niemu – to, że nie jest zbyt dobrze przystosowany do niczego innego”.

Przewaga warana z Komodo nad domowym kotem w sztuce zabijania polega więc na stosowaniu metody „otwieracza do puszek” i potężnym ciele. Aby dowiedzieć się, w jakim stopniu mocne ciało rekompensuje siłę ugryzienia, Wroe i jego koledzy mierzyli siłę, z jaką badane zwierzęta ciągnęły, za pomocą mięśni głowy i szyi, kawałek wieprzowiny przymocowany do cyfrowego dynamometru. Największa siła, jaką odnotowano, gdy wieprzowina znajdowała się tuż nad ziemią, a dynamometr umieszczono 1,5 metra wyżej, wynosiła 337 N, a więc znacznie więcej niż siła samego ukąszenia, w przypadku której rekord wynosi niecałe 150 N. Waran z Komodo, kęsając, przekręcając, ciągnąc i szatkując, rozrywa ciało ofiary na kawałki, dlatego nie potrzebuje mocnej szczęki do rozgniatania kości jak choćby hiena (*Hyaena hyaena*), która potrafi gryźć z siłą 546 N.

Potworna siła

Jednak odkrycie, że pod względem morderczych zdolności waran z Komodo znacznie przewyższa małego domowego kota, nie oddaje należycie jego talentów. W jaki sposób stosowana przez niego metoda lokuje się na tle osiągnięć zwierząt o zbliżonych rozmiarach? Na wyspie Komodo warana nazywa się lądowym krokodylem. To nasuwające się podobieństwo zaintrygowało Stephena Wroe – uważa, że najbardziej oczywiste porównanie dla warana z Komodo stanowi inny gad, australijski krokodyl żyjący w słonej wodzie.

„Krokodyle mają znacznie solidniejszą czaszkę i mocniejsze mięśnie szczęk – mówi badacz. – Podczas polowania na dużo większą zdobycz krokodyl wbija zęby w ciało ofiary, po czym obraca się wokół własnej osi

i przekręca. Może generować i wytrzymywać działanie sił o szerokim zakresie kierunków, a więc jest znacznie bardziej ruchliwy i nieprzewidywalny”. Australijski gad działa też o wiele bardziej brutalnie, bezlitośnie miotając swoim nieszczęsnym łupem na wszystkie strony. Waran z Komodo, wyposażony w delikatną czaszkę, kąsa i obraca głowę na boki, a ciągnie tylko w jednym kierunku – do tyłu i na dół.

Waran z Komodo stosuje także inną technikę uśmiercania ofiary niż wielkie koty i pozostałe mięsożerne ssaki, które potężnymi szczękami wbijają z ogromną siłą zęby w ciało upolowanego stworzenia i tak długo ściskają jego tchawicę, aż zwierzę się udusi. Lwy potrafią ugryźć z siłą 1768 N, a więc znacznie większą niż waran z Komodo. Niemniej stosowana przez lwy technika zabijania powoduje, że same narażają się na ciosy kopyt ofiary. „Jeśli chcesz złamać kark afrykańskiego bawołu, musisz mieć bardzo silne szczęki i dużo odwagi – mówi Wroe. – To ryzykowna gra i lew często odnosi obrażenia”.

Waran z Komodo przypomina bardziej postać lwa z *Czarnoksiężnika z Oz*, który zagubił swoją odwagę. Gad jest bestią dość ostrożną i stara się zredukować ryzyko odniesienia obrażeń. „Potrafi szybko podbiec i zadać śmiertelny cios, po czym woli raczej się usunąć i poczekać, niż narażać własne życie, czekając, aż biedne zwierzę powoli się udusi – wyjaśnia Wroe. – Jeśli dopadłeś afrykańskiego bawołu, to może często potrwać z 10 minut albo więcej. Pozostaje ci czekać i mieć nadzieję, że jakiś większy brat ofiary nie nadbiegnie z odsieczą i nie kopnie cię w łeb”.

Wroe uważa, że podobną metodą jak waran z Komodo posługiwał się wymarły kot szablozębny, *Smilodon fatalis*. Te stworzenia także starały się zrekompensować stosunkowo niedużą siłę mięśni szczęk siłą innych części ciała – w ich przypadku mocnych mięśni, za pomocą których pochylały głowę ku dołowi. „Były przystosowane do zmagania się z ofiarą

i przytrzymywania stosunkowo dużych zwierząt z wykorzystaniem siły bardzo potężnych mięśni zaczaszkowych [położonych poza czaszką, a więc mięśni szyi i korpusu], a następnie zatapiania swoich kocich kłów w szyję roślinożerców przy użyciu mięśni szyi służących do pochylania głowy – mówi. – To z grubsza podobna strategia, przynajmniej pod tym względem, że w obu przypadkach napastnik zabija swoją ofiarę, doprowadzając do ogromnej utraty krwi”.

Trujący uśmiech

Jak gdyby nie wystarczało mu powodowanie śmiertelnego krwawienia, waran z Komodo ma w zapasie jeszcze jedną sztuczkę, dzięki której po zadaniu ciosu może spokojnie wycofać się w bezpieczne miejsce. Do 2006 roku biolodzy sądzili, że żyjące w pysku warana bakterie wywołują zakażenie jego ofiary posocznicą. Ale gdyby tak było, potrzeba by kilku dni, aby zakażenie się rozwinęło i spowodowało śmierć zwierzęcia, a wtedy drapieżca „przypuszczalnie nie mógłby spożywać owocu swojej pracy”. Kolega Stephena Wroe, Bryan Fry z Uniwersytetu w Queensland, odkrył, że waran z Komodo wstrzykuje w ciało ofiary trującą mieszankę zawierającą neurotoksyny wywołujące szok, a także substancję antykoagulacyjną, zapobiegającą krzepnięciu krwi ciekącej z rany. Dzięki tej podwójnej strategii, wykrwawiania i zatruwania, waran z Komodo potrafi zabijać zwierzęta o rozmiarach wodnego bawołu, a więc 4 razy większe od siebie samego: szybko zadaje śmiertelne rany, po czym wycofuje się i czeka na zgon zaatakowanego zwierzęcia. Zdecydowanie ukąszenie tego smoka pali jak ogień.

Jakkolwiek waran z Komodo stara się zrekompensować niewielką siłę

swojego ukąszenia skuteczną – i wyjątkową – techniką zadawania obrażeń, polegającą na obracaniu i pociąganiu, słabe szczęki gada rzeczywiście ograniczają jego możliwości. Gdyby – jak krokodyl – miał silniejsze szczęki i mocniejszą czaszkę, mógłby obalić ofiarę na ziemię, obracać się z nią wokół własnej osi i działać siłą we wszystkich kierunkach, a nie tylko ciągnąć na dół i do tyłu. Dlaczego więc waran z Komodo nie gryzie mocniej?

Aby odpowiedzieć na to pytanie, Stephen Wroe wraz z Karen Moreno i współpracownikami przeanalizowali budowę czaszki warana z Komodo metodą znaną jako metoda elementów skończonych. Inżynierowie posługują się nią podczas projektowania rozmaitych struktur, które mają wytrzymywać duże obciążenie, od mostów po elementy silników samochodowych, od samolotów po budynki. Metoda polega na rozkładaniu interesującego nas obiektu na proste kształty, takie jak kwadraty i trójkąty, a następnie rozwiązywaniu złożonych równań, opisujących, w jakiej mierze każdy element ulegnie odkształceniu pod wpływem obciążenia. Ponieważ jednostkowe kształty łączą się ze sobą, rezultaty uzyskane dla każdego z nich są włączane w obliczenia dotyczące obciążenia elementów sąsiednich.

Uzyskane w ten sposób rezultaty nie są idealne, ale okazują się całkiem zadowalające. Łatwiej rozwiązać równania dotyczące mnóstwa małych elementów i zsumować rezultaty, niż próbować policzyć wszystko za jednym zamachem. To tak, jakbyśmy w zabawie w znajdowanie różnic na obrazku podzielili rysunek na kwadraty, a następnie porównywali je ze sobą, zamiast z rozpaczą omiatać wzrokiem cały rysunek.

Wykorzystując jako wzór szkielet młodego samca o długości 1,6 metra, znajdujący się w muzeum, Wroe i Moreno zbudowali komputerowy model czaszki warana z Komodo, w którym rozłożyli czaszkę gada na około 1,2 miliona „cegiełek”. W swoim trójwymiarowym modelu (3D) przypisali następnie, posługując się szpitalnym tomografem komputerowym, każdej

„cegielce” jedną z czterech gęstości kości. Kość o większej gęstości jest mocniejsza i bardziej sztywna, podlega więc mniejszym odkształceniom pod wpływem działającej siły. Wroe przeanalizował także strukturę mięśni szczęk, aby wyliczyć działające siły i powierzchnie. Modelowanie metodą elementów skończonych ujawniło, że czaszka warana z Komodo jest mocna i masywna jedynie tam, gdzie to niezbędne. W czaszce tego gada są rejony o większej gęstości kości, usytuowane z tyłu, a także w innych miejscach stanowiących punkty podparcia, oraz puste przestrzenie w innych obszarach.

„Czaszka warana z Komodo jest w wysokim stopniu zoptymalizowana pod kątem bardzo określonych funkcji – wyjaśnia Wroe. – A to oznacza, że może być znacznie lżejsza dzięki wykorzystaniu mniejszej ilości kości oraz mięśni. Jego czaszka składa się z czegoś w rodzaju belek i rozpórek: pracuje na zasadzie kratownicy”.

Jak odkrył Wroe, czaszka warana z Komodo jest w stanie wytrzymać jednoczesne działanie dużych sił skierowanych na boki i ku tyłowi (w stronę ogona zwierzęcia), dzięki czemu ma idealną budowę ze względu na to, w jaki sposób waran stosuje swoje dość słabe ukąszenie w połączeniu z obrotem rozrywającym ciało i silnym pociągnięciem w tył. Struktura kości warana jest tak dobrze dostosowana do tego celu, że jego czaszka podlega mniejszym naprężeniom, gdy działa na nią siła ciągnięcia do tyłu w połączeniu z siłą ukąszenia zamiast jedynie siły ukąszenia. Chociaż ta budowa, minimalizująca ciężar zwierzęcia, ogranicza siłę szczęki warana z Komodo i jego możliwości powalania ofiary na ziemię, gad potrzebuje mniej energii, aby utrzymać głowę w pożądanym pozycji i nią poruszać, a to oznacza, że musi znaleźć mniej pożywienia.

Zaginione gady

A co z właściwym obiektem zainteresowań Stephena Wroe, dawno wymarłą megalanią? Podjęta przez badacza detektywistyczna analiza działających sił pokazuje, że jeśli ten wymarły gigant atakował swoją ofiarę w taki sam sposób jak jego współcześni krewni z Komodo, mógł zjadać takie zwierzęta jak diprotodon, ogromny torbacznik, który osiągał rozmiary dużego nosorożca. Megalania dawno wymarła, ale jaki los czeka jej kuzyna, warana z Komodo? O ile może się wydawać, że gadowi nic nie grozi, skoro tylko od czasu do czasu zdarza mu się zabić człowieka, oficjalnie według Międzynarodowej Unii Ochrony Przyrody zalicza się do gatunków „zagrożonych wyginięciem”. Na Ziemi żyje zaledwie 4 do 5 tysięcy tych zwierząt i przypuszczalnie zaledwie 350 z nich to samice zdolne wydawać na świat potomstwo, a ich naturalne środowisko znajduje się pod coraz większą presją. Jednak dzięki takiej klasyfikacji waran z Komodo dołączył do grona innych bohaterów *Ostatniej okazji, by ujrzeć*, takich jak palczak madagaskarski, inaczej aj-aj (*Daubentonia madagascariensis*), inia amazońska (*Inia geoffrensis*), kakapo (*Strigops habroptila*) i inne. Zasłużył także na drugą wizytę Bryana Frya, który razem ze współautorem książki Adamsa Markiem Carwardine’em przygotowywał film dokumentalny dla BBC, wyemitowany w 2009 roku. Zabójcza siła oddechu warana z Komodo nie jest równie mordercza jak jego ukąszenia, ale człowiek może ostatecznie okazać się o wiele groźniejszy dla warana niż oba rodzaje broni, pozostające w arsenale tego egzotycznego gada, razem wzięte.

Ciężki problem

Pora powiązać warana z Komodo z nazwiskiem fizyka, który połączył w jedno prawa rządzące zjawiskami siły i ruchu. Choć nie jesteśmy pewni, czy sir Isaac Newton (1642–1727) miał nieświeży oddech ani czy starał się kogoś ugryźć, Google informuje nas, że twórca powieści *science fiction* Robert Heinlein w książce *Między planetami*, z 1951 roku, nadał imię brytyjskiego geniusza fizyki jednemu ze smoków. Wprawdzie tanto stworzenie pochodziło z Wenus, nie z Komodo, ale wydaje się stosowne, że Newton występuje w powieści opisującej życie na innych planetach – oprócz wielu innych wielkich osiągnięć Newton pierwszy zrozumiał, dlaczego planety krążą wokół Słońca po elipsie, a nie po okręgu.

Isaac Newton był postacią niezwykłą. Już w szkole wprowadził kolegów w zdumienie, budując model wiatraka napędzanego siłą mięśni myszy biegnących w kołowrotku, oraz wywołał panikę, w czasach gdy nikt jeszcze nie myślał o UFO, przytracając latarnię do latawca. Później został pierwszą sławą świata nauki i bohaterem kilku wierszy, w tym napisanego przez Williama Wordswortha. W latach 1978–1988 wizerunek Newtona figurował na banknocie jednofuntowym, wyemitowanym przez Bank Anglii: na rysunku Newton siedział z książką na kolanach, obok teleskopu, a na ramiona opadały mu gęste loki siedemnastowiecznej peruki. Na jego cześć nazwano jednostkę siły – 1 niuton (1 N) to siła potrzebna do tego, aby masie 1 kilograma nadać przyspieszenie 1 metra na sekundę do kwadratu, czyli 1 kgm/s^2 .

Niektórzy powiedzieliby, że to raczej Księżyc, a nie latawce ani wiatraki napędzane przez myszy, chodził Newtonowi po głowie, gdy pewnego dnia 1666 roku, albo jakoś w pobliżu, zobaczył w Lincolnshire jabłko spadające z drzewa na ziemię. Newton musiał wtedy z powodu wybuchu epidemii opuścić mury uniwersytetu w Cambridge i znalazł schronienie w sadach wokół rodzinnego domu. Co najważniejsze jednak, uświadomił sobie, że

Księżyc i jabłko coś ze sobą łączy: jabłko spada na ziemię pod wpływem siły grawitacji, a więc tej samej siły, która utrzymuje Księżyc na orbicie wokół Ziemi i sprawia, że jej satelita nie odlatuje w dal po linii prostej. Ta siła maleje z kwadratem odległości od środka Ziemi; i właśnie ta zależność (siła odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości) jest po części odpowiedzialna za eliptyczny kształt orbity planet wokół Słońca.

Newton nie był pierwszym uczonym, który rozmyślał o grawitacji. Włoski astronom Galileo Galilei (1564–1642) spuszczał ponoć z krzywej wieży w Pizie kule wykonane z różnych materiałów, aby udowodnić, że wszystkie potrzebują tyle samo czasu, aby dotrzeć do ziemi, w sytuacji gdy siła ciężenia zwiększa ich prędkość od zera (jeśli opór powietrza jest nieznaczący). Ale przypuszczalnie to jedynie legenda, podobnie jak opowieść o jabłku, które spadło na głowę Newtona, kiedy uciął sobie drzemkę pod jabłką. Zdaniem historyków Newton raczej chodził po ogrodzie, snując rozmyślenia, a nie wylegiwał się na trawie, i raczej zobaczył jabłko spadające z drzewa, niż poczuł jego siłę. Ale taka wersja nie brzmi zbyt ekscytująco. William Stukeley (1687–1765), duchowny i pasjonat druidyzmu oraz pionier badań nad ośrodkiem starożytnych rytuałów w Stonehenge, w swoich *Memoirs of Sir Isaac Newton's Life* (1752) zanotował słowa wypowiedziane przez samego Newtona podczas rozmowy pod jakąś jabłką w Londynie w 1726 roku:

Czemu to jabłko zawsze spada pionowo na ziemię – pomyślał sobie. – Czemu nie porusza się na bok albo do góry, ale zawsze w stronę środka Ziemi? Z pewnością przyczyna jest taka, że Ziemia je przyciąga. Musi zatem istnieć w materii siła przyciągania i dlatego to jabłko spada pionowo, czyli w stronę środka. Jeśli materia przyciąga w ten sposób materię, musi to działać się w proporcji do jej ilości. A zatem jabłko przyciąga Ziemię, tak jak Ziemia przyciąga jabłko.

Zarówno jabłko, jak i Ziemia działają na siebie wzajemnie z pewną siłą. Nie zauważamy jednak siły, z jaką jabłko działa na Ziemię, ponieważ Ziemia jest tak wielka, że jabłko porusza ją zbyt nieznacznie, byśmy mogli to wykryć. Później dowiemy się nieco więcej na temat potęgi działania bardzo małych sił, gdy zobaczymy, w jaki sposób gekon może chodzić po suficie. Newton ujął tę zasadę wzajemnego oddziaływania ciał na siebie w swoim trzecim prawie ruchu i – podobnie jak dwa pozostałe prawa ruchu oraz powszechne prawo ciążenia – ogłosił je w swoim arcydziele z 1687 roku *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (dalej jako *Principia Mathematica*).

Jeśli chcecie, możecie przeczytać je w oryginale, po łacinie, na stronie internetowej uniwersytetu w Cambridge, ale pamiętajcie, że kiedy Newton je opublikował, pewien arystokrata zaproponował 500 funtów każdemu, kto potrafi wyjaśnić, o co w *Principiach...* chodzi. Dla osób, które wolą zwięzłe streszczenie we współczesnym języku: trzecie prawo ruchu Newtona powiada, że dla każdego działania istnieje równe mu działanie skierowane w przeciwnym kierunku. Innymi słowy, w stosunku do każdej siły działającej na jakiś przedmiot istnieje odpowiedź w postaci takiej samej siły zwróconej przeciwnie.

Ponieważ Newton nie tylko był wybitnym fizykiem, ale słynął także ze swojego geniuszu matematycznego, nie powinniśmy jednak opowiadać o sformułowanych przez niego prawach w nielogicznym porządku. A skoro zaczęliśmy od końca, od numeru trzeciego, lepiej będzie, jak omówimy je w odwrotnej kolejności. Ujmując to we współczesnym języku, drugie prawo Newtona powiada, że zmiana pędu jakiegoś ciała jest proporcjonalna do wielkości działającego na nie bodźca i następuje w kierunku, w jakim działa ten bodziec. Kiedy komentatorzy sportowi mówią, że jakiś zespół nabiera (roz)pędu (albo impetu), chcą powiedzieć, że idzie mu coraz lepiej i trudno go będzie zatrzymać. Wydaje się, że taka definicja sensownie zbliża się do

oficjalnej wersji używanej przez fizyków; pęd jakiegoś ciała to jego masa pomnożona przez prędkość (szybkość, z jaką się porusza w określonym kierunku). Natomiast popęd siły (albo impuls) to siła pomnożona przez czas jej działania. A zatem drugie prawo Newtona oznacza także, że siła działająca na jakiś przedmiot jest równa szybkości, z jaką jego pęd zmienia się. Jak dowiemy się wkrótce, dzięki stworzeniu zwanemu krewetką boksującą (albo krewetką modliszkową) (*Odontodactylus scyllarus*) oraz mrówkom z rodzaju *Odontomachus*, można o tym myśleć także w inny sposób. Zanim przejdziemy do prawa numer jeden, zobaczmy jednak, w jaki sposób komar korzysta z drugiego prawa Newtona, kiedy zaczyna padać.

Jak uniknąć zderzenia z kroplą

Czy komary potrafią latać podczas deszczu? To jedno z tych pytań, których nawet nie warto zadawać. Podobnie jak pytać, czy Albert Einstein był geniuszem. Komary doskonale radzą sobie w tropikach, gdzie leje prawie bez przerwy. A do tego potrzebują zbiorników wodnych, żeby się napić i składać w nich jaja. A zatem oczywiście potrafią latać podczas deszczu. Czy ktoś widział komary uciekające w popłochu na widok nadciągającej burzy?

Ale zaraz, chwileczkę. Krople deszczu spadają z nieba z prędkością prawie 10 m/s, czyli ponad 35 km/h. Najcięższe z nich ważą około 100 miligramów, 50 razy więcej niż wynosi masa ciała komara. Każda kropla jest mniej więcej tej samej wielkości co cały owad, ale przy tej samej masie pozostający bez ruchu komar, który został trafiony kroplą deszczu, znalazłby się mniej więcej w takiej samej sytuacji jak człowiek ważący 100 kilogramów w zderzeniu z pięciotonową ciężarówką. W ulewnym deszczu krople trafiają komara średnio co 25 sekund. Zatem latanie podczas

deszczu przypomina raczej grę *on-line* w przechodzenie przez jezdnię, na której co chwila musisz unikać zderzeń z bardzo ciężkimi pojazdami. Jak przeżyć w tej sytuacji?

To pytanie zaintrygowało Andrew Dickersona, którego spotkaliśmy wcześniej w rozdziale 1 przy okazji badań nad psami potrafiącymi błyskawicznie się osuszyć. Dickerson, pracujący w Georgia Institute of Technology, dzięki znajdującej się niedaleko siedzibie Centers for Disease Control and Prevention w Atlancie, nie mógł narzekać na brak komarów. W jaki sposób – zadał sobie pytanie – te delikatnie zbudowane owady radzą sobie z ciosami szybko poruszających się kropli deszczu? Nie chodziło przy tym jedynie o cczą ciekawość. Komary roznoszą pasożyty, które wywołują malarię, a więc im więcej dowiemy się o tym, jak sobie radzą, tym prędzej uda nam się coś zrobić, aby zapobiec rozprzestrzenianiu się choroby.

Praca Dickersona okazała się niewdzięczna. Pierwsze eksperymenty, jak sam wspominał, okazały się niewypałem i stanowiły kompletne fiasko. Wszystko, co udało mu się osiągnąć, to zalanie wodą podłogi w laboratorium i mnóstwo frustracji (a można by pomyśleć, że powinien być przyzwyczajony do podłóg zalanych wodą, jeśli przypomnimy sobie te wszystkie mokre psy...). W końcu jednak badacz dopiął swego i za swoje wysiłki dostał nawet doktorat. Niezależnie od tego, że wyniki jego badań skłaniają nas do pewnego szacunku dla tych owadów, które potrafią przeżyć większość zderzeń z kroplami deszczu, prace Dickersona stanowią także doskonały przykład ilustrujący drugie prawo Newtona i pojęcie pędu.

Po pierwsze, zastanówmy się jeszcze raz nad wspomnianą wcześniej pięciotonową ciężarówką. Wyobraźmy sobie, że pędzi ku nam z prędkością 10 m/s, czyli ma pęd 50 000 kgm/s. To dużo. My tymczasem, przechadzając się niespiesznie, mamy pęd znacznie mniejszy – jesteśmy lżejsi i wolniejsi. Jeśli ciężarówka na nas wpadnie – przepraszamy za tę przykrą wizję –

zostaniemy odrzuceni do tyłu z ogromną prędkością. Nasz pęd ulegnie ogromnej zmianie, ponieważ bardzo wzrośnie nasza prędkość, a w dodatku, jeśli szliśmy w przeciwną stronę do ruchu ciężarówka, nastąpi także zmiana kierunku naszego ruchu. Siła, jaką odczujemy, to zmiana naszego pędu podzielona przez czas, przez jaki znajdowaliśmy się w kontakcie z ciężarówką. Ponieważ zgodnie z drugim prawem ruchu Newtona siła przyłożona do jakiegoś przedmiotu jest równa tempu zmiany jego pędu w czasie. A ponieważ zdarzenie trwało bardzo krótko, będziemy odczuwali ogromną siłę. Auć! Przeleciawszy kilka metrów w powietrzu, spadniemy na ziemię, a nasza prędkość nagle zmniejszy się do zera. Znow doświadczymy szybkiej zmiany pędu i działania ogromnej siły. To dlatego zderzenia w ruchu drogowym są takie paskudne.

Nie pada, ale leje

Co to wszystko oznacza dla przemoczonego komara, który mniej więcej co 25 sekund ma przed sobą własny odpowiednik zderzenia z ciężarówką. Aby się tego dowiedzieć, Dickerson zbudował niewielką plastikową klatkę o szerokości 5 i wysokości 20 centymetrów, w której trzymał komary z gatunku *Anopheles gambiae* i *Anopheles freeborni*. Na szczycie klatki umieścił nasiąkniętą wodą siatkę, na tyle gęstą, że komary nie mogły przez nią uciec. Postawiwszy klatkę na podłodze w holu swojego laboratorium, spryskiwał ją wodą z wysokości 2 metrów. Chodziło o to, żeby krople wody, uderzając w nasączoną siatkę, strącały z niej wodę w głąb klatki. Pierwsze próby wypadły dobrze, ale kropelki wody nie trafiały w komary z taką samą prędkością, jak to się dzieje podczas deszczu. Dickerson zamienił więc siatkową pokrywkę na inną, o większych okrągłych oczkach i wspiął się na

położony 10 metrów wyżej balkon, aby stamtąd polewać komary. Krople spadające z większej wysokości powinny osiągać prędkość, jaką mają krople deszczu. Przygotowawszy kamerę filmową, pracującą z prędkością 4000 klatek na sekundę, Dickerson miał wszystko, czego potrzebował, aby zarejestrować interesujące go zderzenia.

Okazało się jednak, że taką metodą nie da się strącać kropelek do klatki, za to część komarów zdołała się wymknąć, pozostawiając Dickersona bez żadnych istotnych rezultatów, poza zalaniem podłogi. Doszedł więc do wniosku, że przyspieszaniem kropelek powinno zająć się ciśnienie, a nie grawitacja, i aby to osiągnąć, użył spryskiwacza zamontowanego na szczycie klatki. Tym razem eksperyment się powiódł i Dickerson skutecznie polewał komary wodą lecącą z prędkością 10m/s, a więc taką, jaką mają krople deszczu. Analizując następnie na zwolnionych obrotach swoje filmy, zauważył, że owady wcale nie próbowały unikać zderzeń; Dickerson zarejestrował 6 zderzeń owada z kroplą deszczu. Jak się okazało, kiedy kropla trafia w komara, zwykle uderza go trochę z boku, w odnóża albo w skrzydła. Uderzenie wytrąca owada z trasy lotu, ale szybko odzyskuje on swoją trajektorię, czasami w ciągu setnej części sekundy.

Najgorszy typ zderzenia powstaje wtedy, gdy lecący komar zostanie trafiony bezpośrednio między skrzydła. Kropla deszczu i komar spadają razem na ziemię niczym kochankowie spleceni w uścisku, przy czym siła zderzenia zmienia prędkość owada od zera do około 2,1 m/s w ciągu zaledwie 1,5 milisekundy. Daje to przyspieszenie rzędu 1400 m/s² (2,1 m/s podzielone przez 1,5 milisekundy). To przyspieszenie ponad 140 razy większe od ziemskiego przyspieszenia grawitacyjnego (g). Kiedy wybierzemy się na przejażdżkę w diabelskim młynie, samochodem Formuły 1 albo w rakiecie kosmicznej, przypuszczalnie będziemy musieli poradzić sobie z przyspieszeniem 4 razy większym niż to, jakie powstaje pod

wpływem siły ciężenia. Przy większym przyspieszeniu człowiek mdleje, ma poczucie, że oczy wyskoczą mu z orbit, albo umiera. Dickerson twierdzi, że pewien amerykański lekarz w czasach zimnej wojny podczas testowych lotów myśliwców przeżył przyspieszenie 25 razy większe od przyspieszenia grawitacyjnego. Niemniej pchły, które potrafią skakać na nieprawdopodobne odległości, robią to z przyspieszeniem 135 razy większym niż przyspieszenie grawitacyjne. „To zdumiewające, jak wielkie przyspieszenia potrafią przeżyć owady” – mówi Dickerson.

Komary są bardzo lekkie, więc w ich przypadku zmiana pędu jest niewielka. Zgodnie z drugim prawem Newtona, przy założeniu, że owad waży 2 miligramy, siła, jaką odczuwa w następstwie zderzenia z kroplą deszczu wynosi 0,003 N (tempo zmiany jego pędu: 2 miligramy pomnożone przez 2,1 m/s, podzielone przez 1,5 milisekundy). To nie tak wiele – jak na komara. Przeprowadzone przez Dickersona eksperymenty, pod nieprzyjemnie brzmiącą nazwą testów kompresji, wykazały, że komary – dzięki swojej przypominającej zbroję zewnętrzną powłocę, czyli swojemu zewnętrznemu szkieletowi – mogą przeżyć działanie sił zgniatających o wartości 10 razy większej niż ta, która powstaje przy zderzeniu z kroplą deszczu.

Inny sposób na osłabienie siły zderzenia, choć brzmi to jak przeciwieństwo dobrego planu działania, polega na tym, żeby możliwie wydłużyć czas trwania samego zderzenia. Komar, aby to osiągnąć, przywiera do kropli deszczu i dalej lecą razem. Bokser na ringu wykorzystuje tę samą zasadę przedłużania uderzenia, kiedy uświadamia sobie, że zaraz otrzyma silny cios. Rozluźnia wtedy mięśnie karku i stara się, żeby jego głowa nie stawiała oporu, „zabierając się z ciosem”. Dzięki temu rękawica przeciwnika ma dłużej kontakt z głową trafionego zawodnika, co zmniejsza siłę uderzenia. Ta sama idea leży u podstaw działania poduszki powietrznej

w samochodzie – nasze zderzenie z deską rozdzielczą trwa dłużej, ponieważ poduszka powietrzna stopniowo spowalnia ruch naszego ciała, inaczej niż twarda powierzchnia deski rozdzielczej, zmniejszając tym samym siłę zderzenia.

Śpiewając w deszczu

Owad może więc przetrwać trafienie przez kroplę deszczu. Co się dzieje dalej? Kiedy już lecą razem, kropla deszczu i komar nie rozstają się ze sobą. Dickerson zaobserwował jedną taką parę, która wspólnie odbyła podróż o długości 39 milimetrów, czyli pokonała odległość 13 razy większą niż długość ciała komara. Kropla nie przylepia się jednak do owada, ponieważ komar jest pokryty włosami odpychającymi wodę. To bardziej subtelne objęcia. Ostatecznie jednak komar na filmie zsuwa się z kropli i ląduje na boku klatki. Po krótkim odpoczynku odlatuje nie uszkodzony. Każdy komar, który został trafiony przez kroplę deszczu, przeżywa zderzenie. Kropla także wychodzi bez szwanku: zachowuje swój kształt, mimo że komar załapał się na darmową przejażdżkę. Podczas początkowych eksperymentów z kroplami spadającymi z mniejszą prędkością Dickerson nakręcił w dużej rozdzielczości film, na którym widać, że krople uginają się i deformują, zwłaszcza jeśli są niewielkie. Ale napięcie powierzchniowe – zjawisko, do którego wrócimy w rozdziale 3 – ratuje je przed rozprysnięciem się.

Zabójczo wspaniała

Jednak komary nie mogą tak całkiem rozluźnić się podczas deszczu. Do tej pory zakładaliśmy, że mają dość miejsca, aby latać tak, jak chcą. Ale jeśli w chwili gdy zostaną trafione kroplą, znajdują się zbyt nisko nad ziemią, grozi im, że zostaną ciśnięte o ziemię, a wtedy ich pęd zmieni się dość dramatycznie. Jeśli kropla trafi komara siedzącego na gałęzi, także mogą być kłopoty. Jeśli kropla deszczu uderzy w komara w powietrzu, komar może zabrać się na przejażdżkę, ale kiedy pacnie go na ziemi albo na gałęzi, sama się rozlatuje. Jeśli cały pęd kropli deszczu przechodzi na komara, owad zostaje walnięty z siłą równą pędowi kropli deszczu – jej masa (0,1 grama), pomnożona przez jej prędkość (10 m/s) – podzielonemu przez czas, jaki zajmuje kropli rozprysnięcie się na kawałki (około 2 milisekund). Daje to siłę około 0,5 N, czyli jakieś 50 tysięcy razy więcej, niż waży komar. A to wystarcza, by go zabić. Bye, bye.

Jeśli komar chce przeżyć zderzenie z kroplą deszczu, musi liczyć przede wszystkim na niewielką masę swojego ciała oraz umiejętność zabrania się na przejażdżkę z kroplą. To świetna wiadomość dla komarów, ale już nie taka dobra dla nas, jeśli nie lubimy tych owadów. Jak wspominaliśmy w rozdziale 1, komary przenoszą zabójcze choroby, a zatem w wielu rejonach świata ogromne znaczenie ma zapobieganie rozprzestrzenianiu się tych szkodników. Zwykle stosujemy w tym celu środki owadobójcze rozpylane w powietrzu. Po rozpyleniu takiej substancji, zawierającej truciznę, w powietrzu powstaje delikatna mgiełka złożona z zabójczych dla komarów kropelek o wielkości równej 0,001 kropli deszczu każda. Jednak środki owadobójcze nie są obojętne dla środowiska. Kto chciałby mieć na co dzień do czynienia z toksycznymi chemikaliami? Niedawno Dickerson obserwował, w jaki sposób *Anopheles freeborni* lata w gęstej mgłę złożonej z kropelek wody oraz różnych gazów nie zawierających żadnych toksyn. W zetknięciu z gazami o gęstości 2 razy większej od powietrza komary zaczynają latać chaotycznie,

nagle pikują i wpadają w korkociąg, po czym rozbijają się o ziemię. Uczony przypuszcza, że w środowisku tych gazów komar spotyka nietypowe siły oporu zaburzające działanie jego czułków, organów, dzięki którym wyczuwa swoje położenie w przestrzeni. To odkrycie nasunęło mu pomysł, co może zastąpić rozpylane trucizny. Ponieważ kropelki wody nie przylegają do woskowatych, nieprzenikliwych dla wody włosków pokrywających ciało komara, Dickerson proponuje, aby rozpylać środki złożone całkowicie z oleju sojowego, który będzie lepiej przylegał do ciała tych owadów. Ta naturalna substancja, stosowana już jako podstawa chemicznych środków owadobójczych, będzie przyklejała się do receptorów równowagi komarów i zaburzała ich lot; komary będą więc trzymać się z daleka od osoby uzbrojonej w taki spray. Ale do tego jeszcze długa droga przed nami. Dziś, jeśli chcemy zachować bezpieczeństwo w rejonie występowania malarii, Dickerson radzi stosowanie tradycyjnych kremów i maści. I dodaje: „Środków odstrasżających owady trzeba używać nawet podczas deszczu”.

Witamy w klubie

Komary potrafią uniknąć śmierci w zderzeniu z kroplami deszczu dzięki wykorzystaniu drugiego prawa Newtona: „zmiana pędu danego ciała jest proporcjonalna do wielkości bodźca działającego na to ciało”, a to znaczy mniej więcej tyle samo, co powiedzenie, że siła działająca na jakiś przedmiot jest równa szybkości, z jaką zmienia się jego pęd w czasie. O ile podczas ruchu przedmiot nie staje się cięższy ani lżejszy, o tyle drugie prawo Newtona oznacza także, że działająca siła (F) równa się masie (m) danego przedmiotu pomnożonej przez tempo zmiany jego prędkości, czyli jego przyspieszenie (a). W symbolicznej postaci można to zapisać jako $F = m \cdot a$,

równanie, które w 2004 roku zostało uznane przez czytelników pisma „Physics World” za trzecie ulubione równanie wszech czasów. To równanie równie dobrze może być ulubionym równaniem skorupiaka nazywanego rawką błaznem (albo krewetką modliszkową), o czym dowiemy się za chwilę, jeszcze raz wracając do kwestii pożywienia. Tym razem to nie bawół wodny ani jabłko, ale krab. Mniemam, mniemam.

Spożywanie kraba to dość chaotyczne przedsięwzięcie: te wszystkie metalowe szczypcy, plastikowe fartuszki, kawałki mięsa lecące na wszystkie strony przez całą restaurację. Inny miłośnik krabiego mięsa, rawka błazen (*Odontodactylus scyllarus*), nie ma takich narzędzi, skoro żyje, akurat tak się składa, w tropikalnych wodach Azji Południowo-Wschodniej i południowego Pacyfiku. Mimo swojej nazwy ten barwny skorupiak długości 10 centymetrów wcale nie jest błaznem, gdy rozbija pancerz kraba, aby dostać się do soczystego mięsa kryjącego się w środku. *Odontodactylus scyllarus*, znany także jako krewetka boksująca, wykształcił własne narzędzia do rozbijania skorupy krabów, ślimaków i małży takich jak omułki. Ma on na końcu drugiej pary odnóży wyjątkowo mocne segmenty o kształcie daktyli, których używa jak młotów. *Daktylus* to po grecku tyle co palec, chociaż akurat w przypadku tego skorupiaka daktyl to raczej pękaty łokieć wystający ku przodowi z odpowiednika naszego ramienia. Dla poety daktyl to miara rytmiczna złożona z sylaby akcentowanej, po której następują dwie nieakcentowane, jak w angielskim zwrocie „*mantis shrimp*”.

Daktyle rawki błazna, jak gdyby chciała zmanifestować stworzeniom żyjącym w skorupach ich niebezpieczną siłę, są jaskrawo pomarańczowe. Zresztą całe ciało tego stworzenia cechują fantazyjne, jaskrawe kolory: okrągłe fioletowe oczy wystające ponad turkusową głowę, biały przód z czerwonymi kropkami, zielony korpus i 10 czerwonych nóg. W sumie to stworzenie, jakby wyjęte z rysunkowego filmu Disneya (mniej fantazyjnie

ubarwiony Jacques z *Gdzie jest Nemo?* to *Stenopus hispidus*, czyli podobny do krewetki skorupiak z rzędu dziesięcionogów), przypomina wielką kulanę pospolitą (*Armadillidium vulgare*) o elastycznym grzbiecie. I nie tylko wygląda zabójczo – kiedy wyłania się ze swoich tuneli w kształcie litery U, ukrytych w morskim dnie niedaleko rafy koralowej, potrafi także zadać morderczy cios.

„Rawka błazen ukształtowała się ewolucyjnie jakieś 500 milionów lat temu – opowiada David Kisailus z Uniwersytetu Kalifornijskiego w Riverside, który opisuje ją jako pancerną gąsienicę. – Pierwotnie polowała za pomocą włóczni, a jej daktyle były kolczaste i posługiwała się nimi do przekłuwania ryb. Kiedy jednak jej środowisko uległo zmianie, postanowiła, że będzie raczej jadła kraby i inne zwierzęta żyjące w skorupach”.

Tyle że skorupa krabów jest mocna i twarda. W jaki sposób dziesięciocentymetrowa rawka może znaleźć w sobie dość siły, aby rozbić twarde pancerz skorupiaka? „Do rozbijania tych twardych elementów wykorzystuje »łokciowy« region swoich daktyli – mówi Kisailus. – Z czasem obdarzona mocnymi łokciami rawka ewolucyjnie rozdzieliła się na różne grupy. Mamy więc takie, które przekłuwają ofiarę, i takie, które ją rozgniatają”.

Ale nawet jeśli rawka ma wzmocnione łokcie, wielkość to nie wszystko, gdy w grę wchodzi rozprawianie się z krabem. Na szczęście dla siebie samej rawka nie jest mięczakiem. Kiedy postanowi zjeść sobie kraba, potrafi punktowo używać siły o wielkości ponad 700 N, a zatem ponad 1000 razy większej, niż sama waży (ciężar to siła, jaką dany przedmiot jest przyciągany przez Ziemię; obliczamy go, mnożąc masę przedmiotu przez przyspieszenie ziemskie o wartości $9,81 \text{ m/s}^2$ – ciężar krewetki o masie 60 gramów ma wartość: $0,06 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \approx 0,6 \text{ N}$). Uчени zdołali ustalić siłę uderzenia rawki, umieszczając pożywną pastę na powierzchni urządzenia mierzącego

siłę; rawka wielokrotnie uderzała w czujnik, jakby to był krab albo ślimak. „Musi wygenerować takie siły, jeśli chce zastosować ilość energii wystarczającą, aby zrobić szczeliny w skorupach organizmów, na które poluje” – tłumaczy Kisailus.

Rawka błazen to prawdziwy znawca zasad fizyki. Nadaje niezwykłą siłę swojemu uderzeniu dzięki drugiemu prawu Newtona ($F = m \cdot a$). Aby uzyskać tak wielką siłę, musi albo mieć ciężkie szczypce, albo nadawać im ogromne przyspieszenie. Jednak jej daktyle nie mogą być zbyt masywne – rawka nie chce przecież, aby ich ciężar ją przygniatał do dna morza, gdy po nim przemyka; a jednocześnie nie może sprawić, by jej maczugi nagle nabierały ciężaru w chwili, gdy dostrzeże jakiś smaczny kąsek. Może jednak nadać im przyspieszenie, a im większe jest to przyspieszenie, tym lepiej. Rawka przyspiesza więc swoje daktyle aż do wartości 100 tysięcy metrów na sekundę do kwadratu (m/s^2) – tempo ponad 10 tysięcy razy większe od przyspieszenia grawitacyjnego, stanowiącego jedno z największych przyspieszeń w przyrodzie. Jej daktyle tuż przed uderzeniem w cel osiągają prędkość ponad 80 kilometrów na godzinę. Na filmach wideo przedstawiających rawkę atakującą jakiegoś małża jej uderzenia wydają się niemal zbyt szybkie, aby można je było zauważyć. Ale zniszczenia, jakie czyni w skorupie ofiary, są aż nadto widoczne. Po kilku zamaszystych ciosach w skorupie pojawia się wyraźne pęknięcie. Okazuje się, że w połączeniu z innym zjawiskiem fizycznym – wywołanym przez niezwykłą prędkość, z jaką poruszają się jej pałki – rawka może zastosować siłę prawie 2500 razy przewyższającą jej własny ciężar. Więcej na ten temat dowiemy się później. Na razie wystarczy powiedzieć, że krab występujący w tej historii w końcu pęka. Zapewne pod takimi ciosami każdy by się posypał.

Głód prędkości

W jaki sposób rawka błazen nadaje swoim pałkom tak wielkie przyspieszenie? Potrafi, dosłownie w okamgnieniu, puścić swoje szczypce w ruch, nadając im prędkość od 0 do 80 kilometrów na godzinę. A raczej, jeśli weźmiemy pod uwagę, że mgnienie ludzkiego oka trwa 0,3 sekundy, a rawka potrzebuje zaledwie 3 milisekund (0,003 sekundy), aby trafić ofiarę, uderza 100 razy szybciej, niż przebiega mgnienie oka. Jej wyczyn jest tym bardziej imponujący, że jej mięśnie wcale nie ruszają do akcji aż tak szybko. Mistrzowie prędkości wśród zwierząt, na przykład gepard i sokół wędrowny, nabierają przyspieszenia stosunkowo łagodnie, zaczynając powoli, po czym stopniowo zwiększają prędkość i potrzebują do tego sporego dystansu. Gepard, okrzyknięty najszybszym zwierzęciem lądowym, osiąga przyspieszenie około 9 m/s^2 (od 0 do 96 km/h w ciągu 3 sekund) i może biec z prędkością ponad 100 kilometrów na godzinę. Najszybsze ze wszystkich zwierząt, sokół wędrowny, wykorzystuje siłę grawitacji, aby mknąć ku ziemi z prędkością 300 kilometrów na godzinę. A zatem w jaki sposób rawka błazen potrafi w tak krótkim czasie przyspieszyć swoje pałki, szybciej, niż pozwalają jej na to jej własne mięśnie? Jak wyjaśnia Sheila Patek z Duke University w USA, ten sprytny skorupiak stosuje metodę zwaną wzmacnianiem mocy. Nie ma to jednak nic wspólnego ze wzmacniaczami na koncercie zespołów rockowych; chodzi raczej o rodzaj broni wymyślonej w starożytnych Chinach.

„Gdybyś chciał zabić jelenia, rzucając w niego strzałą, niewiele osiągniesz – wyjaśnia Sheila Patek – ale możesz użyć tych samych mięśni ramienia, posługując się kuszą, i zawczasu zgromadzić energię sprężystości, po czym ją wyzwolić za pomocą zapadki. Kusza wzmacnia więc moc, tempo, w jakim wyzwolana jest energia”. To wzmocnienie nadaje strzale znacznie

większe przyspieszenie, niż moglibyśmy osiągnąć, gdybyśmy rzucili ją ręką. „Mamy tu zwariowane coś-za-coś, które bierze się z tego, w jaki sposób ewolucyjnie kształtowały się nasze mięśnie – mówi badaczka. – Albo mięsień będzie kurczył się szybko, nie uwalniając zbyt wielkiej siły, albo będzie kurczył się powoli, ale z dużo większą siłą. Nie możesz mieć obu tych rzeczy naraz, to znaczy nie możesz uzyskać ogromnej siły, używając mięśni swojego ramienia, bez pomocy czegoś takiego jak łuk”.

Kusza kumuluje energię dzięki zwiększaniu napięcia w ścięgnie naciąganej przez mięśnie ramienia człowieka, podczas gdy łuk utrzymuje to napięcie. Rawka błazen kumuluje energię mięśni w swoim sztywnym szkieletie zewnętrznym i aby to osiągnąć, skurcza szkielet.

„Przypuszczalnie słyszeliście o mięśniach antagonistycznych w naszym ramieniu – opowiada Sheila Patek. – Mamy jeden zestaw mięśni, który zgina przedramię w łokciu, i drugi zestaw, który je prostuje”. Rawka błazen ma zestaw potężnych mięśni antagonistycznych zamykających. W chwili gdy zaczyna otwierać swoje silnie umięśnione szczypce, skurcza mięsień leżący bliżej. Ten mięsień może być dość słaby, ale ma specjalnie zmodyfikowane ścięgno, które działa jak zapadka kuszy. „Bliżej położony mięsień utrzymuje kończynę skorupiaka w pozycji zamkniętej, podczas gdy stosunkowo masywny mięsień otwierający kończynę naciąga sprężynę [czyli część zewnętrznego szkieletu skorupiaka] – wyjaśnia Sheila Patek. – Bliżej położony mięsień działa szybko. Kiedy się rozkurcza, uwalnia zapadkę i kończy w krótkim czasie wykonuje zamaszty ruch”.

Szkielet zewnętrzny rawki przechowuje energię potężnych, ale powoli działających mięśni antagonistycznych (za ich pomocą skorupiak usiłuje otworzyć swoje szczypce), do chwili gdy szybko działający, bliżej położony mięsień zwolni zapadkę, wyzwalając w ten sposób w krótkim, gwałtownym wybuchu całą powoli zgromadzoną energię. Dzięki temu, że wszystko dzieje

się szybciej, niż działałoby się z użyciem mięśnia nie korzystającego ze wzmocnienia mocy, rawka błazen podkreśla przyspieszenie swoich daktyli do poziomu bliskiego rekordowych wartości w całym świecie zwierzęcym.

Robienie bąbelków

Chociaż pod względem prędkości (inaczej niż przyspieszenia) rawka nie jest wcale jednoznacznym zwycięzcą w rywalizacji z gepardem i sokołem wędrownym, z całą pewnością nie stoi na przegranej pozycji w walce z krabem czy małżem. Jak gdyby cios zadany niezwykle szybko potężnymi szczypcami nie był czymś wystarczająco przykrym, na tym nie koniec, bo zaledwie pół milisekundy później następuje kolejne uderzenie. Rawka wykorzystuje bowiem inne zjawisko fizyczne, aby nadać swoim maczugom jeszcze bardziej niszczycielską moc.

Według Sheili Patek ze względu na ogromną prędkość, z jaką poruszają się daktyle tego skorupiaka, w następstwie tego ruchu powstają 2 obszary – w jednym woda płynie bardzo szybko, w drugim, tuż za daktylem, płynie bardzo wolno. W ten sposób powstaje efekt Bernoulliego, nazwany tak na cześć szwajcarskiego matematyka i fizyka Daniela Bernoulliego (1700–1782). Sąsiedztwo obszarów o wysokiej i niskiej prędkości przepływu prowadzi do powstania strefy niskiego ciśnienia, w której – w procesie znanym jako kawitacja – cząsteczki wody odrywają się od siebie i powstaje piana pełna bąbelków.

Cios zadany bąbelkiem powietrza nie wydaje się czymś groźnym, ale to nie jest bańka mydlana wybuchająca z delikatnym pyknięciem. Bąbelek gazu powstały w następstwie kawitacji, który uderza w muszlę ślimaka, imploduje w kuli ciepła, światła i dźwięku. „Przy tej okazji powstaje ogromna ilość

energii, temperatura sięga 7000 stopni C. To jak na powierzchni Słońca” – mówi Sheila Patek. Przykłady tych rozbłysków można zobaczyć na filmie wideo zamieszczonym w internetowej witrynie badaczki – wygląda, jakby skorupę rozwalala seria połyskliwych gwiazdek promieniujących z końca pałeczki czarnoksiężnika. W jakiejś upiornej koincydencji wzmacnianie mocy ma podwójne następstwa: nie dość, że rawka błazen może nadać swoim szczypcom ogromne przyspieszenie, to jeszcze w efekcie kawitacji powstają bąbelki, które wywołują dodatkowe ogromne zniszczenia. „Potrzeba mnóstwo energii, aby rozdzielić te cząsteczki wody – wyjaśnia Sheila Patek – i jeśli skrócisz ilość czasu, jaki mają, aby połączyć się ponownie, uzyskujesz ogromną ilość energii wyzwalanej w bardzo krótkim czasie”.

Ofiara nawet nie ma szans dojść do siebie po pierwszym silnym ciosie, gdy następuje uderzenie bąbelków kawitacyjnych, po czym rawka uderza drugim szczypcem i pojawia się dalsza kawitacja. Ślimak dostaje więc poczwórny łomot, zupełnie jakby ktoś walił go młotem kowalskim albo zadał mu serię uderzeń na ringu bokserkim, przy czym jego przeciwnik do każdego ciosu dodawałby petardę palącą ogniem. Cios i upokorzenie. Cios, bum! Cios, bum! To naprawdę niewielka pociecha, że wszystko kończy się w ciągu niecałych 0,8 milisekundy. Działające siły sięgają 1500 N, a więc ponad 2,5 tysiąca razy więcej, niż waży ciało rawki błazna, przy czym bąbelki gazu powstałe w następstwie kawitacji są jeszcze bardziej destrukcyjne niż siła uderzeniowa jej daktyli. W przypadku człowieka o masie mniej więcej takiej, jaką ma jedno z autorów, stanowiłoby to odpowiednik uderzenia z siłą 1,5 miliona niutonów. Dla porównania: cios boksera ląduje na twarzy przeciwnika z siłą 5 tysięcy niutonów. Uderzenie pięścią trwa dłużej niż uderzenia pałką przez rawkę, co zwiększa impuls, więc podane wartości nie przynoszą pełnego porównania. Niemniej warto

sobie to zapamiętać: lepiej nie zadzieraj z rawką błaznem.

Kawitacja jest bronią tak potężną, że inny skorupiak, krewetka pistoletowa (*Alpheus bellulus*), używa bąbelków kawitacyjnych do ogłuszania swojej ofiary. „W porównaniu z boksującą rawką błaznem te krewetki są naprawdę głośne – mówi Sheila Patek. – Strzelają nieustannie, ponieważ atakują bąbelkami kawitacyjnymi nie tylko swoją ofiarę, ale także siebie nawzajem. Nie sposób ich uniknąć. Słysząc je na zewnątrz zbiornika, można je usłyszeć nawet w holu. Odgłosy krewetek pistoletowych rozbrzmiewają we wszystkich oceanach świata”.

Bąbelki kawitacyjne są jedną z przyczyn powodujących, że tak trudno jest zbudować okręty osiągające większe prędkości: szybko obracająca się śruba wytwarza spirale bąbelków kawitacyjnych, które niszczą powierzchnię wirnika. „Powyżej pewnych prędkości nie sposób uniknąć kawitacji” – mówi Sheila Patek. Kawitacja spędza także sen z powiek konstruktorom łodzi podwodnych, którzy chcieliby zbudować szybko przemykającą jednostkę. „Jeśli poruszasz się w wodzie wystarczająco szybko, powstają bąbelki, po czym pękają, i to jest ogłuszające – wyjaśnia uczona. – To potężne źródło hałasu, a także źródło ogromnej irytacji dla ludzi, którzy głowią się nad podwodnym uzbrojeniem i różnymi urządzeniami pracującymi pod wodą”.

Mały rozbijacz

Rawka błazen jest mistrzem w zabijaniu krabów, jednak sama przy tej okazji nie może uniknąć problemów. Kiedy rawka uderza w kraba z siłą 700 N, po czym następuje cios o sile 1500 N ze strony bąbelków kawitacyjnych, do głosu dochodzi trzecie prawo Newtona. Każde działanie wywołuje równe mu przeciwdziałanie o przeciwnym zwrocie. A zatem kiedy rawka uderza kraba,

krab w efekcie jej oddaje – uderza rawkę z siłą o takiej samej wartości. W jaki sposób rawka unika zniszczenia swoich pałek w procesie tłuczenia dziesiątków tysięcy ofiar przeznaczonych do spożycia, zanim zrzuci stare i odtworzy nowe szczypce? Skorupiak zmienia swój zewnętrzny szkielet co 3 albo 4 miesiące, co w jego przypadku ma sens, ponieważ po tym czasie pokrycie jej daktylowych „łokci” mogłoby całkiem się rozlecieć.

Pora ponownie posłuchać Davida Kisailusa, badacza, który wcześniej zapoznał nas z rawką błaznem. Kisailus odkrył, że oprócz zjawisk, o których właśnie usłyszeliśmy, rawka odwołuje się także do materiałoznawstwa. Jej daktyle mają bowiem niezwykle strukturę opóźniającą moment, w którym mogłyby całkiem się rozlecieć, poprzez umożliwianie powstawania w nich niewielkich pęknięć. Według Kisailusa człowiek stara się budować materiały na tyle mocne, aby osiągnąć ich niezawodność, ale biologia rozwiązuje ten problem nieco inaczej. „W przyrodzie powstają struktury, które są zarówno mocne, jak i wytrzymałe – wyjaśnia uczony. – Daktylowe pałki rawki są w stanie wytrzymać liczne uderzenia dzięki temu, że powstają w nich niewielkie pęknięcia w nanoskali. Te pęknięcia muszą następnie przemierzać niezwykle odległości, nieustannie zmieniając po drodze swoje położenie i obracając się w zetknięciu z mniej sztywnymi powierzchniami”. W trakcie tej wędrówki pęknięcia tracą swoją energię. „Jeśli masz talerz ceramiczny i upuścisz go na podłogę, rozleci się na kawałki – dodaje Kisailus. – Ale jeśli otoczmy ten ceramiczny talerz gąbką, nie pęknie, ponieważ energia zderzenia zostanie wchłonięta przez bardziej miękki element”.

Aby rozszyfrować tajemnicę niezwykle mocnych daktyli rawki błazna, zacznijmy od zewnętrznej powierzchni. Uderzająca powłoka pałki ma twardą zewnętrzną krawędź złożoną z cząsteczek hydroksyfosforanu wapnia, odmiany fosforanu wapnia podobnej do minerału znajdującego się w ludzkich kościach. Ta warstwa ma zaledwie 60 mikrometrów

(0,06 milimetra) głębokości, co odpowiada grubości cienkiego ludzkiego włosa. Musi być twarda, aby mogła rozbić muszlę zaatakowanego kraba albo ślimaka. Jednak sama by pękła podczas wielokrotnych uderzeń w powierzchnię muszli, dlatego pod nią znajduje się inny materiał, który hamuje powstawanie pęknięć oraz zapewnia pałce sztywność.

Ten niezwykły materiał ma strukturę Bouliganda, nazwaną tak na cześć francuskiego matematyka Georges'a Louisa Bouliganda (1889–1979). Składa się z wielu warstw złożonego cukru zwanego chitozanem[4]. Cząsteczki tego cukru są długie – niczym włókna – i leżą wzdłuż siebie. Każda warstwa chitozanu jest równoległa do powierzchni, ale w jej obrębie włókna cząsteczek cukru są obrócone w stosunku do kierunku, w jakim leżą cząsteczki warstwy znajdującej się powyżej. W ten sposób powstaje spiralny układ kolejnych warstw. W przypadku pałek rawki błazna te mikroprzesunięcia warstw chitozanu względem siebie składają się na obrót o 180 stopni, mniej więcej co 70 mikronów (0,075 milimetra). Te miękkie włókna otacza twardszy materiał, hydroksyfosforan wapnia, ten sam, który tworzy powierzchnię uderzeniową pałki.

Warstwa leżąca poniżej twardej, zewnętrznej krawędzi daktyla rawki stanowi kompozyt – czyli przypomina czekoladę rumową z rodzynkami, w której miękkie kawałki owocu (włókna) tkwią w twardszej czekoladzie (minerał). Taka mieszanka elementów sztywnych i elastycznych daje materiałowi wytrzymałość, rozkładając energię nanopęknięć, powstających na powierzchni pod wpływem uderzeń, wzdłuż spiral struktury Bouliganda. „Mamy tu dużą powierzchnię styku między miejscami miękkimi i sztywnymi i w rezultacie pęknięcie musi pokonać całą tę długą, męczącą drogę – wyjaśnia Kisailus. – W rezultacie pęknięcie traci całą swoją energię, zanim przejdzie przez całą pałkę”.

Warstwy zbudowane w ten sposób jak struktura Bouliganda znajdują się

w głębi całego obszaru, który przyjmuje uderzenie. Dalej w głębi pałki struktura się zmienia – chitozanowe włókna w strukturze Bouliganda są otoczone przez złożoną substancję zawierającą niekrystaliczne formy fosforanu wapnia zamiast krystalicznego hydrofosforanu. W dodatku zmienia się grubość tych warstw, przechodząc od grubych do cienkich, w miarę jak posuwamy się od twardej, zewnętrznej powierzchni w głąb daktyla. Według Kisailusa to stopniowanie może także odgrywać inną ważną rolę: filtrując fale akustyczne w trakcie zadawania ciosu, chroni materiał przed dalszym zniszczeniem.

Wyjść ze skorupy

Rawka błazen nie jest wyjątkiem jako stworzenie, które ma skorupę o strukturze Bouliganda; występuje ona na przykład u innych stawonogów (w grupie bezkręgowców obejmującej owady, pajęczaki i skorupiaki). Jednak to rawka jest wyjątkowa, ponieważ w jej skorupie znajdują się zarówno obszary krystalicznego, jak i niekrystalicznego fosforanu wapnia, a także węgla, a także dlatego że w jej przypadku struktura złożona ze sztywnych (mineralnych) i miękkich (włóknistych) elementów zmienia się stopniowo, w sposób periodyczny.

Moglibyśmy się nawet tego i owego od rawki błazna nauczyć. Kisailus skopiował wzór budowy tkanek w rejonie daktyla absorbującego energię. „Zamiast wykorzystywać materiały biologiczne, takie jak złożone cukry i fosforan wapnia, użyliśmy materiałów inżynierskich, takich jak włókna węglowe i epoksydy, oraz zasadniczo zmąpowaliśmy architekturę” – relacjonuje. Zbudowane w ten sposób panele wykazywały niemal o połowę mniej zniszczeń powstających pod wpływem uderzeń niż materiały

wykorzystywane przy budowie samolotu Boeing 787. Nic dziwnego, że koncerny lotnicze są żywo zainteresowane pracami Kisailusa.

Swoje badania nad rawką błaznem Kisailus prowadził w laboratorium, ale marzy o tym, żeby samemu zapolować na te stworzenia. Rawka żyje „w niektórych fantastycznych miejscach, takich jak Wietnam czy południowy Pacyfik”. Jednak na razie uczone ma do dyspozycji egzemplarze przysłane przez kolekcjonerów, które przetrzymuje w odrębnych pojemnikach, w akwarium o objętości prawie 2 tysięcy litrów. Pojemniki są zrobione z twardego plastiku, ponieważ rawka błazen swoimi potężnymi pałkami może przebić się przez szkło. To prawdziwy Houdini w świecie zwierząt. Kisailus już zauważył niewielkie pęknięcia na powierzchni plastikowego zbiornika, w którym mieszka jeden szczególnie zajadły osobnik. Kisailus mówi, że będzie się starał znaleźć jakieś mocniejsze pojemniki. Na szczęście dla badaczy umiejętności tego skorupiaka rozciągają się nawet na regenerację niektórych części ciała. „Można im wyrwać jedną z pałek i utworzą nową, ale to dobrze – twierdzi Kisailus. – Człowiek się w jakimś sensie do nich przywiązuje, bo to naprawdę fantastyczne zwierzęta”.

Najszybszy przegrany

Oficjalnie fantastyczne rawki są mistrzami, jeśli chodzi o to, aby nie dać się rozbić na kawałki. Wykorzystują zjawiska fizyki, by zaatakować swoją ofiarę – dzięki drugiemu prawu Newtona oraz wzmocnieniu mocy osiągają przyspieszenie, z jakim zadają silny cios, i stosują bąbelki kawitacyjne, żeby jeszcze przyłożyć dodatkowo – a także czerpią ze sztuki budowy materiałów, żeby ochronić własne ciało przed pękaniem, kiedy do głosu dochodzi trzecie prawo Newtona. A jak rawka błazen wypada w porównaniu z innymi

zwierzętami pod względem szybkości ruchu? Jak wiemy, rawka błazen potrafi osiągnąć liniowe przyspieszenie rzędu $100\ 000\ \text{m/s}^2$. Chociaż to jeszcze nie rekord w świecie zwierząt, sytuuje się w górze tabeli. Gdybyśmy rozważali, kto ma ogólnie najmocniejsze zalety, rawka błazen mogłaby wygrać, zwłaszcza że oczy tego stworzenia potrafią odbierać światło spolaryzowane (więcej o polaryzacji dowiemy się w rozdziale 6). O ile nam wiadomo, tylko jeden gatunek skorupiaków z tej rodziny ma podobne talenty, chociaż aby być pewnym jej zwycięstwa w grze na najsilniejsze atuty, trzeba by jeszcze wykluczyć z gry parę innych zwierząt.

„Największe udokumentowane przyspieszenie w świecie zwierząt to jak dotąd $1\ 000\ 000\ \text{m/s}^2$, zaobserwowane w przypadku parzących komórek meduzy: jej knidocytów, komórek parzydełkowych – mówi Sheila Patek. – Nie jest to system oparty na działaniu mięśni, ale odwołuje się do dokładnie tej samej zasady. Mamy tu komórkę parzącą z nawiniętym elastycznym włóknem, które napina się jak balon. Oraz malutki włoskowy mechanizm spustowy, który ją wyzwala. I tym razem chodzi o bardzo powolne kumulowanie energii oraz szybkie jej wyzwalaanie”.

Szybkość w królestwie zwierząt nie zawsze znaczy to samo. Zależy, jak się ją zdefiniuje. Ale nawet wtedy nie unikniemy sporów. Szybki ruch może następować w krótkim czasie, w ułamku sekundy; możemy mówić albo o dużej prędkości, albo o dużym przyspieszeniu. Według Sheili Patek trwanie ruchu to najlepsza metoda zdefiniowania szybkości. W tym przypadku ponownie zwycięża komórka parzydełkowa meduzy; za pomocą kapsułek o wysokim ciśnieniu jej knidocyty potrafią wystrzeliwać swoje zatrute ostrza w czasie około 0,7 milisekundy. Rawka błazen potrzebuje ślamazarnych kilku milisekund, aby uderzyć swoimi szczypcami. Jednak słaba strona meduzy polega na tym, że ze względu na krótkie trwanie ruchu komórki parzydełkowe mimo ogromnego przyspieszenia nie osiągają szczególnie

wysokich prędkości – po prostu brakuje im czasu, aby nabrać tempa. Czasem się wygrywa, a czasem się przegrywa.

Jeśli zdefiniujemy naszą konkurencję nieco dokładniej, przypuszczalnie pierwsze miejsce przypadnie gepardowi ze względu na największą prędkość, jaką potrafi utrzymać przez dłuższy czas. Sokół wędrowny zdobyłby złoty medal za największą prędkość osiąganą bez użycia siły – te ptaki po prostu zwijają skrzydła i wykorzystują siłę ciężenia, aby runąć w stronę ziemi. Knidocyty i zarodki grzybów wygrałyby ze względu na osiągnięcia w najkrótszym czasie, ale w tej książce pomijamy grzyby – nie są zwierzętami i nie mają mięśni. W ich przypadku to napięcie powierzchniowe wystrzeliwuje zarodniki z korzenia grzyba. W następnym rozdziale dowiemy się więcej o napięciu powierzchniowym i o tym, jak potrafi czynić cuda.

Zamknij jadaczkę

Nawet gdybyśmy precyzyjnie zdefiniowali warunki rywalizacji, biedna rawka błazen nie odniosłaby jednak zwycięstwa na froncie przyspieszenia. Na ostatniej prostej przegrałaby w zupełnie nowej kategorii „przyspieszenia odnoży w stosunku do ciała dzięki wzmocnieniu mocy”. Niektóre mrówki z rodzaju *Odontomachus*, oraz termity, potrafią bowiem zamknąć swoje szczęki z przyspieszeniem prawie $1\,000\,000\text{ m/s}^2$. Jak wskazuje sama nazwa (ang. *trap-jaw ant*), to mrówki o potężnych szczękach; jako owady mięsożerne używają swoich żuwaczek do ogłuszania ofiary. Mrówki tego gatunku, o długości do 1 centymetra, mieszkają głównie w rejonach o tropikalnym klimacie: w Kostaryce, Ameryce Południowej, Australii oraz na południowo-wschodnich terenach Stanów Zjednoczonych. Ostatnio *Odontomachus haematodus*, gatunek wywodzący się z Ameryki

Południowej, zaczął podbijać amerykańskie wybrzeże Zatoki Meksykańskiej i południowo-wschodnie stany USA. Kto wie, dokąd jeszcze dotrą te mrówki wraz z postępem przemian klimatycznych.

Mrówki z rodzaju *Odontomachus* żywią się stworzeniami, które zamiast uciekać, posługują się taktyką przypominającą rozpylanie chemikaliów. W samoobronie mrówka ogłusza napastnika szybkim ciosem swoich żuwaczek. W swoim laboratorium Sheila Patek, która prowadzi badania nie tylko nad krewetkami, ale także nad mrówkami oraz, jak się dowiemy z rozdziału 4, langustami, karmi *Odontomachus bauri* – to kolejny z siedemdziesięciu gatunków mrówek z tej rodziny – małymi pasikonikami. Ale mrówki z rodzaju *Odontomachus* są bardzo żarłoczne i zjedzą wszystko, co im się poda. „Spróbują swoich sił, nawet jeśli rzecz będzie naprawdę duża – opowiada badaczka. – Czasami dajemy im larwy mącznika, a one po prostu podchodzą i tak długo walą w taką larwę, aż przestanie się poruszać. A jeśli włożysz do akwarium palec, podejną i cię dziabną. Najwyraźniej nic nie jest w stanie ich przestraszyć”. Te mrówki wyglądają poważnie i rzeczowo – mają pękatą głowę, klatkę piersiową, odwłok oraz długie nogi, jak pajęczaki. Zupełnie jakby zrobiono je z klocków Meccano (albo Erector w USA). Swoje żuwaczki o kilkumilimetrowej długości, zakończone szczypcami, trzymają szeroko rozstawione niczym dwie połówki sumiastych wąsów zakręconych do góry.

A kiedy już zamykają swoje szczęki, robią to z prędkością 230 km/h – w ciągu 0,13 milisekundy. Podobnie jak rawka błazen, mrówki do błyskawicznego zamykania szczęk wykorzystują zjawisko wzmocnienia mocy. Jak mówi Sheila Patek: „Nie da się tego zrobić inaczej”. Jednak w odróżnieniu od rawki błazna, która na ogół ma daktyle zamknięte, po czym nagle je otwiera, mrówki utrzymują swoje mocne szczęki w pozycji otwartej, napinając potężne mięśnie zatraskujące żuwaczki, po czym nagle je

zamykają. Aby zgromadzić energię sprężystości, odchylają głowę do tyłu. „Kiedy są gotowe do ataku, używają niewielkiego mięśnia, który zwalnia zapadkę, dzięki czemu szczęki mogą się zewrzeć – wyjaśnia Sheila Patek. – Jedną z ich najfajniejszych cech polega na tym, że po wewnętrznej stronie szczęk mają włoski czuciowe; w tych włoskach są neurony, które biegną prosto do mięśni wyzwalających proces. To niezwykle szybko działający mechanizm spustowy, ponieważ w tym przypadku sygnał nie musi być przetwarzany w mózgu”.

Ten ruch szybkiego zamknięcia szczęk, z ogromnym przyspieszeniem, wyzwala siłę, która jest setki razy większa niż ciężar mrówki. Jest tak ogromna, że mrówka nie zawsze potrafi nad nią zapanować. Wydaje się, że niektóre gatunki mrówek z rodzaju *Odontomachus* używają swoich szczęk do poruszania się; uderzają nimi o ziemię w chwili zamykania się, po czym robią fikołki w powietrzu. Przypuszczalnie starają się w ten sposób uniknąć niebezpieczeństwa, odstraszyć drapieżnika albo uciec, gdy zwierzę, na które polują, zaczyna się bronić. A może po prostu chodzi o siłę odrzutu – nie wiadomo, w jakim stopniu mrówki kontrolują swoje ruchy. Czasami, jak mówi Sheila Patek, wydaje się, że po prostu „zdarza im się wpadka, gdy atakują ofiarę i nagle coś wyrzuca je do tyłu w powietrze”.

Niemniej, nawet jeśli mrówka robi to przez pomyłkę, ten nagły ruch odrzucający mrówkę do tyłu daje nam dobrą okazję aby wprowadzić pierwsze prawo ruchu Newtona (ostatnie, z jakim będziemy mieli do czynienia; prawa ruchu, w odróżnieniu od praw termodynamiki, nie mają żadnego prequelu). To prawo, znane także jako prawo bezwładności, powiada, że jeśli suma sił zewnętrznych działających na jakiś przedmiot wynosi zero, jego prędkość nie ulegnie zmianie. Bez działania zewnętrznej siły coś, co pozostaje w spoczynku, nie zacznie się poruszać. A zatem mrówka mocno stoi na ziemi, dopóki nagle nie zamknie swoich szczęk,

uderzając nimi z ogromną siłą o ziemię. Ziemia, zgodnie z trzecim prawem Newtona, odpycha mrówkę z siłą równą sile działania mrówki, zwróconą przeciwnie. Ta siła, zgodnie z pierwszym prawem Newtona, wysyła mrówkę w powietrze – to zewnętrzna siła, która zmienia prędkość mrówki.

Podobnie, zgodnie z pierwszym prawem Newtona, przedmiot, który znajduje się w ruchu, będzie się nadal poruszał z tą samą prędkością i w tym samym kierunku, dopóki nie zadziała na niego jakaś siła. Nasz Księżyc odleciałby w przestrzeń kosmiczną po linii prostej, gdyby nie działała na niego siła przyciągania Ziemi, utrzymująca go na orbicie wokół naszej planety. Pierwsze prawo Newtona daje nam także nowoczesną definicję siły jako dowolnego zewnętrznego działania, które sprawia, że ruch, kierunek albo kształt jakiegoś przedmiotu ulega zmianie. Nawet starożytni greccy filozofowie, Arystoteles i Archimedes, do pewnego stopnia rozumieli działanie sił. Wiedzieli, że jeśli podziałamy siłą na przedmiot, którego nic nie hamuje, obiekt się poruszy. Jednak ich rozumienie ruchu ograniczało to, że nie znali zjawiska tarcia – siły, która powstaje, kiedy dwie powierzchnie, albo warstwy płynu, ocierają się o siebie (spotkaliśmy się z tarciem w rozdziale 1, gdy prowadziło do wzrostu energii wewnętrznej ciał, a więc ich temperatury, podczas wiercenia otworu w mosiężnym walcu). Ci wybitni myśliciele sądzili więc, że aby utrzymać coś w ruchu, trzeba nieustannie działać na to pewną siłą, podobnie jak koń ciągnący wóz. Grecy nie uświadamiali sobie, że poruszaniu się wozu przeciwdziałają inne siły: tarcie zewnętrznej powierzchni kół o ziemię oraz tarcie wewnętrznych powierzchni kół o osie wozu. W idealnych warunkach, na idealnie gładkiej, wolnej od jakiegokolwiek tarcia tafli lodowiska hokejowy krążek ślizgałby się ze stałą prędkością w tym samym kierunku bez potrzeby przykładania dodatkowej siły, dopóki nie uderzyłby w bandę na skraju lodowiska. Takie niemal idealne

warunki można zaobserwować w przestrzeni kosmicznej, na przykład w filmie *Grawitacja*, gdy Sandra Bullock unosi się wdzięcznie w przestrzeni w swoim kostiumie, zataczając kręgi ze stałą prędkością obrotową, ponieważ nie działają na nią żadne dodatkowe siły zewnętrzne, a twórcy filmu, dla dobra estetyki, najwyraźniej rozmyślnie pominęli to, że astronauta noszą pieluchy.

Wróćmy do rzeczywistości: pierwsze, drugie i trzecie prawo Newtona zapewniają mrówce z rodzaju *Odontomachus* siłę, z jaką zamyka szczęki, oraz powodują ruchy, nad którymi nie zawsze potrafi zapanować. Nic jednak nie wskazuje na to, aby gekon nie panował nad swoimi ruchami, kiedy przechadza się tam i z powrotem po suficie. Nawet jeśli się od niego oderwie, potrafi złapać się jedną stopą powierzchni i utrzymać swoje ciało. Niewielkie siły, jeśli działają wspólnie, także potrafią pokazać swoją moc.

Lepki gość

Kiedy podczas urlopu na Mauritiusie zmierzacie po kolacji do swojego pokoju, czując jeszcze na skórze ciepło słońca, nad waszą głową po suficie przemykają nieduże jaszczurki o wielkich oczach i cętkowanym ciele, mniej więcej po jednej na każdą lampę. Są znacznie mniejsze niż waran z Komodo i nic wam z ich strony nie grozi. To gekony, które polują na owady skuszone przez sztuczne słońce lamp. Ale jak to się dzieje, że te jaszczurki rzucają wyzwanie grawitacji i biegają po suficie w stylu Spidermana?

I w jaki sposób potrafią przyklejać się do pni drzew i powierzchni liści podczas deszczu? Żyją bowiem w tropikach, a tam często pada. Właśnie to pytanie zainteresowało Alysę Stark, obecnie z Uniwersytetu Louisville w USA, gdy podjęła studia doktoranckie na uniwersytecie w Akron. To była

duża zmiana w jej życiu, ponieważ karierę naukową zaczęła od badania wpływu odżywiania się toksycznymi algami, podczas tak zwanego czerwonego przypływu, na pamięć lwów morskich. Roztargniony lew morski może bowiem zapomnieć, że już spotkał wcześniej jakiegoś osobnika, i zareagować na niego agresją, a wtedy obaj ponownie muszą ustalić swoją pozycję w hierarchii, dochodząc do porozumienia, który z nich jest samcem alfa. „Kiedy zaczynałam te badania, największa różnica polegała na tym, że mogłam wziąć gekona do ręki – opowiada badaczka. – Wcześniej byłam przyzwyczajona do siedzenia na grzbiecie zwierzęcia, które badam, i wspierania na nim całego ciężaru swojego ciała”.

Gekony toke (*Gekko gecko*) także potrafią być agresywne – to jeden z bardziej wojowniczych gatunków. „Łatwiej pracować z takimi niż z tymi, które są płochliwe i uciekają – mówi Alyssa Stark. – Ci goście po prostu tam siedzą i w pewnym sensie na ciebie szczekają, próbując cię ugryźć, ale łatwiej z nimi pracować niż z dezerterami”. Gekon ratujący się ucieczką ma przed sobą znacznie więcej możliwości do wyboru niż człowiek – może wspiąć się na ścianę i czmychnąć po suficie. Zespół Alyssy Stark ma długą tyczkę z pętlą na końcu, służącą do delikatnego zbierania zbiegłych zbyt daleko osobników, ale są miejsca w laboratorium, których nie można osiągnąć nawet tyczką.

Normalnie gekony nie mieszkają w laboratoriach, badaczka pojechała więc na Bali, aby przyjrzeć się gekonom toke w naturze. „Wydają dźwięk, który brzmi trochę jak *tokay-tokay*, stąd wzięła się ich nazwa – wyjaśnia. – Słyszałam, jak się nawołują, i dzięki temu mogłam niektóre zlokalizować, ale nie zawsze się udawało. Siedzą zwykle blisko, w jakimś wysoko położonym miejscu, a kiedy podchodzisz, chowają się”.

Klejenie się wokół

Zanim zajmiemy się odpowiedzią na pytanie, w jaki sposób gekony radzą sobie z mokrymi powierzchniami, przyjrzyjmy się, jak wiszą na suchych. Tak, znowu wszystko sprowadza się do fizyki. Eksperymenty Kellar Autumn z Lewis and Clark College w USA przeprowadzone w 2002 roku wykazały, że gekon wykorzystuje oddziaływania van der Waalsa, niewielkie siły przyciągania między cząsteczkami. Te siły, nazwane na cześć holenderskiego fizyka Johanna Diderika van der Waalsa (1837–1923), działają jak minigravitacja. Trochę to skomplikowane, ale siły te powstają dlatego, że każda cząsteczka składa się z elektronów poruszających się po przypadkowych orbitach. Te przemieszczające się ładunki wytwarzają pola elektryczne, które mogą na pewien czas przyciągać inne cząsteczki znajdujące się w pobliżu.

Ponieważ oddziaływania van der Waalsa powstają za sprawą słabo naładowanych elektronów, same także są słabe. Zwykle mogą wytwarzać energię adhezji – to miara tego, jak bardzo cząsteczki pragną trzymać się razem – o wartości 50–60 milidżuli na metr kwadratowy. W jaki sposób zatem siły van der Waalsa mogą przeciwdziałać grawitacji w przypadku gekona, który waży około 100 gramów? Tu pojawia się kolejny szkopuł. Siły van der Waalsa działają na odległość mniejszą niż 10 nanometrów. To mniej niż rozmiary wirusa, a zatem gekon musi mocno przyciskać stopy do powierzchni, na której stara się utrzymać; cząsteczki jego skóry i cząsteczki sufitu muszą znaleźć się bardzo blisko siebie, aby móc się przyciągać. Aby to osiągnąć, takie gatunki jak gekon toke mają na stopach mięsiste fałdy, znane jako lamelle, pokrywające dolną powierzchnię ich stóp. W rezultacie powstaje coś, co przypomina bieżnik opony, z fałdami pokrywającymi powierzchnię każdego palca gekona. Mimo swoich mięsistych stóp gekon

toke jest piękny. Ma ogromne oczy o pionowych źrenicach i jasnoniebieskie albo szare ciało usiane mnóstwem żółtych, pomarańczowych albo jasnoczerwonych kropek, zupełnie jakby namalował go jakiś puentylista po zażyciu kwasu.

Każda lamella jest pokryta krótkimi włoskami, znanymi jako *setae*, które mają mniej więcej 5 mikronów szerokości (0,005 milimetra) i nieco ponad 100 mikronów długości. „Mamy tutaj pojedynczy włoszek z licznymi odgałęzzeniami – wyjaśnia Alyssa Stark. – Odgałęzienia kończą się płaskimi szpatułkami (*spatulae*); te zakończenia nie dość, że umożliwiają gekonowi naprawdę bliski kontakt z powierzchnią, do której przylega, to jeszcze dają mu mnóstwo takiego kontaktu”. Każda szpatułka, zwykle o kształcie trójkąta, ma 0,2 mikrona szerokości i 0,2 mikrona długości. Każda *seta* (włoszek) może zawierać od 100 do 1000 takich zakończeń.

Gekon toke ma w sumie około 6,5 miliona *setae*. W teorii 2 do 20 mikronów kwadratowych powierzchni *spatulae*, znajdujących się na każdym z tych włosków, daje siłę adhezji rzędu około 0,000 040 niutona (40 μ N, mikroniutonów), jeśli liczyć przy odrywaniu każdej z *setae* od powierzchni, oraz około 200 μ N, jeśli się po niej przesuwa. Każda z tych mikrowartości ma swoje znaczenie. Skoro włosków jest tak wiele i na każdym są liczne *spatulae*, całkowity obszar kontaktu między gekonem a powierzchnią jest duży. Niewielkie siły van der Waalsa, które działają tam, gdzie cząsteczki włosków stopy gekona i powierzchnia znajdują się wystarczająco blisko siebie, także się sumują. Podczas testów gekony potrafiły wytrzymać siłę przesuującą rzędu 20–40 niutonów. A zatem gekon może utrzymać ciężar swojego ciała, który wynosi 1 niuton dla gekona o masie 100 gramów, zaledwie jednym palcem. Ale te 20–40 niutonów to znacznie mniej niż teoretyczna wartość 1300 niutonów. „Dzieje się tak przypuszczalnie dlatego, że idealny kontakt wszystkich *setae* w tym samym

czasie jest mało prawdopodobny – wyjaśnia Alyssa Stark. – W sumie, na poziomie całego zwierzęcia, wykorzystuje ono zaledwie 3 procent swoich *setae* (...), a to i tak całkiem nieźle, skoro aby utrzymać masę swojego ciała, potrzebuje mniej niż 0,04 procent!”

I to wszystko bez pomocy kleju. „W tym, co tu się dzieje, nie ma żadnej chemii – dodaje uczona. – Są tylko dwie powierzchnie, które przylegają do siebie naprawdę blisko, oraz siły, które okazują się mocniejsze przy takim bliskim kontakcie”. Badaczka gekonów porównuje tę sytuację z tym, co się dzieje, jeśli złączymy ze sobą 2 książki telefoniczne, przekładając je strona po stronie, a potem spróbujemy je rozdzielić. „Nie skleićś ich, nie spiąćś zszywaczem, nie zrobięś nic, aby mocniej przylegały do siebie, ale jeśli złożysz je w ten sposób, nie możesz ich potem rozdzielić, ponieważ uzyskałeś bardzo bliski kontakt na bardzo dużej powierzchni” – wyjaśnia.

Stopy pokryte włoskami zakończonymi płaskimi szpatułkami oznaczają także, że nie ma znaczenia, czy powierzchnia, do której gekon toke przylega, jest gładka czy chropowata. Włoski zaginają się na nierównościach albo wciskają się w otwory i szczeliny. Ponieważ siły van der Waalsa działają między wszystkimi cząsteczkami, nie ma znaczenia, z czego jest zrobiona powierzchnia. Jak ujmuje to Alyssa Stark, „zasadniczo gekon może chodzić niemal po wszystkim”. Ale z pewnym wartym uwagi wyjątkiem. Gekon toke potrafi przywierać do każdego materiału oprócz suchego teflonu. To tworzywo jest nieprzylepne nawet dla gekonów.

Co za uczucie

Chodzenie po suficie to wspaniała sztuczka, jeśli chcemy się popisać na przyjęciu, ale owady można przecież znaleźć także na poziomie gruntu.

Czemu gekon toke i inne gatunki gekonów potrzebują stopy o tak skomplikowanej budowie? Odpowiedź jest prosta: dzięki umiejętności biegania po pionowych powierzchniach, takich jak pień drzewa czy ściany, albo zwisania z gałęzi, liści i sufitu przed gekonami otwiera się środowisko, do którego nie potrafią dotrzeć inne jaszczurki: gekony zyskują dostęp do nowych rodzajów pożywienia i mogą unikać drapieżników. „Wystarczy że wejdą na górę, a będą bezpieczne – mówi Alyssa Stark. – Wcale przy tym tak często nie spadają i słyszałam, że nawet jeśli spadną, potrafią chwycić się czegoś jedną łapą i zatrzymać. Potrafią w ten sposób utrzymać ciężar znacznie większy niż ciężar własnego ciała, a to daje im ogromne poczucie bezpieczeństwa”. Niektóre gatunki gekonów ewolucyjnie rozwinęły, a potem kilkakrotnie porzuciły budowę stopy pozwalającą na przywieranie, być może w zależności od zmian zachodzących w środowisku, gdy użyteczność tej umiejętności słabła albo rosła.

Jeżeli gekon toke przywarł już stopą do jakiejś powierzchni, to w jaki sposób może następnie ją oderwać, jeśli adhezja jest tak silna? „Nie chodzi o to, żeby przykleić się tak mocno, że potem nie możesz się ruszyć i może cię zjeść jakiś drapieżnik – wyjaśnia Alyssa Stark. – To bardzo ważne, żeby móc się potem oderwać”. Gekony mają niezwykle giętkie palce, które odginają się ku tyłowi, poczynając od ich najdalej położonych czubków. My, aby to osiągnąć, musielibyśmy odginać palce płasko leżącej dłoni na zewnątrz (a nie do wewnątrz) i zwiąć tak odgięte palce w pięść. Gekon „odpina” *spatulae* i wyłącza ich siły adhezji jedną po drugiej, co łatwo osiągnąć, ponieważ pojedynczo każda z tych sił jest niewielka. „Gekony przewyższają pod tym względem kilka innych rodzajów jaszczurek, które także dobrze się kleją, przypuszczalnie właśnie ze względu na swoją zdolność do odginania palców na zewnątrz – tłumaczy badaczka. – Odrywają po kolei wszystkie palce w taki sposób, że są skierowane ku górze, a nawet do tyłu, w stronę ciała

jaszczurki”.

W tym odrywaniu się trochę pomagają palcom gekona same włoski. „Większość tych włosków jest ułożona pod kątem mniej więcej 30 stopni – mówi uczona – więc gekon dobrze trzyma się powierzchni tylko w jednym kierunku”. Gdy włoski osiągają krytyczny kąt, przy którym siły van der Waalsa przestają działać, odrywają się bardzo łatwo i szybko uwalniają całą powierzchnię palca. „Gekony muszą po prostu unieść palce i kontakt znika. Mamy tu zatem przykład substancji klejącej się, której można używać wielokrotnie i naprawdę szybko”.

Deszczowa piosenka

Pora wrócić do pytania, które Alyssa Stark stawiała sobie, robiąc doktorat: Co się dzieje, kiedy jest mokro? Ze względu na sposób działania ich stóp gekony stają wobec problemu klejenia się – czy raczej potencjalnego nieklejenia – gdy powierzchnia, po której pragną się przejść, jest pokryta jakimś płynem. „Mamy tu do czynienia z oddziaływaniem, które wymaga bliskiego kontaktu, i nawet cienka warstwa wody między palcem a powierzchnią powoduje, że siły van der Waalsa w ogóle przestają działać” – mówi badaczka.

W laboratorium naukowcy zwykle przyglądali się gekonom w warunkach wolnych od wilgoci. Alyssa Stark skupiła więc swoją uwagę na adhezyjnych umiejętnościach gekonów w sytuacji, gdy wszystko pokryte jest kropelkami wody. Jej początkowe eksperymenty wykazały, że gekony mają problem z przyleganiem do mokrego szkła. To wydawało się dość dziwne, skoro gekony w naturze na co dzień spotykają się z mokrymi powierzchniami. „Zadaliśmy więc sobie pytanie, co właściwie badamy” – opowiada. Zamiast

poddawać gekony testom na szklanej powierzchni, która jest hydrofilowa, to znaczy lubiąca wodę, „a niemal wszyscy tak robią, ponieważ łatwo ją uzyskać”, Alyssa Stark próbowała powierzchni, które nie znoszą wody, to znaczy hydrofobowych. Okazało się, że gekony „przylegają do nich równie łatwo jak w suchym powietrzu – mówi badaczka. – W mokrym środowisku chemia powierzchni zaczęła odgrywać naprawdę dużą rolę, podczas gdy w powietrzu w ogóle jest nieistotna, siły van der Waalsa zasadniczo działają niezależnie od powierzchni”.

A zatem w jaki sposób gekon przylega do mokrej powierzchni hydrofobowej? Odpowiedź kryje się w tym, co się wydarza, gdy próbujemy zmoczyć takiego gada. „Kiedy spryskujesz gekona wodą, ona po prostu od niego odpada – wyjaśnia Alyssa Stark. – Naprawdę trudno zmoczyć gekona. Poduszki jego palców są superhydrofobowe i można zobaczyć na nich kropelki wody”. Według badaczki w skrajnie wilgotnych warunkach ta sama cecha, która sprawia, że woda zbiera się na jego skórze w kropelki, powoduje, iż wokół stóp gekona tworzą się niewielkie poduszki powietrza. „Jeśli chodzisz po wodzie stopami, które są naprawdę wodzie niechętnie, masz wokół skóry bąbelki powietrza, a więc kiedy nimi naciskasz, pozostają suche i znowu mogą mieć ten bliski kontakt”.

Uczona przekonała się, że gekony toke potrafią sprawnie biegać po hydrofobowej plastikowej powierzchni, która jest pokryta kropelkami wody, jak gdyby była zlaną deszczem. Jaszczurki pokonały 2 metry po mokrej pionowej powierzchni równie szybko jak po suchej. Nawet jeśli gekon zmoczy stopy do tego stopnia, że nie będą już skutecznie przylegać, może je osuszyć, wielokrotnie przyciskając je i odrywając od powierzchni w taki sam sposób, jak gdyby czyścił się z kurzu. „Jeśli warunki mu pozwalają na odrywanie stóp, potrafi osuszyć poduszki palców szybciej, niż gdyby jedynie siedział i czekał, aż wyschną pod wpływem parowania” – mówi Alyssa Stark.

Jednak na wodolubnej (hydrofilowej) szklanej powierzchni ten system pęcherzyków powietrza nie działa. A także, co dziwniejsze, jak odkryła badaczka, gekony toke potrafią przylegać do teflonowej powierzchni tylko wtedy, kiedy jest mokra. „Nawet nie miałam ochoty robić tego eksperymentu – opowiada. – Ale jeden z magistrantów mnie namówił, żeby to zrobić dla zabawy, i wtedy ze zdumieniem zobaczyłam, że to nie tylko działa, ale wręcz działa lepiej. Nadal nie mamy pewności, czy potrafimy to wyjaśnić”.

Trzymaj się

Nic dziwnego więc, że superadhezyjne stopy gekona zwróciły uwagę naukowców starających się opracować silnie przylegające do podłoża materiały wielokrotnego użycia. Jednak na razie gekon okazuje się skuteczniejszy w wytwarzaniu gekonich stóp niż my. „Zanim zaczęłam pracować nad doktoratem, mój opiekun naukowy Ali Dhinojwala, z uniwersytetu w Akron, zaprojektował sztuczną »taśmę geko« zrobioną z węglowych włosków w nanoskali – opowiada Alyssa Stark. – Przylegała do podłoża nawet lepiej niż stopa gekona, w dodatku potrafiła sama się oczyszczać, była hydrofobowa i można jej było używać wielokrotnie. Mimo to wiązały się z nią pewne problemy: jeśli przeciągnęło się po niej w pewien sposób, węglowe włoski zaginały się i nie wracały do pierwotnej postaci. Tymczasem niewielkie włoski na palcach gekona są bardzo elastyczne i nawet po uderzeniu wracają do pierwotnego kształtu”.

Chociaż potrafimy wytwarzać cienkie jak włos struktury złożone z wielu polimerów, nadal nie umiemy odtworzyć wszystkich cech stopy gekona. „W tej chwili trudno nam zrobić jakiś krok naprzód, w stronę czegoś

w rodzaju dłoni Spidermana, która mogłaby utrzymać ciężar ciała człowieka – mówi uczona. – Prowadzimy mnóstwo badań nad zwierzętami, ponieważ trochę utknęliśmy w kwestii materiałów”.

Mimo to w 2012 roku amerykańska Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA – Agencja Zaawansowanych Projektów Badawczych w Obszarze Obronności) ogłosiła, że w ramach projektu *Z-Man* ważący 100 kilogramów mężczyzna wspiął się na ośmiometrową szklaną ścianę, używając dwu ręcznych przyssawek pokrytych substancją o nazwie *geckskin*. Struktura tego materiału, opisanego w naukowym czasopiśmie z 2012 roku, opiera się na połączeniu sztywnego podłoża z raczej dość śliską warstwą zewnętrzną, a nie z włoskami, zwiększającą obszar kontaktu z powierzchnią, po której się poruszamy. Materiał opracowano na uniwersytecie w Amherst, w Massachusetts, i wykonano w Draper Laboratory w Massachusetts. „Jeśli chodzi o *geckskin*, elegancja tego rozwiązania polega na tym, że podczas prac nad stworzeniem syntetycznych materiałów przylegających jego twórcy nie poszli oczywistą drogą szukania inspiracji w budowie stopy gekona – opowiada Alyssa Stark. – Większość badaczy opracowuje struktury włosowate umieszczone na wspierającym podłożu. Tym razem skoncentrowano się na materiale wspierającym i uzyskano gładki, przylegający kontakt. Uczni znaleźli inspirację nie tyle w strukturze włosków pokrywających palce gekona, ile ścięgien łączących lamelle w palcach. Właśnie takie niekonwencjonalne pomysły mogą popchnąć badania w naszej dziedzinie w nowych kierunkach”.

Lepka puenta

Stopy gekona nadal skrywają przed nami swoje sekrety. Jednak Alyssa Stark

znalazła trop. Pewnego dnia razem z kolegami zauważyła coś dziwnego. Coś, co sprawiło, że problem stał się jeszcze bardziej lepki. „W laboratorium było ciemno – opowiada. – Włączyliśmy więc światło, żeby oczyścić kawałek szyby, po której puszczaliśmy przedtem gekona, i wtedy zauważyliśmy niewielki ślad w kształcie odcisku stopy. A kiedy przyjrzeliliśmy się bliżej, uświadomiliśmy sobie, że to odcisk stopy jaszczurki”.

Pozostałość na szybie składała się z lipidów, naturalnych tłuszczów występujących także na powierzchni skóry gekona i wielu innych zwierząt. To było dziwne, ponieważ do tego momentu badacze sądzili, że stopy gekona przylegają do powierzchni wyłącznie dzięki siłom van der Waalsa, bez pomocy jakiegokolwiek kleistej substancji. „Stopa gekona uchodzi za suchy materiał adhezyjny wielokrotnego użycia, który nie pozostawia żadnych śladów – wyjaśnia uczona. – Jak się okazuje, technicznie rzecz biorąc, to nie jest prawda. Chociaż kiedy dotkniesz stopy gekona, nie dostrzegasz żadnego tłuszczu, który pozostałby ci na palcach, ale przypuszczalnie on tam jest”.

Nie wiadomo, czy lipidy odgrywają jakąś rolę w przyleganiu stopy gekona do różnych powierzchni, ale powstało na ten temat kilka teorii. Niewykluczone na przykład, że lipidy wspomagają adhezję albo powodują, iż włoski na stopach gekonów są czyste lub bardziej wodoodporne. „One coś po sobie zostawiają, kiedy przylepiają się do powierzchni, więc może bez tego czegoś robiłyby to lepiej albo gorzej – opowiada Alyssa Stark. – Naprawdę nie wiemy”. Zrozumienie, jaką rolę odgrywają lipidy na stopach gekonów, może ułatwić naukowcom projektowanie dobrze klejących się materiałów. „Adhezyjny system gekona ma mnóstwo wspaniałych cech, których nie potrafimy jeszcze odtworzyć – wyjaśnia badaczka. – Te lipidy mogą stanowić klucz do którejś z tych właściwości. Naprawdę sądzimy, że może się kryć w tym coś interesującego”. Pozostawiamy was z tym śladem.

Migawka

Waran z Komodo kompensuje niedużą siłę swojego ukąszenia siłą mocnego karku i korpusu. Komary wykorzystują przyspieszenie i pęd, aby wyjść cało ze zderzenia z kroplami deszczu. Rawka błazen stosuje ogromne przyspieszenie, aby z wielką siłą rozbijać skorupy krabów zgodnie z eleganckim drugim prawem Newtona ($F = m \cdot a$) i otrzymuje ze strony ich skorupy odpowiedź zgodną z trzecim prawem Newtona, ratując się przed następstwami działania tej siły dzięki sprytnej budowie kości swoich pałek. Mrówki z rodzaju *Odontomachus* przy ogłuszaniu swojej ofiary (która rozpyła substancje chemiczne) także wykorzystują ogromne przyspieszenie, używając wzmocnienia mocy, dzięki któremu mogą wyzwolić cios szybciej, niż mogłyby to zrobić wyłącznie za pomocą swoich mięśni. Gekony tymczasem sumują mnóstwo małych sił van der Waalsa, aby przyklejać się do sufitu. Potrafią na nim siedzieć nawet wtedy, kiedy jest mokry. To zaś gładko pozwala nam przejść do tematu następnego rozdziału. Płynów.

[3] Po angielsku waran to „smok z Komodo”, *Komodo dragon*.

[4] Polisacharydu będącego pochodną chityny.

ROZDZIAŁ 3



PŁYNY

GDY RZECZY STAJĄ SIĘ LEPKIE

**Owady, które chodzą po wodzie – Koty oszukujące grawitację –
Podstępne koniki morskie – Pszczoły rzucające wyzwanie
konwencji – Pterozaurowi na krawędzi**

Chodzenie po wodzie

Czy gdybyście nie umieli pływać, próbowalibyście nauczyć się tego z książki?

Większość z nas nie podjęłaby takiego ryzyka. Poszlibyśmy raczej na lekcje pływania na basenie, pod okiem wykwalifikowanego instruktora, lub użyli dmuchanych rękawków. Ale niemiecki fizyk teoretyczny Theodor Kaluza (1885–1954) nie należał do ludzi, którzy mają czas na tak nudne zajęcia. Kaluza, który zapisał się w pamięci potomnych głównie ze względu na swoje szalone koncepcje pięciowymiarowego świata, był tak mocno przekonany o sile wiedzy teoretycznej, że postanowił wszystkiego, czego powinien dowiedzieć się o pływaniu, nauczyć się z książki. Po czym pewnego dnia trzydziestokilkuletni Kaluza, przyswoiwszy sobie sążnistą porcję teorii, wskoczył po prostu do wody. I popłynął, za pierwszym razem.

Opowieść o tym wyczynie znamy jedynie pośrednio, głównie ze wspomnień syna Kaluzy, ale nie przeszkodziło to scenarzystom serialu *Teoria wielkiego podrywu* we wciśnięciu pewnej wersji tego zdarzenia do swojego telewizyjnego przeboju. Obejrzyjcie sobie trzynasty odcinek drugiego sezonu. Występujący w nim fizyk teoretyczny Sheldon (gra go Jim Parsons) opowiada, jak nauczył się pływać, czytając o tym w Internecie. Jego współlokator Leonard (Johnny Galecki) spokojnie wysłuchuje opowieści Sheldona, który przyznaje, że na razie próbował pływać jedynie na podłodze. Jednak Sheldon upiera się, że to wystarczy. „Umiejętności podlegają transferowi – wyjaśnia. – Po prostu nie mam ochoty włączyć do wody”.

Sheldon ma rację, zachowując pewną ostrożność: woda rzeczywiście może być niebezpieczna. Gdyby Kaluza nie zdołał opanować umiejętności

pływania, skierowana ku dołowi siła ciężenia działająca na jego ciało przeważałaby siłę wyporu, z jaką działała na nie woda, równą ciężarowi wypartej wody – na co wpadł już grecki uczyony Archimedes w III wieku p.n.e. A wtedy Kaluza poszedłby na dno, pozostawiając potomnym swoje pięciowymiarowe myśli. Ponieważ jednak nauczył się pływać, użył swoich mięśni, aby odpychać wodę w dół i ku tyłowi, wytwarzając siłę o przeciwnym zwrocie, zgodnie z trzecim prawem Newtona (zob. rozdział 2). Dzięki tej sile, działającej ku górze i do przodu, nie utonął i mógł poruszać się naprzód.

Jednak niektóre zwierzęta żyjące w pobliżu wody obywają się bez umiejętności pływania. Wystarczy, że kucniemy na brzegu jeziora: jeśli uważnie przyjrzymy się jego powierzchni, zobaczymy owada, który chodzi po wodzie. To jeden z wielu przedstawicieli nartnikowatych, rodziny, do której należy ponad 1700 gatunków. Owad – obdarzony wąskim, czarnym albo brązowym korpusem o długości około 1 centymetra – ma 6 cienkich patykowatych odnóży, po 3 z każdej strony, i potrafi przemykać po powierzchni wody z prędkością dobrze ponad metra na sekundę (około 3,2 km/h).

Kiedy przyjrzymy się takiemu owadowi, gdy stoi bez ruchu na tafli jeziora, zauważymy, że dolna część jego odnóży leży płasko na powierzchni wody, robiąc w niej niewielkie wgłębienia, podobnie jak kula do kręgli leżąca na materacu. Ta umiejętność, sprawiająca, że utrzymuje się on na powierzchni wody i nie tonie, przydaje się jednemu z nartnikowatych, na przykład w chwili, gdy zauważy pająka, który wylądował nieopodal. Pająk jest zbyt ciężki i nie ma odpowiedniego rodzaju odnóży, nie potrafi więc chodzić po wodzie, nasz nartnikowaty ma więc czas, aby podbiec do pająka, chwycić go szczypcami znajdującymi się na przedniej parze odnóży i wyssać pyszności, które znajdzie w środku.

Niezależnie jednak od tego rodzaju nieapetycznych zachowań nartnikowate zdobyły rozmaite nazwy, jakie im nadano, nie bez powodu. Mówi się o nich, że kroczą po wodzie, biegają po wodzie, ślizgają się, muskając jej powierzchnię. To prawdziwa elita. Tylko 0,1 procent owadów to potrafi. Niektórzy nazywają je nawet żukami Jezusa, choć nie potrzeba cudów, aby wyjaśnić, dlaczego nartnikowate nie toną. Wystarczą zwykłe prawidłowości fizyki i odrobina wiedzy dotyczącej tematu tego rozdziału, czyli płynów.

Płynne myślenie

Kiedy uczeni mówią o płynach, mają na myśli zarówno ciecze, jak i gazy. Czasami trudno odróżnić jedno od drugich. I te, i te płyną. W obu przypadkach wypełniają sobą naczynie, w którym się znajdują. Nie stawiają też większego oporu, kiedy się na nie naciska. Można powiedzieć, że różnica między cieczami a gazami jest dość płynna. Istnieją jednak między nimi pewne różnice. Gaz można sprężyć (przypomnijcie sobie pompowanie opony w samochodzie), ale nie da się tego zrobić z cieczą. Ciecze są także znacznie gęstsze niż gazy. Litry soku pomarańczowego waży około kilograma, ale litr powietrza waży zaledwie 1 gram. W dodatku ciecz ma powierzchnię, podczas gdy gaz jej nie ma.

Do gazów wrócimy później, żeby zobaczyć, w jaki sposób latają pszczoły i pterozaurowie, ale – podobnie jak nasz długonogi owad krocący po wodzie – najpierw musimy trochę lepiej zrozumieć, jak się zachowują płyny, a ściślej biorąc, woda. To najobficiej występująca ciecz na Ziemi, pokrywająca 70 procent powierzchni naszej planety. A także substancja dość zdumiewająca, mimo swojej prostej struktury: stanowi zbiór cząsteczek

o kształcie litery V, składających się z zaledwie jednego atomu tlenu połączonego z dwoma atomami wodoru, co wyrażamy chemiczną formułą H_2O . Woda jest niemal idealnym płynem, przynajmniej z punktu widzenia fizyki – nie dlatego że fizycy wolą się napić raczej wody niż czegokolwiek innego, ale dlatego że woda płynie w wyjątkowo prosty sposób. Nieważne, jak szybko ją zamieszamy, jej lepkość będzie zawsze taka sama. Pierwsze poważne badania nad takimi płynami podjął nasz dobry znajomy Isaac Newton, i dlatego na jego cześć nazywamy je płynami newtonowskimi.

Jednak nie wszystkie płyny są newtonowskie. Ketchup na przykład płynie szybciej, jeśli mocniej na niego naciskać. To dlatego bez trudu wylewa się z plastikowego pojemnika, który możemy ścisnąć, ale tak strasznie trudno go wydobyć ze sztywnej szklanej butelki (i dlatego musimy walić w jej denko wnętrzem dłoni, dopóki nas ręka nie zaboli). Innym nienewtonowskim płynem jest żel do włosów. W 99 procentach składa się z wody, a jednak nie można go tak po prostu wylać. Niemniej lepiej się nie spierać w tej sprawie z ochroną na lotnisku, bo możemy się spóźnić na lot. Przypominamy, że nie wolno przemycać w bagażu podręcznym na pokład samolotu żelów do włosów, do rąk, do ust ani jakichkolwiek innych. To samo dotyczy pasty do zębów i pianki do golenia, które także są płynami nienewtonowskimi.

Zwierzęta nie muszą jednak martwić się o ketchup ani żel do włosów. Wróćmy więc do wody. Powiedzieliśmy, że jest płynem idealnym, ale dotyczy to tylko tego, w jaki sposób płynie. Pod innymi względami woda jest dziwna. Pomyślmy choćby o jej gęstości. Gęstość ciał stałych zwykle zmniejsza się po ich stopieniu, ponieważ ich atomy bądź cząsteczki wyrrywają się wtedy ze sztywnej struktury, która utrzymuje je na miejscu, i zaczynają się oddalać. Jednak woda w stanie płynnym ma większą gęstość niż lód i dlatego góry lodowe pływają, o czym tak boleśnie przekonali się pasażerowie Titanica. Woda przewodzi także ciepło szybciej niż jakakolwiek

inna zwykła ciecz. To dlatego tak prędko robi nam się tak zimno, kiedy wskoczmy do zimnego basenu (zob. rozdział 1). Poza tym woda ma też ogromną pojemność cieplną, a to oznacza, że może wchłonąć mnóstwo ciepła, sama nie rozgrzewając się zbytnio. Pomyślmy, ile czasu musi upłynąć, zanim uda nam się coś zagotować w rondelku – po prostu wieczność. Zwłaszcza jeśli na to patrzymy.

Jednak żadna z tych cech wody nie pomaga jakoś szczególnie nartnikowatym. Tajemnica ich umiejętności kryje się w sile, z jaką woda odpycha owada swoją powierzchnią przypominającą pod tym względem trampolinę. W głębi każdego płynu każda cząsteczka jest otoczona ze wszystkich stron przez inne cząsteczki, które przyciągają ją tak samo we wszystkich kierunkach. Ale cząsteczka znajdująca się na powierzchni ma inne cząsteczki jedynie pod sobą; powyżej powierzchni jest tylko powietrze. Cząsteczka doświadcza zatem w sumie siły działającej w dół i w rezultacie cała powierzchnia staje się napięta, jak gdyby pokrywała ją naciągnięta elastyczna powłoka. Ta naciągnięta powłoka, albo inaczej napięcie powierzchniowe, występuje we wszystkich cieczach, przy czym woda ma niemal najwyższe napięcie powierzchniowe ze wszystkich. Jego wartość wynosi 73 miliniutony (mN) na metr, w temperaturze 20 stopni C – pod tym względem przewyższa wodę jedynie płynna rtęć, ale płynna rtęć nie występuje w przyrodzie. Owady z rodziny nartnikowatych potrafią wykorzystać tę elastyczną powierzchnię wody nie tylko do tego, aby nie utonąć, ale także do tego, aby zwinnie przemykać po tym najbardziej szczególnym z płynów.

Napięta sytuacja

W pierwszych latach XXI wieku John Bush, fizyk zajmujący się dynamiką płynów w Massachusetts Institute of Technology (MIT), w USA, wraz z Davidem Hu, który później przeprowadził znane nam z rozdziału 1 eksperymenty dotyczące osuszania się psów, i Brianem Chanem obliczyli siły działające na nartnikowatego owada stojącego na powierzchni wody. Podstawowe zasady fizyki powiedziały im, że owad może utrzymać się na powierzchni jakiejś cieczy jedynie wtedy, gdy jego ciężar (działająca w dół siła grawitacji) jest mniejszy niż siła ze strony cieczy o przeciwnym zwrocie, czyli skierowana ku górze. Jeśli owad waży więcej niż siła działająca ku górze, tonie. To zaś oznacza, że nartnikowaty, jeżeli chce zasłużyć na swoją nazwę chodzącego po wodzie, musi się postarać, aby siła działająca ku górze była możliwie jak największa.

Jakie stoją przed nim możliwości? Jak zauważył Archimedes, siła wyporu działająca na przedmiot zanurzony w cieczy jest równa ciężarowi wypartej wody. Jednak w przypadku obiektu, który znajduje się na powierzchni cieczy, w grę wchodzi inne reguły. Siła działająca ku górze zależy wtedy od trzech czynników: napięcia powierzchniowego cieczy, długości przedmiotu oraz maksymalnego kąta (w stosunku do poziomu), pod jakim przedmiot przebija powierzchnię cieczy. Aby uzyskać możliwie największe podparcie, nartnikowaty musi zmaksymalizować wszystkie trzy wartości. Owad nie może jednak dostosować do swoich potrzeb napięcia powierzchniowego wody, które ma wartość stałą, choć niewątpliwie sprzyja mu to, że akurat dla wody jest takie duże. Sekret umiejętności chodzenia po wodzie kryje się więc w jego sześciu długich pałkowatych nogach, które zginają się w połowie. Ich zakończenia leżą płasko na powierzchni wody niczym swego rodzaju narty wodne. W przypadku większości nartnikowatych ta część jego kończyny ma długość 1 centymetra, zwiększając w sumie działającą na owada siłę, skierowaną ku górze, znacznie powyżej jego całkowitego ciężaru.

Rezultat: nartnikowate nie toną. Dobrze jednak mieć w zapasie solidny margines bezpieczeństwa. Największe z nartnikowatych, *Gigantometra gigas*, lokują się blisko wartości granicznych. Przy masie około 3 gramów – są prawie tysiąc razy cięższe niż najmniejsze gatunki – mają odnóża o długości prawie 20 centymetrów, dzięki czemu mogą wytworzyć wystarczająco dużą siłę działającą ku górze i utrzymać się na powierzchni wody. To prawdziwie długonogi gość.

Przypnij narty

Dzięki napięciu powierzchniowemu nartnikowate potrafią utrzymać głowę i resztę ciała na powierzchni, ale w jaki sposób ślizgają się po wodzie? Aby poruszać się naprzód, musimy się od czegoś odbijać – to znów trzecie prawo Newtona, które mówi, że jeśli przyłożymy do jakiegoś ciała pewną siłę, będzie ono odpowiadało siłą równej wielkości, o przeciwnym zwrocie. Ludzie i inne zwierzęta lądowe bez trudu poruszają się naprzód, ponieważ pod stopami mają solidne podłoże. O wiele trudniej jest pływać bądź wiosłować, ponieważ nasze nogi i ręce lub wiosła muszą odepchnąć ku tyłowi pewną ilość wody, by uzyskać przyspieszenie w ruchu naprzód. W dodatku woda jest bardziej gęsta niż powietrze, więc w ogóle trudniej się w niej poruszać. Jednak wodny ślizgacz z rodziny nartnikowatych może jedynie odbijać się od powierzchni wody. W jaki sposób zyskuje odpowiedni impuls? I jak to się dzieje, że porusza się naprzód, a nie do góry?

Żeby się tego dowiedzieć, wystarczy przyjrzeć się jednemu z nartnikowatych, gdy ślizga się po wodzie. Zobaczymy wtedy, że pozostawia za sobą na jej powierzchni niewielkie bruzdy. Uczni sądzą, że właśnie te fale kapilarne, powstające pod wpływem ruchu odnóży

zwierzęcia, popychają owada naprzód. Ale w 1993 roku biolog Mark Denny z Uniwersytetu Stanforda w Kalifornii zauważył coś dziwnego. Aby wytwarzać takie fale, wodny ślizgacz musiałby poruszać się szybciej niż 25 centymetrów na sekundę – to najniższa prędkość, z jaką fala wędruje po powierzchni cieczy. Duże nartnikowate, o długich nogach, z pewnością mogą poruszać się tak szybko, ale małe osobniki, owadzie dzieci, poruszają się znacznie wolniej. Jak to się dzieje, że te maluchy także potrafią chodzić po wodzie?

„Przeczytałem kiedyś w książce Denny’ego o jego paradoksie i pomyślałem, że mogę to wyjaśnić” – wspomina Bush, mając na myśli zagadkę poruszania się owadzych osesków. I tak w 2003 roku Bush, Hu i Chan zebrali trochę nartnikowatych z miejscowych stawów. Te owady rozmnażają się co kilka tygodni, więc trzej badacze mieli idealne warunki do tego, aby sfilmować małe nartnikowate w chwili, gdy stawiały pierwsze kroki na wodzie. Umieścili najmniejsze z nich w niewielkim akwarium, po czym kamerami filmowymi, działającymi z wielką prędkością, starali się sfilmować popisy tych zwierząt. Do wody dodawali barwnik spożywczy, dzięki czemu mogli zaobserwować, w jaki sposób porusza się przy tej okazji sama woda.

Ku zaskoczeniu badaczy ruch zabarwionej wody pokazał, że jednodniowe nartnikowate, podobnie jak osobniki dorosłe, poruszają się, używając środkowej pary swoich odnóży niczym wiosł w łodzi wiosłarskiej. Ale poruszają się za wolno, aby wytwarzać fale kapilarne. Zamiast fal małe owady tworzą w wodzie niewielkie zawirowania, które przesuwają się ku tyłowi pod powierzchnią wody. Wir to region obniżonego ciśnienia w cieczy; możemy sami coś takiego zaobserwować, jeśli wyjmujemy korek w wannie pełnej wody albo tak zamieszamy nożem gęstą kawę w filiżance, że płyn zacznie poruszać się po okręgu wokół krawędzi ostrza. Ale w odróżnieniu od

ryb, które pływają, wytwarzając wiry sferyczne, nartnikowate wytwarzają wiry półsferyczne. Płaska część takiego półkolistego wiru, o średnicy około 8 milimetrów, leży równolegle do powierzchni wody, tuż pod nią, a zatem półkula jest skierowana ku dołowi. A ponieważ te wiry poruszają się ku tyłowi, mają wystarczająco duży pęd, aby popychać owady do przodu podobnie jak rakieta, która wznosi się w górę, wypluwając strumień gorącego gazu. Nartnikowate są tak skutecznymi wiosłarzami, że potrafią dzięki jednemu pociągnięciu swoich „wioseł” pokonać drogę równą od 10 do 15 długości swojego ciała. To tak, jak gdyby wiosłarze siedzący w dwudziestometrowej ósemce przy każdym uderzeniu wiosła pokonywali odległość prawie 300 metrów. Mimo wcześniejszych obliczeń Denny’ego eksperymenty Busha wykazały, że fale kapilarne rzeczywiście trochę pomagają nartnikowatym – zarówno oseskom, jak i dorosłym osobnikom – w poruszaniu się, jednak w znacznie mniejszym stopniu niż wytwarzane przez nie wiry. I znów można to przyrównać do pływania łodzią wiosłarską – wprawdzie robisz fale, ale ruch do przodu zawdzięczasz głównie temu, że odpychasz wiosłami wodę do tyłu.

Zaintrygowani tymi obserwacjami Bush i jego dwaj koledzy postanowili odtworzyć sposób poruszania się owadów po wodzie, używając mechanicznego nartnikowatego, nieco większego niż w rzeczywistości. Nazwali go Robostrider (Robochodziarz), niemniej ta bestia nie jest aż tak groźna, jak mogłoby się wydawać. Ma około 9 centymetrów długości, korpus z aluminiowej blachy wyciętej z puszki po napoju gazowanym i odnóża ze stalowego drutu. Badacze napędzali swojego Robostridera, wykorzystując elastyczną nić wyciągniętą ze skarpetek sportowych, umieszczoną wzdłuż korpusu i połączoną z każdą z jego nóg dźwignią. Robostrider, ważący zaledwie 0,3 grama, zachowywał się jak prawdziwy nartnikowaty chodzący po wodzie. Jego ciężar był całkowicie utrzymywany na powierzchni wody

dzięki napięciu powierzchniowemu. To sztuczne stworzenie poruszało się do przodu tak samo jak jego rzeczywisty odpowiednik, wiosłując środkowymi odnóżami, aby wytworzyć półsferyczne wiry. Przy każdym uderzeniu swoich nóg-wioseł pokonywał odległość równą mniej więcej połowie długości swojego ciała – osiągając prędkość około 18 centymetrów na sekundę (mniej więcej jedna piąta prędkości prawdziwego owada). „Poruszał się dość niezdarnie, jak wodny ślizgacz, który włożył kolczugę – opowiada Bush. – Chociaż to i tak nie najgorzej jak na stworzenie zrobione ze skarpetki i puszki po napoju gazowanym”.

Wielki włoski uczony i artysta Leonardo da Vinci (1452–1519) zastanawiał się kiedyś, czy moglibyśmy chodzić po wodzie, wkładając na stopy ogromne pływaki i używając dwu tyczek dla utrzymania równowagi. Leonardo, który nie zdawał sobie sprawy z istnienia napięcia powierzchniowego, nie wyszedł w tych pomysłach poza kilka szkiców, ale po dokonaniu odpowiednich obliczeń można powiedzieć, że aby wykorzystać napięcie powierzchni wody, musielibyśmy nosić buty o średnicy około kilometra. Rozwiązanie niezbyt praktyczne. Nawet nieustraszony Kaluza nie mógłby chodzić w czymś takim po wodzie, i to niezależnie od ilości przyswojonej teorii.

Kotek pije mleczko

Nartnikowate powinny się cieszyć, że woda ma tak duże napięcie powierzchniowe. Dzięki temu nie toną i mogą pomykać naprzód po powierzchni stawów i jezior. Ale wodne ślizgacze to powierzchniowe typy. Większość zwierząt wchodzi z wodą w znacznie głębsze związki. Ryby na przykład w niej pływają, wchłaniając rozpuszczony w wodzie tlen.

Hipopotamy prowadzą podwójne życie. Nocą pasą się na łądzie, ale dni spędzają w rzekach, wypływając jedynie co kilka minut na powierzchnię, żeby zaczerpnąć oddechu. Co najważniejsze, ssaki i ptaki nie przetrwałyby, gdyby nie mogły wchłaniać wody do swojego organizmu. Nawet koty co jakiś czas muszą się napić, mimo swojej znanej awersji do mokrych klimatów.

Czy kiedykolwiek choć przez chwilę zastanawialiście się, jak właściwie pijecie? Dla nas to łatwe. Trzeba napełnić szklankę wodą z kranu, chwycić kubek z kawą albo nalać sobie soku pomarańczowego z lodówki. A potem wystarczy unieść naczynie do warg i wlać sobie płyn do ust. Oczywiście wszystko bez nieprzystojnych odgłosów, żadnego siorbania. Tylko inni tak robią. Mamy nawet dwie techniki ratunkowe. Po pierwsze, dysponujemy wyposażeniem rezerwowym w postaci policzków, możemy więc wytworzyć w ustach częściową próżnię, kiedy wciągamy coś, ssąc, jak choćby gdy sączymy sobie koktajl przez słomkę. Ciśnienie w naszych ustach jest niższe niż na zewnątrz i ta różnica, przeciwdziałając sile ciężkości, wciąga płyn wprost do naszych ust. Zupełnie jakbyśmy mieli mały, osobisty odkurzacz. Druga metoda, przyznajmy: raczej dość odstręczająca, polega na tym, żeby włożyć sobie do ust rurkę, na końcu umieścić lejek i poprosić przyjaciela o wlanie płynu do środka. Teraz wystarczy pochylić głowę do tyłu, a ciśnienie kolumny cieczy zmusi płynną substancję do wpłynięcia nam do gardła – idealna metoda dla studentów, którzy pragną możliwie jak najszybciej wypić jak najwięcej piwa podczas pijackich wyścigów pod hasłem: kto więcej wypije (w każdym razie tak nam opowiadano).

Inne zwierzęta muszą jednak zadowolić się bieżącą wodą, a nie piwem. A ponieważ można ją znaleźć głównie w stawach, jeziorach, kałużach albo strumieniach, rozwinęły rozmaite strategie picia. Świnie, owce i konie pod tym względem przypominają ludzi – mają w pełni rozwinięte policzki i mogą

pić, wysysając wodę. Żaby absorbują wodę przez skórę, podczas gdy żyjący na pustyni szczuroskoczek zmienny (*Dipodomys merriami*) wydobywa ją wyłącznie z pożywienia, nawet jeśli nie brakuje mu świeżej deszczówki. Kolibry zanurzają język w nektarze, a lepki płyn posuwa się w górę rowkami na ich języku niczym atrament nasączający bibułę. Natomiast pewien żuk z pustyni w Namibii (*Stenocara gracilipes*), żyjący w jednym z najbardziej suchych miejsc na Ziemi, zbiera wodę z mgły napływającej każdego ranka znad Oceanu Atlantyckiego. Chrząszcz ustawia się od kątem 45 stopni do powierzchni ziemi i czeka, aż mikroskopijne kropelki wody wylądują mu na grzbiecie, zbiorą się w większą kroplę i w końcu spłyną do otworu gębowego.

Ale miało być o kotach. Jak piją koty? To pytanie było latami ignorowane przez badaczy uganiających się za ponoć ważniejszymi sprawami, takimi jak poszukiwanie bozonu Higgsa czy projektowanie pióra, którym da się pisać w przestrzeni kosmicznej. Problem po części bierze się stąd, że kot tak szybko porusza językiem z góry na dół, że nie sposób gołym okiem dostrzec, co się tam dzieje. Da się to zobaczyć jedynie dzięki obrazom filmowym nakręconym z ogromną prędkością, przy czym pierwszą w dziejach próbę sfilmowania pijącego kota podjęto w 1940 roku w hollywoodzkim filmie dokumentalnym *Quicker'n a Wink*. Na filmie widzimy amerykańskiego inżyniera Harolda Edgertona (1903–1990), który demonstruje możliwości opracowanej przez siebie fotografii stroboskopowej. Dziewięciominutowy film rok później zdobył Oscara w kategorii: najlepszy film krótkometrażowy mieszczący się na jednej rolce. Metoda Edgertona pozwala rejestrować na taśmie filmowej szybko dziejące się wydarzenia dzięki rozbłyskom światła emitowanym z wybraną częstotliwością. Jeśli będzie na przykład migało w tempie 2 tysięcy razy na sekundę, można zarejestrować film o prędkości 2 tysięcy klatek na sekundę. O ile wasza kamera potrafi rejestrować obraz tak

szybko. Kamera Edgertona to umiała.

Film *Quicker'n a Wink* wprowadził widzów w prawdziwe zdumienie, pokazując po raz pierwszy w dziejach w zwolnionym tempie obraz szybko zachodzących zdarzeń, takich jak pęknięcie bańki mydlanej czy lot piłki golfowej, która przebija na wylot książkę telefoniczną. Film zademonstrował także, jak przez odpowiedni dobór tempa migania światła można wywołać wrażenie, że obracający się wentylator elektryczny stoi w miejscu – wystarczy, żeby światło rozbłyskiwało dokładnie w tempie obrotów wirnika. Na filmie można także zobaczyć, co się dzieje z jajkiem spuszczone na blaszki obracającego się wentylatora – co zaskakujące, jajko najpierw kilka razy odbija się od wirnika, zanim rozpadnie się na kawałki. I właśnie w tym zabawnym dokumencie znalazła się także dwudziestosekundowa sekwencja pokazująca pijącego kota – zbyt krótka, by uznać ją za materiał o charakterze naukowym.

Świat musiał więc czekać prawie 70 lat na pierwsze poważne badania w tej dziedzinie. W jaki sposób kotek pije mleczko? Wszystko zaczęło się pewnego ranka w 2008 roku, gdy Roman Stocker – inżynier pracujący wówczas w MIT i zajmujący się sprawami środowiska – gapił się przy śniadaniu na swojego szarego kota o imieniu Cutta Cutta. Zaintrygowany metodą kociego picia, postanowił przynieść ze swojego laboratorium nowoczesną kamerę, godną XXI wieku, szybko rejestrującą obrazy, i sfilmować moment, gdy Cutta Cutta chłepce wodę z miseczki. Okazało się, że był to natchniony moment w dziejach kudłatej nauki.

Wychłęptać to

Koty mają policzki zbudowane mniej więcej tak jak my, ale nie do końca tak

samo, co oznacza, że jednak nie mogą po prostu objąć wargami jakiegoś przedmiotu, aby wysysać płynu. „Koty to mięsożercy i muszą szeroko otwierać szczęki, aby schwytać i zjeść ofiarę” – wyjaśnia Stocker. Podobnie jak wiele kręgowców lądowych, aby przenieść ciecz do pyszczka, używają języka. Kiedy Stocker obejrzał swoje nagranie wideo z udziałem Cutta Cutta, odkrył, na czym polega kocia metoda picia. Zwykły kot (*Felis catus*), jak zauważył uczonego, najpierw wyciąga język, potem zawija jego czubek ku dołowi, pod ostrym kątem, i wreszcie wysuwa język w stronę wody. Ale zamiast zanurzyć go w płynie, kot na moment zatrzymuje zagięty koniuszek języka na powierzchni. Siły przyciągania między cząsteczkami wody a górną powierzchnią kociego języka sprawiają, że płyn do niej przylega. Następnie kot unosi język, pociągając wodę ku górze, dzięki czemu powstaje pionowa kolumna cieczy, która wydłuża się i staje się coraz cieńsza, w miarę jak język posuwa się coraz wyżej. Kiedy język kota znajduje się z powrotem w jego pyszczku, kot zamyka szczęki, wciągając część kolumny płynu. Musi to zrobić, zanim kolumna pęknie pod wpływem siły ciężenia i kropelki płynu spadną z powrotem do miski.

A zatem proces jest trzystopniowy. Dotknij koniuszkiem języka powierzchni płynu. Unieś język do góry, aby utworzyć kolumnę płynu. Zamknij szczęki, aby zatrzymać część tej kolumny w pyszczku. Każdy z nas może zrobić taką kolumnę płynu – wystarczy dotknąć dnem łyżki powierzchni wody w misce i podnieść szybko łyżkę do góry. Na moment ujrzymy pionowy słup cieczy, choć nie będzie wyższy niż kilka milimetrów, po czym rozpadnie się i z powrotem chlupnie do miski. Kot radzi sobie lepiej w tej konkurencji ze względu na przyciągającą wodę powierzchnię swojego języka, ale i on nie może całkowicie przeciwdziałać sile ciężenia. Dlatego musi chleptać tak szybko. Po sfilmowaniu 10 różnych kotów Stocker doszedł do wniosku, że kiciuś podczas picia wysuwa języczek z pyszczka mniej

więcej 3,5 razy na sekundę i za każdym razem udaje mu się złapać około 0,14 mililitra płynu (to zaledwie jedna trzydziesta pojemności łyżeczki do herbaty). W końcu, po 3 do 17 chłepnięciach, kot połyka płyn zebrany w pyszczku.

Bycie spragnionym kotem nie jest łatwe, ale życie okazało się o wiele trudniejsze dla samego Stockera, który nieoczekiwanie znalazł się w ogniu prawdziwego naukowego darcia kotów.

Ty mały naśladowco

Aby dokładnie sprawdzić, co porabia Cutta Cutta podczas picia, Stocker postanowił odtworzyć w laboratorium mechanizm kociego picia i w tym celu wezwał na pomoc kolegów. Członkowie zespołu, Jeffrey Aristoff, Sunny Jung i Pedro Reis, umieścili nad powierzchnią naczynia z wodą okrągłe szkiełko pokryte materiałem wodolubnym (czyli takim, do którego woda chętnie przylega) – zachowującym się więc tak jak koniuszek kociego języka – a następnie podłączyli je do silnika zaprogramowanego w taki sposób, aby dysk poruszał się w górę i w dół, dotykając delikatnie powierzchni wody, po czym szybko odjeżdżał do góry; dysk zachowywał się więc dokładnie tak jak koci język. Posługując się tym zestawem, badacze mogli odtworzyć całą sekwencję ruchów języka, poruszając krążkiem z dowolnie wybraną prędkością albo podnosząc go na dowolnie wybraną wysokość. Ten kotopodobny zestaw radził sobie lepiej niż sam kot, choć Stocker, wspominając swoje testy, mówi: „Łatwiej to było powiedzieć, niż zrobić”. Po sfilmowaniu tych doświadczeń szybko działającą kamerą badacze stwierdzili, że za każdym razem gdy szklany dysk unosił się do góry, wytwarzał kolumnę wody dokładnie tak samo jak język kota. Po czym, jakies

1/20 sekundy później, szczyt kolumny odrywał się od dysku i zapadał.

Wykorzystując dane zgromadzone dzięki zestawowi z dyskiem, Stocker opracował matematyczną formułę opisującą, jak szybko kot może chłeptać w zależności od długości i szerokości swojego języka. Zgodnie z tym równaniem częstotliwość chłeptania jest proporcjonalna do pierwiastka kwadratowego wysokości, na jaką język kota wznosi się ponad powierzchnię wody, i spada o połowę wraz z podwojeniem się szerokości kociego języka. Jeśli kot będzie pił wolniej niż z tak wyliczoną prędkością, w chwili gdy wsunie język do pyszczka, kolumna płynu dawno opadnie i kiciuś wiele się nie napije. Jeśli chłępcze szybciej, nie zdoła unieść do góry zbyt wiele wody, co także nie służy zaspokajaniu pragnienia. Dlatego kot podczas chłeptania wysuwa język z odpowiednią prędkością i ten złoty środek wynosi 3,5 raza na sekundę, dzięki czemu zwierzę wytwarza przyzwoitą kolumnę płynu i jednocześnie działa wystarczająco szybko, aby schwycić ją w pyszczku, zanim ta się rozpadnie.

Jednak koty nie tak łatwo zdradzają swoje sekrety. Kiedy Michael Nauenberg, fizyk z Uniwersytetu Kalifornijskiego w Santa Cruz, dowiedział się o formule Stockera, która w 2010 roku została opublikowana w czasopiśmie „Science”, podstawił do równania faktyczne dane, aby sprawdzić wartość odkrycia. Ku swemu zaskoczeniu Nauenberg przekonał się, że jeśli to równanie jest poprawne, kot wyposażony w język o szerokości 1 centymetra, unoszący się 3 centymetry nad powierzchnię wody, powinien pić 30 razy szybciej, niż to czyni w rzeczywistości. W rezultacie Nauenberg uznał, że formuła Stockera jest błędna. Doszedł do wniosku, że błąd kryje się w przyjętym przez Stockera założeniu, że wytwarzana przez kota kolumna płynu pozostaje w miejscu, dzięki napięciu powierzchniowemu, i nie porusza się. „Jego argumentacja opierała się na niezgodnym z fizyką założeniu, że kolumna cieczy jest jakoś zamknięta – mówi. – A to ewidentnie nie jest

prawdą”. Jak zauważył Nauenberg, płyn nieustannie opada pod wpływem siły ciężenia i kolumna w miarę wznoszenia się staje się coraz cieńsza. Po uwzględnieniu tego otrzymamy inną formułę, która powiada, że idealna częstotliwość chłeptania w przypadku kota jest wprost proporcjonalna do jeden i odwrotnie proporcjonalna do pierwiastka kwadratowego wysokości, na jaką język kota wznosi się ponad powierzchnię wody. I w ogóle nie zależy od szerokości języka.

Nauenberg przekonał się, że jego równanie pasuje do pierwotnych pomiarów Stockera, które wskazywały, że kot chłepcze z częstotliwością 3,5 raza na sekundę, stanowiącą złoty środek. W 2011 roku opublikował swoje wyniki w artykule zamieszczonym w „Science”, na co Stocker i jego koledzy przysłali odpowiedź, która ukazała się w tym samym numerze. I wtedy badacze zaczęli drzeć koty. Nauenberg zgodził się z odkryciem Stockera, że częstotliwość, z jaką kot chłepcze, jest uzależniona od wypadkowej siły grawitacji (ciężaru kolumny płynu) oraz siły inercji (mówiącej o tym, jak trudno jest unieść płyn do góry), Stocker zaś dowodził, że nie ma sensu, jak zrobił to jego rywal, wstawianie liczb do opracowanej przez niego formuły, ponieważ w ścisłym sensie nie jest ona równaniem matematycznym, lecz jedynie matematyczną generalizacją (*scaling law*), która w tym przypadku nie mówi nam, jaka powinna być częstotliwość chłeptania dla danego, konkretnego kota. „Nauenberg potraktował to uogólnienie jako ścisłe równanie, czyli zrobił coś, czego nie można zrobić” – mówi Stocker.

Niemniej nie powstrzymało to Nauenberga od podania własnej wersji „tego uogólnienia”, czyli formuły wspomnianej powyżej. Jednak nie zrobiła ona wielkiego wrażenia na Stockerze. „Jego generalizacja nie jest wcale lepsza niż nasza, jak pokazaliśmy w naszej odpowiedzi” – twierdzi Stocker. Zdaniem Nauenberga komentarze Stockera i jego kolegów wskazują, że nie

zrozumieli jego zastrzeżeń, ale jeden ze współautorów tekstu Stockera, Sunny Jung, obecnie w Virginia Tech, nadal upiera się, że to jego strona miała rację.

Jak powiedzieliśmy, poleciały kłaki, nawet jeśli spory tego rodzaju stanowią istotę życia naukowego. Nie zamierzamy rozstrzygać, kto zwyciężył, mówimy jedynie, że obie strony zgadzają się co do tego, w jaki sposób kot pije: dotyka językiem powierzchni, unosi go do góry i zamyka szczękę, aby złapać w pyszczku kolumnę płynu. Spór dotyczył matematycznych detali sposobu wyliczania idealnej prędkości chleptania przy konkretnych rozmiarach kociego języka. Jeśli wydaje wam się, że koty są skomplikowane, to warto zauważyć, że jeszcze ani słowem nie wspomnieliśmy o psach, które podczas picia wsadzają po prostu język do wody i nabierają ile wlezie, jak chochlą. Psy zasadniczo nalewają sobie wodę do pyska, a nie chlepczą. To dość niechlujny proces i brakuje mu piękna oraz elegancji kociego picia. A skoro dla wielu fizyków właśnie te atrybuty teorii odgrywają kluczową rolę w badaniach i odwracają się oni od wyjaśnień zjawisk przyrodniczych, które wydają im się zbyt zawile, ogłaszamy niniejszym, że koty są najlepszymi przyjaciółmi fizyków.

Płynąc z prądem

A ponieważ to, co wchodzi, musi też wyjść, zanim zostawimy w spokoju kwestię picia, jeszcze jedna sprawa. Ile czasu zajmuje ssakowi wysikanie się? Z całą pewnością nie jest to najważniejsza kwestia we wszechświecie, w życiu i w ogóle. Jak wiadomo, odpowiedź na najważniejsze pytanie, podana przez komputer Deep Thought (Głęboka Myśl) w powieści Douglasa Adamsa *Autostopem przez Galaktykę*, to 42. Okazuje się jednak, że liczba

sekund, jakiej potrzebuje ssak, aby opróżnić swój pęcherz, równa się połowie tej wartości. To odkrycie nie miało nic wspólnego z Deep Thought – zawdzięczamy je Davidowi Hu, specjalście od osuszających się psów i wodnych ślizgaczy, który pracuje obecnie w Georgia Institute of Technology w USA. Poddawszy obserwacjom 32 osobniki należące go 16 gatunków ssaków – co można obejrzeć na filmach umieszczonych na YouTube – a także przyglądając się zwierzętom w miejscowym zoo, Hu odkrył, że wszystkie zwierzęta, ważące od 3 kilogramów do 8 ton, potrzebują około 21 sekund, aby opróżnić swój pęcherz (no, dodając czasem jakieś 13 sekund, co może się wydawać dość dużą odchyłką, ale akceptowalną, jeśli weźmiemy pod uwagę dużą różnorodność badanych zwierząt).

Słoń – największe ze stworzeń, jakim przyglądał się Hu – ma pęcherz o pojemności 18 litrów, jednak jego mocz potrzebuje tyle samo czasu na to, aby z niego wypłynąć, co mocz kota, który ma pęcherz jakieś 3600 razy mniejszy (szczury, myszy i inne małe zwierzęta wydalają mocz w postaci pojedynczych kropli, więc stosują się do nich inne zasady). Przyczyna tego, że czas sikania jest mniej więcej taki sam, ma coś wspólnego z długością moczowodu, rurki łączącej pęcherz ssaka ze światem zewnętrznym. Większe zwierzęta mają dłuższy moczowód. U słonia ma on około metra długości, u kota to zaledwie 5 do 10 centymetrów. A ponieważ ciśnienie grawitacyjne działające na płyn znajdujący się w rurze jest proporcjonalne do długości tej rury, ciecz wypływa z moczowodu szybciej w przypadku słoni (długi moczowód) niż w przypadku kotów (krótki moczowód). Większa prędkość dokładnie kompensuje posiadanie większego pęcherza (średnica pęcherza ma znaczenie jedynie w przypadku mniejszych zwierząt, które sikają po kropelce).

W uznaniu dla swoich wysiłków Hu i jego studenci dostali nagrodę IgNobel, przyznawaną za osiągnięcia, które sprawiają, że ludzie „najpierw się

śmieją, a potem zaczynają myśleć”. Konieczność szybkiego pozbycia się moczu nie jest jednak niczym zabawnym dla zwierzęcia żyjącego w naturze, które w chwili sikania jest całkiem bezbronne. Na szczęście wszystkie duże ssaki – włączając w to ludzi – sikają zaledwie 5 albo 6 razy dziennie. To znaczy, że spędzamy na tej czynności zaledwie 0,2 procent swojego życia. Rzecz jest nie tylko skuteczna, ale także daje nam mnóstwo wolnego czasu, który możemy poświęcić na wielkie myśli. Co akurat dobrze się składa, ponieważ jest jedno pytanie dotyczące płynów, które – jeśli pogłóvkujemy wystarczająco solidnie i znajdziemy odpowiedź – może przynieść nam fortunę.

Gra liczbowa

Tak, to prawda, jeśli chodzi o pieniądze. Nie ma tu żadnego podstępu, dajemy słowo. Żadnego haczyka. Nie będziecie musieli więc postawić oszczędności całego życia na giełdzie ani wysłać mailem szczegółowych danych na temat swojego konta bankowego na adres prawnika zmarłego niedawno naftowego barona z Nigerii. Jest tylko jeden drobiazg. Będziecie musieli wykazać się geniuszem matematycznym i rozwiązać jeden z najtrudniejszych problemów w nauce. A zatem zaczynamy.

Nasze dotychczasowe rozważania mogły doprowadzić was do przekonania, że wszystko, co dotyczy płynów, zostało już płynnie rozwiązane przez uczonych. Napięcie powierzchniowe? Załatwione. Pojemność cieplna? Odfajkowana. Lepkość? Kolejny ptaszek. A jednak choć rzeczywiście dobrze rozumiemy, jak się zachowują płyny, jedna sprawa wciąż spędza sen z powiek najwybitniejszym fizykom. Jeśli zdołacie wykazać, że naprawdę dziko i namiętnie rozumiecie tę zagadkową cechę

płynów, czeka na was milion dolarów. A to za sprawą Clay Mathematics Institute, założonego przez biznesmena z Bostonu Landona T. Claya i jego żonę Lavinie D. Clay. Fundacja w 2000 roku ogłosiła listę tak zwanych siedmiu problemów milenijnych i każdy z nich jest związany z jakimś fundamentalnym pytaniem, które mimo dziesięcioleci wysiłków wciąż stawia opór uczonym. Aby zachęcić badaczy do myślenia, szefowie Instytutu zebrali na nagrody imponującą kwotę 7 milionów dolarów, oferując milion dolarów w gotówce za rozwiązanie każdego problemu. Gdy to piszemy, sześciu z siedmiu problemów wciąż nie rozwiązano – ruszcie więc głową, bo jest szansa zgarnąć naprawdę dużą kasę.

Wszystkie nie rozwiązane problemy, oprócz jednego, dotyczą abstrakcyjnych zagadnień związanych z liczbami, możemy zatem spokojnie je zignorować; to czysta matematyka, nie fizyka. Zamiast tego skupimy się na równaniu nazwanym na cześć dwu dziewiętnastowiecznych geniuszy: francuskiego inżyniera Claude'a-Louisa Naviera (1785–1836) oraz urodzonego w Irlandii fizyka George'a Gabriela Stokesa (1819–1903). Ich równanie ma również istotne znaczenie dla koników morskich, osobliwych spiczastogłowych mieszkańców oceanów, pływających w pionie, z zawiniętym ogonem – z nimi także wkrótce się poznamy. Chociaż Navier i Stokes nigdy nie pracowali razem, obaj interesowali się sposobem poruszania się prostych, nie poddających się sprężaniu płynów, takich jak woda. Formuła matematyczna stanowiąca owoc ich badań, znana jako prawo Naviera-Stokesa, opisuje, jak szybko i w jakim kierunku porusza się płyn, i to nie jedynie ogólnie, ale w każdym punkcie. Jeśli rozwiążemy to równanie, otrzymamy coś, co przypomina mapę wiatrów z telewizyjnej prognozy pogody: informacje o prędkości i kierunku, w jakim płyn porusza się w wielu różnych miejscach.

Równanie można łatwo rozwiązać, jeśli płyn porusza się zgrabnie

i gładko, jak choćby wtedy gdy lekko odkręcimy nad wanną kurek z gorącą wodą. Woda leje się wtedy delikatnym strumieniem o kształcie kolumny. Ale jeśli odkręcimy kurek na cały regulator, woda wypływa kaskadami nieregularnym strumieniem, w którym tworzą się wiry. Równanie Naviera-Stokesa nie potrafi dokładnie opisać zachowań takiego pełnego zawirowań strumienia. Oczywiście można stworzyć potężny program komputerowy i używając supermaszyny obliczeniowej, uzyskać szczegóły wodnych zawirowań. Tak właśnie robią meteorolodzy, modelując sposób cyrkulacji gazów w atmosferze, aby przewidzieć, czy nazajutrz będzie padać. Ale wykorzystanie potężnych komputerów, by na podstawie formuły Naviera-Stokesa wypłuły nam odpowiedź dla cieczy płynącej w sposób turbulentny, nie oznacza, że rozwiązaliśmy problem, odwołując się do zasad fizyki. To matematyczne oszustwo i w ten sposób nie wygracie milenijnej nagrody. *Sorry.*

Nie ma jednak powodu do popadania w kompleksy; problem turbulencji stawiał opór wielu najwybitniejszym umysłom. Brytyjski matematyk sir Horace Lamb (1849–1934) podczas posiedzenia British Association for the Advancement of Science w 1932 roku powiedział: „Jestem już starym człowiekiem, a kiedy umrę i pójdę do nieba, mam nadzieję, że uzyskam oświecenie w dwu sprawach. Jedną jest elektrodynamika kwantowa, drugą turbulentny ruch płynów. Jeśli chodzi o tę pierwszą, jestem raczej optymistą”. W tych czasach elektrodynamika kwantowa, opisująca, w jaki sposób przebiegają interakcje między światłem a materią, była teorią bardzo świeżą, uważaną za niezwykle awangardową i trudną. 80 lat później można powiedzieć, że poradziliśmy sobie z elektrodynamiką kwantową, ale turbulencja nadal nam się wymyka.

Powoli jakoś idzie

Zjawisko turbulencji jest irytujące nie tylko dlatego, że nie potrafimy go zrozumieć w sposób naukowy, ale też dlatego że kosztuje nas sporo nerwów podczas niespokojnego lotu samolotem. Niespodziewane turbulencje bywają tak gwałtowne, że wstrząsają całym samolotem i w efekcie makaron z sosem nagle ląduje nam na kolanach. Możecie też walnąć głową w sufit, jeśli nie przypniecie się pasami. Aby zredukować przykre skutki turbulencji, radzimy mieć je cały czas zapięte i raczej nie zajmować miejsc z tyłu samolotu, bo tam rzuca najmocniej.

Zresztą turbulencji podczas obiadu powinien także unikać karłowaty konik morski (*Hippocampus zosterae*). Mimo swojej nazwy koniki morskie nie są końmi, lecz rybami, które wyglądają jak konie. Karłowaty konik morski ma około 2,5 centymetra długości i nie jest wcale najmniejszy spośród 54 gatunków. Ten tytuł należy do konika pigmejowego (*Hippocampus satomiae*), który ma zaledwie 1,4 centymetra. Karłowaty konik morski wyróżnia się jednak w pewnej dziedzinie. Dzierży rekord w *Księdze rekordów Guinnessa* jako najwolniej poruszająca się ryba na świecie. Podróżuje z prędkością mniejszą niż 1,5 m/h. Gdyby zorganizowano dla karłowatych koników morskich bieg sprinterski na 100 metrów, pierwszy dotarłby na linię mety niemal po trzech dniach. Ale to flegmatyczne usposobienie ma za sobą naukowe racje.

Karłowaty konik morski żyjący na Karaibach, w Zatoce Meksykańskiej i u południowo-wschodnich wybrzeży USA jest białawożółty i ma spiczasto zakończoną głowę, co sprawia, że przypomina trochę konika szachowego. Jego szczupłe ciało kończy się ślicznie zakręconym ogonem. Mieszka głównie w spokojnych, osłoniętych akwenach, zwłaszcza tam gdzie dno oceanu wyściełają pola zielonych morskich traw. Konik uwielbia odżywiać

się widłonogami. Jeśli karłowaty konik morski zdoła podpłynąć do jednego z tych milimetrowej wielkości przezroczystych skorupiaków, nagle odwraca głowę i kieruje pysk ku górze. Następnie wsysa zdobycz. Jednak ten ruch obrotowo-ssący ma sens jedynie wtedy, gdy widłonóg znajduje się tuż przed jego nosem – w odległości mniejszej niż 1 milimetr od konika. Dzieje się tak dlatego, że widłonóg stara się zabezpieczyć przed wessaniem i wykorzystuje swoje pokryte cienkimi włoskami czułki, które rejestrują nawet najmniejszy ruch wody w pobliżu. W ciągu zaledwie 2 milisekund od chwili gdy zauważy w wodzie coś podejrzanego, widłonóg błyskawicznie oddala się z niebezpiecznego miejsca z prędkością 500 długości swojego ciała na sekundę. Po przeliczeniu na naszą skalę oznaczałoby to, że lekkoatleta musiałby przebiec kilometr w ciągu jednej sekundy. A zatem żeby coś zjeść, karłowaty konik morski musi zacząć się na skorupiaką naprawdę bezszelestnie, aby w żaden sposób nie wywoływać ruchu wody. Dla konika turbulencja oznacza pusty żołądek.

W jaki sposób karłowate koniki morskie minimalizują wywoływane przez siebie turbulencje? Czy mamy rozumieć, że opanowały fizykę płynów lepiej niż my? Żeby się o tym przekonać, Brad Gemmell, zoolog z Uniwersytetu Teksasńskiego w Austin, wraz ze swoim kolegą Edwardem Buskeyem, także z Teksasu, oraz Jianem Shengiem z uniwersytetu w Minnesocie oświetlali karłowate koniki morskie promieniami światła laserowego. Nie było to aż tak okrutne, jak się wydaje. Badacze używali czerwonego światła laserowego, które jest niewidoczne dla większości zwierząt morskich. Zamiast grasować w wodach oceanu, uczeni wypełnili wodą morską szklane akwarium o wymiarach 4 na 4 na 4 centymetry. Następnie wrzucili porcję widłonogów zebranych w Zatoce Meksykańskiej oraz dodali trochę mikroskopijnych okrzemków, jednokomórkowych organizmów, którymi żywią się morskie widłonogi, po czym wsadzili tam

karłowatego konika morskiego wyhodowanego w laboratoriach Uniwersytetu Tekszańskiego badających życie oceanu.

Wyłączywszy światła, badacze próbowali zaobserwować, co będzie się działo, gdy konik morski zaczai się na widłonoga. Aby to osiągnąć, emitowali w stronę morskich stworzeń promień światła laserowego o długości 2,5 centymetra i rejestrowali wzory plam świetlnych powstające, gdy światło odbite od przedmiotu nakłada się na światło, które przechodzi przez ten przedmiot, nie podlegając zmianie. Wzory uzyskane dzięki tej metodzie cyfrowej holografii wyglądają nudno – po prostu chaotycznie rozsiane kropki światła – ale dzięki komputerom można wyciągnąć z nich informacje o tym, gdzie był karłowaty konik morski i jak wyglądało polowanie na skorupiaka. Piękno zastosowanej w eksperymencie holografii cyfrowej polega na tym, że z jej pomocą można uzyskiwać obrazy z życia karłowatych koników morskich z dowolnej odległości, podczas gdy normalna kamera wideo zarejestrowałaby tylko moment, w którym zwierzę się przybliżyło i oddało, a potem obraz straciłby ostrość.

Rewolucja *slow-food*

Jak pokazało światło lasera, karłowate koniki morskie są superspecjalistami w zjadaniu widłonogów. Konik morski potrafi tak cicho zacząć się na swoją ofiarę, że w 84 procentach przypadków widłonóg go nie zauważa i konik morski osiąga dystans bezpośredniego rażenia, czyli 1 milimetr. Niemniej nawet tak skuteczne zbliżanie się do ofiary nie zawsze oznacza posiłek. Gemmell pamięta sfilmowaną sekwencję zdarzeń, w której karłowaty konik morski zaczął już wsysać widłonoga, zgodnie ze swoim zwyczajem, ale kiedy pochylił głowę, widłonóg odpłynął bez szwanku. „Dosłownie wyrwał

się z paszczy śmierci” – opowiada Gemmell. Jednak na ogół karłowate koniki morskie okazują się skutecznymi zabójcami. Kiedy są gotowe do ataku, działają szybko i wsysają widłonoga w niecałą milisekundę. Chwytają w ten sposób 94 procent widłonogów, do których udało im się niepostrzeżenie podpłynąć, co daje średnią skuteczność ataku rzędu 79 procent. „Byłem zdumiony, jak dobre są karłowate koniki morskie w chwytaniu jednego z największych specjalistów od uciezek, jacy żyją w oceanie” – mówi Gemmell. Każdy widłonóg, oprócz tego, który został właśnie pożarty przez konika morskiego, zrobi wszystko, co w jego mocy, aby czmychnąć, i ucieka z prędkością 36 metrów na sekundę.

Poza tym zespół badaczy wykazał, że w kluczowej, jednomilimetrowej strefie rażenia, która znajduje się tuż nad pyskiem konika morskiego, nie występują niemal żadne turbulencje. Nieco dalej od ciała konika wody są bardziej niespokojne. Swoją umiejętność wytwarzania strefy ciszy karłowaty konik morski zawdzięcza kształtowi swojej płaskiej, spiczasto zakończonej głowy. Podczas innych testów Gemmell przekonał się, że wokół ciernika (*Gasterosteus aculeatus*) – ryby o niespiczasto zakończonej głowie – nie ma tak spokojnych wód. Karłowaty konik morski stara się w taki sposób dostosować położenie głowy, aby idealnie przygotować się do ataku: jeśli podpłynie do ofiary z głową ustawioną pod kątem zbyt ostrym albo zbyt rozwartym, w sferze ataku pojawią się turbulencje. Jednak kiedy trzyma głowę skierowaną ku dołowi, pod kątem 25 stopni w stosunku do pionu, powyżej karłowatego konika morskiego powstaje idealna strefa ciszy. W przypadku karłowatych koników morskich najcichsze są też najbardziej niebezpieczne.

Co do turbulencji natomiast, pozostaje żywić nadzieję, że ktoś w końcu uwolni czekającego w niebiosach Horace’a Lamba od jego matematycznej udręki. To piękna myśl, że karłowaty konik morski, czający się tak

podstępnie w ciepłych wodach oceanu, skrywa sekret jednej z największych zagadek przyrody – i że przy okazji ktoś mógłby dzięki niemu zarobić milion dolarów.

Ulotne myśli

Świat płynów nie kończy się na wodzie. Są jeszcze soki, gorąca czekolada i truskawkowy koktajl mleczny oraz otulające całą naszą planetę powietrze. Ten niewidoczny płyn jest nieodzowny do życia, składa się w 20 procentach z tlenu (reszta to głównie azot i odrobina dwutlenku węgla). Ludzie dopiero niedawno nauczyli się wzbijać do lotu, ale niektóre zwierzęta ewolucyjnie opanowały tę umiejętność już dawno temu – nie tylko ptaki, nietoperze i niektóre owady, lecz nawet starożytne gady.

Zwierzęta, by latać, potrzebują dwu rzeczy: muszą generować siłę ciągu, żeby poruszać się w powietrzu naprzód, oraz wytwarzać wystarczającą siłę nośną, aby przeciwdziałać sile ciężenia. Jeśli im się to uda, mogą fruwać na stałej wysokości, wznosić się wyżej, jeśli mają na to ochotę, albo wzbijać się z ziemi do lotu. To ostatnie nie jest takie ważne – jak dowiemy się później, można skorzystać z innych możliwości, jeśli nie udaje ci się uzyskać odpowiedniej siły nośnej. Powietrze jest rzadkie; w odróżnieniu od wody nie potrafi utrzymać ciężaru naszego ciała. Spróbujcie pomachać na basenie rękami pod wodą, a poczujecie, jak woda was odpycha. Jednak gdy w przebieralni pomachacie rękami w powietrzu, jedyne, co poczujecie, to przykre rozczarowanie. Siły, które powstają na skutek oporu cząsteczek powietrza, są zbyt małe, aby je dostrzec, więc wytwarzanie siły nośnej to ważna sprawa. Na szczęście zwierzęta mogą nas wiele nauczyć na temat aerodynamiki – badań nad przepływem strumienia powietrza. Niektórzy

inżynierowie pracujący na potrzeby lotnictwa starają się nawet naśladować podejście pszczół do tego zagadnienia, budując niewielkie drony, czyli minipojazdy unoszące się w powietrzu, a w każdym razie próbują. Jednak uczymy się powoli. Musimy jeszcze wiele osiągnąć, aby dotrzeć do jądra tego sekretu owadów.

Zanim dowiemy się, jak latają pszczoły i dlaczego swego czasu wielu ekspertów uważało, że to niemożliwe, jedna uwaga na temat latających wiewiórek, latających żab, latających jaszczurek, latających węży i latających ryb. Mimo swojej nazwy te zwierzęta nie potrafią fruwać, ponieważ nie są w stanie wytwarzać odpowiedniej siły ciągu, by w powietrzu poruszać się do przodu. Zamiast tego po prostu skaczą, a potem szybują. Aby wytworzyć siłę nośną i opóźnić opadanie na ziemię, latające wiewiórki (polatuchy) z rodziny wiewiórkowatych (*Sciuridae*) wykorzystują fałd skórny rozciągający się między nadgarstkami a kostkami, dzięki czemu wyglądają trochę jak Drakula w pelerynie, gdy przepływają w powietrzu w stronę sąsiedniego drzewa. Latające żaby mają ogromne błoniaste stopy. Latające jaszczurki (z rodzaju *Draco*) dysponują fałdami skórnymi rozpiętymi na znacznie przedłużonych ruchomych żebrach, które tworzą namiastkę skrzydeł (kto potrzebuje red bulla?), podczas gdy latające ryby (z rodziny ptaszorowatych) są zaopatrzone w duże błoniaste płetwy piersiowe. Natomiast latające węże (z rodzaju *Chrysoplea*) wciągają żołądek i wystawiają żebra, tworząc coś w rodzaju przekroju *frisbee*, zanim rzucą się z drzewa w dół i zaczną opadać, wijąc się esowato, tak jak robią na ziemi. Ale wróćmy do pszczół.

Pszczela drużyna

Jeśli jesteś pszczołą, twoje życie – oglądane z zewnątrz – może wydawać się

prawdziwą idyllą. Unosisz się z lekkim brzęczeniem nad ukwieconą łąką albo pracowicie pobzykujesz w sadzie usianym jemiołą; promienie słońca muskają czerń futerka na twoim grzbiecie, gdy zbierasz pyłek i nektar, aby zanieść je do swoich sióstr czekających w ulu. Siostry pomagają ci w opiece nad larwami, dziećmi twojej matki. Po prostu cudowny przykład dużej społeczności żyjącej w idealnej harmonii. Pszczoła miodna wykonuje nawet po powrocie do ula mały taniec, potrząsając odwłokiem w swoistej odmianie tańca *shimmy*, którym mówi koleżankom, gdzie znalazła łąkę bogatą w pokarm (na temat sposobu porozumiewania się pszczół więcej w rozdziale 6). Jednak w rzeczywistości nie jest tak kolorowo. Pszczoły odgrywają ściśle określone role wyznaczone przez miejsce w hierarchii opartej na płci i liczbie chromosomów; nie ma mowy o zmianie rodzaju wykonywanej pracy. Ta, która ma najwięcej szczęścia, zostaje królową, większość samic zaś to robotnice pracowicie zbierające pożywienie, dbające o młode i strzegące ula; nieliczne samce, czyli trutnie, które wykluwają się z jajek złożonych przez królową pod koniec lata, liczą się tylko ze względu na swoje nasienie.

Dziś pszczoły muszą w dodatku zmagać się z różnymi nieprzyjemnymi aspektami nowoczesnego życia. Wielkim zagrożeniem dla pszczół miodnych jest tajemnicza choroba zwana syndromem masowego wymierania pszczół, która dziesiątkuje roje w Europie i w Ameryce Północnej. Uczeni, szukając przyczyn, podejrzewają roztocza *Varroa* albo pestycydy, takie jak neonikotynidy, wpływające negatywnie na działanie pamięci pszczół w procesie poszukiwania pożywienia. Niemal wszystkie pszczoły są także narażone na utratę swojego naturalnego środowiska wskutek postępującego wycinania sadów, tępienia kwitnącego „zielska” środkami chwastobójczymi czy zaorywania kwitnących łąk albo zraszania ich nawozami, w następstwie czego trawa zarasta i wypiera kwiaty. W swoich ulach pszczoły są atakowane przez myszy, szerszenie i pasożyty przewodu pokarmowego. Jeszcze inne

źródło zagrożenia stanowią osy i muchy, które składają jaja w ciele dorosłych pszczoł; kiedy z takiego jaja wykluwa się larwa, zjada pszczołę od wewnątrz.

I pszczoły muszą sobie z tym wszystkim radzić – a do tego mają niewielkie skrzydła. Skrzydła robotnicy trzmiela (z rodzaju *Bombus*) mierzą zaledwie 11 do 17 milimetrów, czyli są mniej więcej takiej samej długości jak jej ciało. Zbudowane są z przezroczystej chityny, podobnie jak zewnętrzny szkielet owada. Za pomocą tych przezroczystych powłok trzmiel musi unieść w powietrze swoje ciało o masie 0,7 grama, a w przypadku robotnicy nawet więcej. To zaledwie jedna szóstka łyżeczki cukru, co nam nie wydaje się zbyt wielkim ciężarem, natomiast dla pszczoły to naprawdę dużo, tym bardziej że musi unieść się w powietrze, mając skrzydła o powierzchni zaledwie 1 centymetra kwadratowego. W dodatku pszczoły często dźwigają drugie tyle na sobie w postaci pożywienia: pyłku przylepionego do włosyśatych nóg albo nektaru w żołądku. W jaki sposób pszczoła potrafi tego dokonać?

Lot pszczoły

Sposób latania pszczoł, odgrywający tak wielką rolę w ich życiu, budził poważne spory wśród badaczy. Na początku XX wieku część uczonych doszła do wniosku, że pszczoły właściwie w ogóle nie powinny unosić się w powietrzu, ponieważ ich skrzydła są za małe i poruszają się za wolno, aby wytworzyć odpowiednią siłę nośną. Kontrowersje budzi nawet pytanie, kto pierwszy wysunął takie twierdzenie. Czy francuski entomolog Antoine Magnan (1881–1938) w swoim arcydziele z 1934 roku na temat lotu owadów, napisanym wspólnie z André Sainte-Laguë? A może fizyk Ludwig Prandtl (1875–1953) z uniwersytetu w Getyndze, w Niemczech, w latach

trzydziestych XX stulecia? A może szwajcarski specjalista od dynamiki gazów Jakob Ackeret (1898–1981)? Inżynier W. Hoff, wykorzystujący dane zebrane przez entomologa Reinharda Demolla, około pierwszej wojny światowej? Hej, a może to był łagodny Penry z kreskówki wytwórni Hanna-Barbera (*Hong Kong Phooey*, 1974)? A może tę tezę w ogóle zmyślono, by ośmieszyć ówczesnych uczonych, którzy wydawali się zbyt aroganccy i pewni siebie?

W końcu co my, ludzie, możemy wiedzieć? Zdarzało nam się mówić: „Nie ma powodu, aby każda indywidualna osoba miała w domu komputer”, „Może Amerykanie mają potrzebę posiadania telefonów, ale nam to nie jest potrzebne. Mamy mnóstwo chłopców na posyłki” albo: „Telewizja nie utrzyma się na rynku dłużej niż 6 miesięcy. Ludzie w końcu znudzą się wpatrywaniem się każdego wieczoru w drewniane pudełko”. Na szczęście Charlie Ellington z uniwersytetu w Cambridge, w Wielkiej Brytanii, postanowił pójść śladem osób zdumionych umiejętnością latania pszczoł, niezależnie od ich proveniencji, i rozwiązać tę zagadkę. Okazało się, że pszczoły są daleko przed nami w dziedzinie latania: potrafią wytwarzać siłę nośną w sposób, jaki nigdy nie przyszedłby nam do głowy, i dopiero zaczynamy je naśladować. Nawet dziś, mimo potężnych komputerów, samolotów odrzutowych, helikopterów i promów kosmicznych, wciąż nie do końca rozumiemy zagadkę ich lotu. Na szczęście pszczoły wpadły na ten pomysł już dawno temu i potrafią wytwarzać 2 albo 3 razy większą siłę nośną, niż wydaje się to możliwe na gruncie stosowanych przez nas konwencjonalnych praw aerodynamiki. Po prostu unoszą swoje ciało w powietrze i beztrąsko odlatują w dal. Z pewnością nie stosują się do naszych zasad.

Dobry ciąg

Nie winimy nauczycieli, ale najbardziej rozpowszechnione wyjaśnienie tego, w jaki sposób rzeczy latają w powietrzu, także nie jest całkiem prawidłowe. W szkole być może usłyszeliście, że za sprawą krzywizny przekroju skrzydła samolotu (znanej jako płat nośny) powietrze opływające delikatnie wybrzuszoną górną powierzchnię skrzydła musi pokonać dłuższą drogę niż powietrze przechodzące dołem. To oznacza, zapewne powiedział wam nauczyciel, że powietrze płynące nad górną powierzchnią skrzydła musi poruszać się szybciej, aby połączyć się z tyłu skrzydła z powietrzem, które przepłynęło dołem. Nie ma jednak żadnego fizycznego powodu, żeby strumień powietrza przepływającego nad górną powierzchnią skrzydła musiał połączyć się z cząsteczkami powietrza, które po rozdzieleniu się przepłynęły pod spodem. I rzeczywiście nic takiego się nie dzieje; powietrze na ogół potrzebuje trochę mniej czasu, aby przelecieć nad górną powierzchnią skrzydła niż dołem. Jednak ta różnica jest niewielka i co najważniejsze, powietrze przepływające górą nadal nabiera prędkości, co oznacza, że ciśnienie powyżej skrzydła spada i staje się mniejsze niż ciśnienie u dołu, zasysając skrzydło do góry i wytwarzając siłę nośną. Innymi słowy, siła działająca na skrzydło ku górze ze strony cząsteczek powietrza uderzających je od dołu jest średnio większa niż siła działająca w dół ze strony cząsteczek znajdujących się powyżej skrzydła, ponieważ jest ich mniej. W rezultacie skrzydło jest popychane do góry.

W rzeczywistości wszystko przebiega w sposób nieco bardziej złożony. Co akurat dobrze się składa, ponieważ w przeciwnym razie samoloty nie byłyby w stanie latać do góry nogami. Gdyby powyższe wyjaśnienie stanowiło całą odpowiedź na zagadkę, podczas takiego lotu górna powierzchnia płata nośnego znalazłaby się na dole, a tym samym powietrze

przepływałyby szybciej poniżej skrzydła i zasysałoby samolot w stronę ziemi. A to nie byłoby najlepsze. W radiowym serialu BBC *Cabin Pressure* pilot Martin Crieff (grany przez Benedicta Cumberbatcha) wykręca się od odpowiedzi i odwraca uwagę stewarda Arthura Shappeya (John Finnemore), mówiąc mu, że w luku bagażowym znajduje się kot, a on właśnie przypadkiem wyłączył ogrzewanie. Nie zamierzamy uciekać się do tak drastycznych posunięć i po prostu chcemy dodać, że w rzeczywistym świecie płat nośny, niezależnie od kształtu, zmienia przepływ strumienia powietrza zarówno w większej odległości od skrzydła, jak i bardzo blisko niego, co obejmuje także zmianę kierunku przepływu powietrza ku górze, a potem w dół i znowu ku górze. Te ruchy, oraz związane z nimi przyspieszenia, prowadzą do powstawania sił działających na skrzydło oraz sił reakcji działających w przeciwnym kierunku – zgodnie z drugim i trzecim prawem Newtona.

Możecie sami poczuć ten efekt, jeśli wystawicie rękę przez okno jadącego samochodu (oczywiście po sprawdzeniu, czy na poboczu nie ma latarń ani rowerzystów). Ustawiając dłoń pod kątem do wiatru w taki sposób, że kciuk znajduje się z przodu i wyżej, a mały palec niżej, poczujecie, jak powietrze wypycha dłoń i całe ramię ku górze. Podobnie jak nasza dłoń skrzydło zwykle nie zderza się ze strumieniem powietrza frontalnie. Zwykle przednia część skrzydła (czyli krawędź natarcia) znajduje się wyżej niż tylna (krawędź spływu). Jeśli ustawimy skrzydło pod odpowiednim kątem, będzie rozdzielało strumień powietrza w taki sposób, aby wytwarzać siłę nośną nawet wtedy, gdy samolot leci do góry nogami. W dodatku, jak wspominaliśmy, zmiany prędkości powietrza, następujące gdy płat nośny wpływa na ruch powietrza i zagina jego tor wokół swoich powierzchni, także zmieniają jego ciśnienie. Wszystkie te zmiany – zmiana kierunku, prędkości i ciśnienia – wzmacniają się nawzajem, stwarzając wir powietrza działający

od dołu skrzydła ku górze. To dość skomplikowane i prawdopodobnie dlatego wasi nauczyciele tak bardzo upraszczali sprawę, że całe wyjaśnienie stawało się błędne. Ale jedźmy dalej – w końcu jest kilka istotnych różnic między samolotem a pszczołą.

Sztywne myślenie

Po pierwsze, pszczoła ma krótkie skrzydła w stosunku do rozmiarów swojego ciała. Nie ma też silnika, który wytwarzałby siłę ciągu popychającą ją do przodu. Zamiast tego macha swoimi skrzydełkami, aby wytworzyć zarówno siłę ciągu, jak i siłę nośną. To oznacza, że zasady konwencjonalnej aerodynamiki, rozwijanej przez badaczy z myślą o samolotach wyposażonych w długie, sztywne skrzydła, nie działają w przypadku pszczoły. Albowiem abyśmy mogli uznać skrzydła pszczoły za sztywne, owad musiałby bić nimi powoli w porównaniu z prędkością, z jaką porusza się w powietrzu, tak jak to robi duży ptak. Czapla siwa (*Ardea cinerea*), którą być może widzieliście, wyglądając z okna jadącego pociągu, w chwili gdy podrywa się do lotu po udanym polowaniu na ryby w rzekach, kanałach, jeziorach czy zatokach, macha swoimi skrzydłami metrowej długości w ospałym tempie dwóch uderzeń na sekundę, ciągnąc za sobą swoje długie nogi. Mimo widocznego braku wysiłku podczas lotu ptak porusza się z prędkością 12 metrów na sekundę (ponad 40 km/h). Tak duży stosunek prędkości lotu do tempa uderzania skrzydłami oznacza, że w analizie lotu czapli możemy odwołać się do konwencjonalnych zasad. Długie skrzydła czapli zgadzają się także z innym założeniem modeli stosowanych w aerodynamice – tym, że skrzydła są nieskończenie długie. Niestety, skrzydła pszczoły są zbyt krótkie, aby można było analizować je w ten

dwuwymiarowy sposób (2D); i ma to wielkie znaczenie.

W odróżnieniu od leniwej czapli trzmiele (ang. *bumblebees*; w czasach Darwina nazywane *humblebees*) machają skrzydłami w zdumiewającym tempie 150 uderzeń na sekundę (inne staroświeckie słowo języka angielskiego, *dumbledore*, oznaczające pszczoły i różne hałaśliwe owady, posłużyło jako nazwisko wielbiącego muzykę dyrektora szkoły Albusa Dumbledore'a w serii książek o pewnym chłopcu uprawiającym czary). Jętki, ważki i ważki równoskrzydłe mają mięśnie służące bezpośrednio do poruszania skrzydłami. Wszystkie pozostałe owady skrzydlate skurczają w tym celu segment korpusu (*thorax*) w części znanej jako zatułowia, by automatycznie machać przyczepionymi do niego skrzydłami. Żeby machać skrzydłami szybko, trzmiel używa asynchronicznych mięśni służących do latania; przy każdym skurczu mięśni tułowia wykonuje zwykle kilka wibrujących ruchów skrzydłami, a nie jeden. Mimo że macha skrzydłami 75 razy szybciej niż czapla, trzmiel lata z prędkością jednej czwartej prędkości ptaka – około 0,75 metra na sekundę. Poza tym trzmiele wprawiają swoje skrzydła w ruch rotacyjny, następujący między ruchem skierowanym ku dołowi (machnięciem w dół) a ruchem skierowanym ku górze, zmieniając ich położenie w taki sposób, że podczas machnięcia w dół dolna część skrzydła znajduje się na górze, dzięki czemu machnięcie w dół także wytwarza siłę nośną.

W żadnym sensie nie można mówić o skrzydłach pszczoły jako sztywnych. Zgodnie z zasadami standardowej aerodynamiki pszczoły powinny po prostu spadać na ziemię. I stąd konsternacja wspomnianych uczonych z początku XX wieku. W przypadku sztywnego skrzydła wielkość siły nośnej zależy od prędkości poruszania się w powietrzu podniesionej do kwadratu (stosunkowo niewielkiej u pszczoły), powierzchni skrzydła (znowu niewielkiej), ciśnienia powietrza (którego pszczoła nie może zmienić,

ponieważ nie ma wpływu na warunki atmosferyczne) oraz współczynnika siły nośnej. Wartość współczynnika siły nośnej zależy od kąta natarcia – kąta, pod jakim skrzydło styka się z napierającym na nie strumieniem powietrza – oraz kształtu skrzydła, który pszczoła może zmienić jedynie bardzo powoli, w trakcie ewolucji: to rozwiązanie raczej mało użyteczne w przypadku owada pragnącego szybko poderwać się do lotu. Jeśli podstawimy do tego równania realne wartości, wynik uzyskany na gruncie konwencjonalnych zasad okazuje się zbyt niski – tak wyliczona siła nośna jest za mała. Mimo to pszczoły latają, rzucając wyzwanie konwencjonalnej aerodynamice.

Wszystko w okamgnieniu

Te krótkie, szybko bijące skrzydła postawiły badaczy wobec pszczelej zagadki. Jak uczeni mieli rozgryźć sposób latania pszczół, jeśli nie mogli odwołać się do swoich standardowych narzędzi aerodynamiki i jej modeli ujmujących skrzydła obiektu jako sztywne i nieskończenie długie? To pytanie zadał sobie Ellington, gdy w 1974 roku przybył do Cambridge z USA z nadzieją, że będzie się zajmował sposobem pływania ryb. Naukowy opiekun Ellingtona, duński zoolog Torkel Weis-Fogh (1922–1975), namówił go jednak do skupienia się na locie owadów. „Musisz umieć znaleźć coś interesującego w każdej dziedzinie, jakiej się poświęcisz” – mówi filozoficznie Ellington.

Weis-Fogh opublikował wtedy artykuł wskazujący, że wyjaśnienie sposobu latania owadów (w tym pszczół) mogłaby przynieść aerodynamika *quasi*-stabilna (nie panikujcie, zaraz się tym zajmiemy). Podejście w kategoriach aerodynamiki *quasi*-stabilnej to pewien skrót myślowy

ułatwiający obliczenia, nawet jeśli uzyskane wyniki są nieco mniej precyzyjne. Ignoruje się po prostu ruch skrzydeł owada, analizując jego lot jako serię migawek, w których skrzydła w każdym momencie zajmują stałą pozycję. Badaczom przyświeca nadzieja, że można – na krótko – posłużyć się konwencjonalną aerodynamiką. Wyglądało na to, że sprawa została rozwiązana. Ellington miał tylko dopracować szczegóły, fotografując i filmując owady podczas powolnego lotu w szklanych pojemnikach. Taki lot, „bliski unoszeniu się w powietrzu”, podkreślał efekty machania skrzydłami.

Aby namówić pszczoły do latania przed obiektywem kamery pracującej z dużą prędkością, Ellington oświetlał centrum każdego pojemnika i ocieniał jego rogi. „Owady mają swój rozum – opowiada. – Ponieważ poruszały się powoli, wystarczyło uruchomić kamerę jakieś pół sekundy, zanim mogły się pojawić przed obiektywem, i mieć nadzieję, że uda się to zarejestrować”. Po wielu próbach przez wiele dni wywoływał nakręcone rolki. Każda rolka miała około 30 metrów długości, ale kamera zużywała jakieś 15 metrów taśmy, zanim się rozpędziła do prędkości 5 tysięcy klatek na sekundę, a ostatnie 7,5 metra szło na marne, bo film się strzępił. „Jeśli miałeś szczęście, wychodziło jakieś 7,5 metra filmu, na którym coś mogło być – wspomina Ellington. – Jeśli miałeś bardzo dużo szczęścia, mogeś nawet znaleźć dobrą sekwencję”. Po wielu próbach – i zmarnowaniu wielu filmów – Ellington i jego technik fotograf Gordon Runnalls osiągnęli współczynnik sukcesu rzędu jeden udany film na trzy.

Niestety, Weis-Fogh umarł w 1975 roku. Ellington mocno przeżył tę stratę, lecz nadal pracował nad modelem aerodynamiki *quasi*-stabilnej, badając lot różnych owadów, takich jak duże zawisakowate (*Sphingidae*) i trzmiele o pękatym odwłoku (*Bombus terrestris*), które zbierał w ogrodzie botanicznym uniwersytetu w Cambridge – dziś szesnastohektarowej oazie

zieleni, przeniesionej z centrum miasta w 1831 roku przez profesora botaniki Johna Stevensa Henslowa, nauczyciela Darwina. Pszczoła nie zamierzała łatwo zdradzić swoich sekretów. Ellington kontynuował „badania lotu kolejnych gatunków owadów, jednak wyjaśnienia w kategoriach aerodynamiki *quasi*-stabilnej okazywały się coraz bardziej zawodne”. Historia powtórzyła się raz jeszcze; mimo najnowszych zdobyczy nauki i techniki okazywało się, że na gruncie naszej wiedzy najróżniejsze owady w ogóle nie powinny poderwać się do lotu. W 1984 roku, po niemal 10 latach badań, Ellington opublikował „wielką monografię pokazującą, że tak naprawdę nie wiemy, w jaki sposób one latają”.

Ellington w istocie potrzebował możliwości badania lotu trzmielowatych, które poruszałyby się z różnymi prędkościami, a nie jedynie powoli, niemal unosząc się w miejscu. Razem z Robertem Dudleyem zbudował więc dla swoich owadów niewielki tunel aerodynamiczny, w którym – podobnie jak w tunelach służących do testowania modeli skrzydeł samolotu – powietrze poruszało się ze stałą prędkością wybraną przez badacza. I znów Ellington musiał jakoś namówić owady do tego, żeby latały w zamkniętej przestrzeni, w dodatku zmagając się z wiatrem dochodzącym do 5 metrów na sekundę. „Wystarczyło, że źle ustawiły skrzydło i lądowały na siatce na końcu tunelu – opowiada. – To było trudne, ujmując rzecz delikatnie, ale silny zmysł wzroku, jaki mają wszystkie owady, jeszcze raz pomógł nam je oszukać”. Badacze oświetlali nawet z góry tunel światłem ultrafioletowym, aby stworzyć złudzenie światła słonecznego i pobudzić owady do latania. Ponieważ początkowo pszczoły latały do tyłu, do przodu, a nawet na boki, aby im pokazać kierunek, w którym „porusza się” świat, badacze dodali obracający się bęben w poziome paski i pszczoły posłusznie postępowały zgodnie ze wskazówką. Na podstawie tych badań Ellington i Dudley w 1990 roku doszli do wniosku, że posługując się konwencjonalną

aerodynamiką, nie potrafimy wyjaśnić lotu pszczoł niezależnie od ich prędkości.

A zatem: powrót do punktu wyjścia. Mimo wyrafinowanych tuneli aerodynamicznych i innych cudów techniki pszczoła nadal wywodziła badaczy w pole. „To była bardzo dziwna faza – wspomina Ellington. – Co sprawia, że skrzydła pszczoły generują większą siłę nośną, niż powinny? Muszę przyznać, że nie mieliśmy pojęcia. W naszym sposobie myślenia tkwił jakiś błąd”.

Być (pszczołą) albo nie być

Ponieważ lot pszczoł okazał się czymś tak nieuchwytnym, trudno się dziwić, że Ellington porzucił badania nad podobnymi do nich trzmielami, które mają skrzydła długości 13 milimetrów i uderzają nimi 150 razy na sekundę, i zainteresował się większym owadem, amerykańskim zawisakiem tytoniowym (*Manduca sexta*). Zawisak tytoniowy uderza swoimi pięciocentymetrowymi skrzydłami w kolorze brązowo-szarym w leniwym tempie 25 razy na sekundę, dzięki czemu znacznie łatwiej prowadzić nad nim badania naukowe. Tego pięknego owada o brązowo-żółtym korpusie cechuje subtelne usposobienie – karmi się nektarem kwiatów. Ma jednak niepokojące rozmiary i budzi skojarzenia z kultowymi plakatami do *Milczenia owiec*, filmu o seryjnym mordercy, ozdobionymi wywołującą dreszcz sylwetką ćmy trupiej główki (ta ćma ma na swoim korpusie, jeśli wysilić wyobraźnię, wzór w kształcie ludzkiej czaszki oraz, co raczej nietypowe jak na ćmę, wydaje piskliwe dźwięki). Skromna *Manduca sexta*, choć nie jest gwiazdą filmową, może się pochwalić jeszcze bardziej osobliwym tytułem do sławy: jej larwy, aby odpędzić drapieżniki, plują nikotyną, którą wcześniej wchłonęły z liści

tytoniu za pomocą swoich przetchlinek (otworów do oddychania) – przypadłość znana jako toksyczna *halitosis*. Taak.

Mimo odstręczających nawyków swoich larw zawisak tytoniowy – o skrzydłach 4 razy większych niż skrzydła trzmieła – stanowi prawdziwe dobrodziejstwo dla badaczy aerodynamiki. Niemniej nawet poczwórne zwiększenie powierzchni skrzydeł nie wystarczało, aby wydrzeć owadom ich sekrety. Ellington podniósł więc stawkę – zbudował własnego sztucznego owada o skrzydłach 10 razy większych, co oznaczało, że mógł dodać do jego skrzydeł coś, czego prawdziwe owady nie mają. „Postanowiliśmy zbudować mechanicznego owada o rozpiętości skrzydeł 1 metra, wyposażając go w urządzenie do wypuszczania dymu, dzięki czemu będziemy mogli zobaczyć, jakie efekty wywołują ruchy jego skrzydeł w otaczającym powietrzu” – wyjaśnia Ellington. Na przedniej krawędzi skrzydeł tego mechanicznego owada, wzorowanego na zawisaku tytoniowym, zrobiono otwory, z których wydzielał się olej w aerozolu, imitując dym. To, co się działo z tym dymem, kompletnie zaskoczyło uczonych.

„Jeśli wzdłuż przedniej krawędzi skrzydła (krawędzi natarcia), która przecina strumień powietrza, wydziela się dym, będziemy spodziewali się, że po prostu popłynie do tyłu, wzdłuż powierzchni skrzydła i odpłynie na krawędzi spływu” – mówi Ellington. Tymczasem dym „odrywał się od skrzydła, obracał o 90 stopni, po czym nagle przyśpieszał w stronę końca skrzydła”. Dym wykonywał swoistą figurę akrobacji lotniczej, zataczając koło i spływając na boki pod kątem prostym do kierunku lotu. Specjaliści od aerodynamiki nigdy czegoś takiego nie widzieli. Co tu się dzieje?

Sygnały dymne

Pewną wskazówkę przyniosły badania samego Weisa-Fogha, który odkrył, w jaki sposób pewne owady potrafią zwiększać siłę nośną ponad wartości przewidywane przez standardową teorię. Weis-Fogh zorientował się, że pasożytnicza osa *Encarsia formosa* oraz inne owady, takie jak *Trialeurodes vaporariorum*, wciornastki, muszki owocowe, niektóre motyle i ćmy, unoszą skrzydła tak wysoko, że ich czubki stykają się nad ich głową, co przypomina ruchy rąk fanów podczas melodii YMCA na koncertach zespołu Village People, po czym rozchylają skrzydła, wywołując zawirowania powietrza, które dają im siłę nośną większą o 25 procent. Jednak metoda „klaszczy i machaj” prowadzi do niszczenia się i wystrzępiania skrzydeł i zasadniczo posługują się nią jedynie małe owady. Być może w zawirowaniach dymu wytwarzanych przez mechanicznego owada kryje się klucz, który pozwoli rozszyfrować zagadkę lotu także innych owadów?

Podobnie jak w przypadku niektórych sztuczek magicznych, wyjaśnienie kryło się w kłębach dymu. Kiedy strumień powietrza uderza w przednie skrzydło pszczoły, zawisaka albo sztucznej ćmy, pod wpływem uderzenia skrzydłami, ostrego kąta i ostrej krawędzi ponad skrzydłem następuje zawirowanie powietrza, czyli wir. „Ten strumień powstaje wokół krawędzi natarcia, zataczając okrąg, a następnie spiralnym ruchem przesuwa się w stronę końca skrzydła” – opowiada Ellington. Wcześniej widzieliśmy, jak wiry powstające w wodzie pomagają nartnikowi chodzić po jej powierzchni – wiry to rejony niskiego ciśnienia, w których płyn porusza się szybko. Wir, gdy przemieszcza się ponad skrzydłem pszczoły, zawisaka czy mechanicznej ćmy, wprawia strumień powietrza w ruch wokół swojego centrum, zasysając skrzydło ku górze i wytwarzając dodatkową siłę nośną.

Wiry tworzą się także na końcach skrzydeł niezależnie od tego, czy są one sztywne czy ruchome. Dlatego piloci małych samolotów muszą się pilnować, aby nie startować ani nie latać zbyt blisko dużych jednostek takich

jak jumbojety, jeśli chcą uniknąć gwałtownych turbulencji w wirach wytwarzanych przez końce ich skrzydeł, które mogą cisnąć małym samolotem o ziemię. Właśnie ze względu na wiry powstające w powietrzu gęsi, podobnie jak pelikany, flamingi i inne duże ptaki, podczas swoich długich lotów migracyjnych przyjmują szyk w kształcie litery V. Lecąc nieco z tyłu i w bok od ptaka przewodnika, w miejscu, gdzie ze względu na wiry wytwarzane przez końce jego skrzydeł powietrze porusza się ku górze, gęś zyskuje dodatkową siłę nośną. Biologowie uważają, że najlepsza odległość między ptakami w kluczu to jedna czwarta rozpiętości skrzydeł, ale ptaki nie stosują się do naszych zasad. Pozostaje nam nadzieja, że pewnego dnia dowiemy się dlaczego.

Spirala

Wiry powietrzne stanowiły obiecującą odpowiedź na pytanie, skąd bierze się dodatkowa siła nośna podczas lotu pszczół. Ale pojawia się pewien haczyk. W dwuwymiarowych (2D) modelach lotu pszczół, w których dla ułatwienia obliczeń przyjmuje się, że skrzydła pszczoły rozciągają się w nieskończoność, te skrzydła nie mają końca. Powstające wiry najpierw są małe, potem rosną, dopóki nie osiągną rozmiaru równego połowie szerokości skrzydła, po czym odrywają się. „Sądziliśmy, że to może być jeden z mechanizmów wykorzystywanych przez owady, jednak problem polega na tym, że w naszych modelach taki wir nie utrzymałby się stabilnie zbyt długo – opowiada Ellington. – Kiedy skrzydło pokona dystans równy 3–4 długościom cięciwy [szerokości skrzydła], rosnący wir odrywa się i siła nośna staje się nawet mniejsza niż normalnie”. Ponieważ szybko lecąca pszczoła podczas jednego ruchu skrzydeł ku dołowi pokonuje odległość

mniej więcej 8 razy większą od długości cięciwy, przeciętna siła nośna byłaby nawet mniejsza, niż gdyby taki wir w ogóle nie powstał.

Zjawisko odrywania się wiru od skrzydła znane jest jako przeciągnięcie. Gdy strumień powietrza odrywa się od powierzchni skrzydła, podobnie jak w przypadku zwykłych skrzydeł samolotu, przeciągnięcie zmniejsza siłę nośną. Przeciągnięcie pojawia się, gdy skrzydło zaczyna być zbyt odchylone od płaszczyzny horyzontalnej, a co za tym idzie, kąt natarcia między nim a strumieniem powietrza, które przecina, jest zbyt duży. W przypadku samolotu pojawienie się przeciągnięcia to zła wiadomość i piloci starają się go unikać. Możemy sami poczuć jego działanie, jeśli spróbujemy nagle skierować zdalnie sterowany model samolotu ku górze przez uniesienie jego nosa. Początkowo, kiedy zwiększamy kąt natarcia modelu, siła nośna także się zwiększa, ale po przekroczeniu pewnej krytycznej wartości – zwykle 15 do 20 procent dla skrzydła samolotu – powietrze lecące nad skrzydłem odrywa się od jego powierzchni i siła nośna gwałtownie spada, podobnie jak sam samolot.

W dwuwymiarowych modelach skrzydła pszczoły faza lotu do momentu pojawienia się przeciągnięcia, w której owad pokonuje odległość 3 do 4 cięciw, to bardzo dynamiczny okres dający dużo większą siłę nośną, niż można by się spodziewać w stabilnych warunkach, dlatego nazywa się go dynamicznym (albo opóźnionym) przeciągnięciem. Co by się jednak stało, gdyby udało się opóźnić moment wystąpienia przeciągnięcia bardziej, niż to się dzieje zazwyczaj? A nawet opóźnić go w nieskończoność?

Pszczela zagadka

Owady są sprytne. Ellington odkrył, że w realnym, trójwymiarowym świecie

potrafią stłumić w zarodku proces powstawania przeciągnięcia, dzięki czemu nigdy nie dochodzi do fazy „pojawia się przeciągnięcie i następuje nagły spadek siły nośnej”. Osiągają to w ten sposób, że po prostu nie pozwalają, aby wir formujący się nad każdym ze skrzydeł oderwał się i zabrał ze sobą dodatkową siłę nośną. Mówimy „po prostu”, ale to nie może być takie proste, skoro nadal nie wiemy dokładnie, jak one to robią. W jakiś sposób – wskazuje na to zachowanie się dymu w wirach wytwarzanych przez skrzydła sztucznego owada – owady potrafią zahamować ruch wiru ku tyłowi i zmusić go, aby zrobiwszy nagły zwrot o 90 stopni, pomknął korkociągiem w stronę końca skrzydła. W ten sposób powstaje wir poruszający się spiralnie wzdłuż krawędzi natarcia i unoszący ze sobą część energii.

„Jeśli w jakiś sposób uda się wyssać z niego tę energię wirowania i wir nie urośnie za bardzo, to w efekcie tam zostanie – wyjaśnia Ellington. – Dzięki tej sztuczce można poruszać się do przodu niemal w nieskończoność”. Wir, posuwając się wzdłuż skrzydła, nadal trochę się powiększa i tworzy spiralę o stale rosnącym obwodzie, przypominającą rożek ze zrolowanego papieru. Jednak cały czas nie odrywa się od skrzydła owada i gdy pokona trzy czwarte drogi w stronę jego końca, łączy się z wirem wytwarzanym przez czubek skrzydła. Po czym dopiero tak powstały wir, niemal w kształcie okręgu, odrywa się, przemieszczając się w ślad za owadem, przy każdym ruchu każdego ze skrzydeł ku dołowi.

Ellington uświadomił sobie, że tworząc spiralne wiry poruszające się wzdłuż krawędzi natarcia i utrzymując je dokładnie tam, gdzie chce, owad tak długo opóźnia moment powstania przeciągnięcia, że w rezultacie uzyskuje dzięki temu do 70 procent siły nośnej. Reszta to efekt działania konwencjonalnych zasad aerodynamiki oraz być może następstwo specjalnych efektów powstających, gdy skrzydło po każdym uderzeniu zmienia płaszczyznę ruchu. „Nasze odkrycie naprawdę pobudziło wyobraźnię

publiczności, ponieważ było bardzo obrazowe i jako wyjaśnienie bardzo eleganckie – mówi Ellington. – W większości modeli aerodynamicznych pole przepływów w 3D stanowi jedynie niewielką modyfikację pola, jakie uzyskuje się w 2D, gdy strumień powietrza przepływa nad przedmiotem od przodu do tyłu. Tu mamy jedyny przypadek, gdy trzeci wymiar, strumień powietrza płynący wzdłuż skrzydeł w stronę końców, jest równie duży jak strumień płynący od przodu do tyłu. To potężny, wcześniej zupełnie nieznaną efekt aerodynamiczny, nawet w przypadku śmigieł. Spiralny wir przesuwający się wzdłuż krawędzi natarcia to zupełnie nowy mechanizm aerodynamiczny”.

Pszczola nadal wymyka się naszym równaniom. Powstrzymuje oderwanie się wiru powstającego podczas ruchu nad każdym ze skrzydeł, wysyłając go spiralnym ruchem w stronę końca skrzydła. Nie jesteśmy pewni, w jaki sposób owad uzyskuje tę zmianę kierunku. Utrzymując wir powietrza tuż nad powierzchnią skrzydła, uzyskuje siłę nośną, dzięki której może latać.

Kiedy Ellington i jego zespół wiedzieli już, gdzie trzeba szukać, odkryli, że łopatki obracającego się śmigła, choćby w helikopterach i turbinach wiatrowych, także mogą wytwarzać spiralne wiry poruszające się wzdłuż krawędzi natarcia. Wiemy teraz, że inne latające zwierzęta, takie jak nietoperze i ptaki, również czasami wykorzystują wiry poruszające się wzdłuż krawędzi natarcia. Na przykład niektóre gatunki nietoperza wykorzystują je podczas powolnego lotu. Ale nadal nie wiemy wszystkiego. Uczni wcióż starają się dowiedzieć dokładnie, w jaki sposób owady zapobiegają powstawaniu zbyt dużych spiralnych wirów poruszających się wzdłuż krawędzi natarcia oraz jak wiele takich wirów powstaje nad każdym ze skrzydeł – może być ich więcej niż jeden. W 2001 roku Michael Dickinson z Uniwersytetu Kalifornijskiego w Berkeley, w USA, odkrył, że

podczas ruchu skrzydeł w zbudowanym przez niego modelu owada pojawiał się poruszający się wzdłuż krawędzi natarcia wir, który nie poruszał się ruchem spiralnym w kierunku czubka skrzydła. W przypadku modeli Dickinsona hamowanie przepływu powietrza w stronę końca skrzydła nie powodowało, jak można by się spodziewać, że wir przesuwający się wzdłuż krawędzi natarcia rósł, aby wreszcie się oderwać. Jak sądzi Dickinson, na wielkość wirów poruszających się wzdłuż krawędzi natarcia może także wpływać hamująco przepływ powietrza w dół, spowodowany przez wiry powstające na końcach skrzydeł owada. A zatem dym wypuszczany ze skrzydeł sztucznego owada pozwolił rozszyfrować jedynie niektóre z zagadek lotu owadów. Pszczoła zazdrośnie kryje pozostałe tajemnice – na razie.

Los badaczy polujących na skamieniałości

Przypatrując się pszczole i jej zręcznym manewrom wykorzystującym wiry powietrza, poznaliśmy pewne nowe sztuczki. Pora zobaczyć, co fizyka może nam powiedzieć o pewnym zwierzęciu, a nie na odwrót. Zajmiemy się pterozaurami – latającymi gadami, które wprowadzi dawno wymarły, lecz do dziś wywołują ożywione spory. To dobrze, ponieważ poszukiwacze skamieniałości, czyli paleontolodzy, jak sami wolą się nazywać, uwielbiają spierać się o starożytne kości. Ile mają lat? Do jakich gatunków należały? Która kość pasuje do której?

Pterozaurowie – z greckiego: uskrzydłone jaszczurki – żyły jakieś 220 do 65 milionów lat temu. Być może znacie niektóre z nich jako pterodaktyle,

gady przedstawiane z różną trafnością, jeśli chodzi o anatomię, jak ślizgają się, szybują albo machają skrzydłami w tle takich filmów, jak ekranizacja z 1925 roku powieści Arthura Conana Doyle'a *Zaginiony świat*, *King Kong* (1933) czy *Milion lat przed naszą erą* (1966) oraz *Park Jurajski III* (2001). Te latające gady nie mają żyjących współcześnie krewnych, ale niektóre z nich zostawiły nam kości, o które możemy się spierać. Pierwsze szkielety pterozaurów, odkryte w 1784 roku przez włoskiego przyrodnika Cosima Alessandra Colliniego (1727–1806), nawet wtedy budziły zdumienie – pytano: Czy to była ryba czy ptak? W 1824 roku paleontolog Georges Cuvier (1769–1832), patrząc na jeden z egzemplarzy, doszedł do wniosku, że przypomina raczej „produkt chorej wyobraźni niż działania zwykłych sił natury”. Jak zatem wyglądały pterozaurowe?

Znalezione szkielety mówią nam, że pterozaurowe miały przednie kończyny znacznie dłuższe niż tylne oraz krótki ogon i długą, cienką szyję zwieńczoną niemal ptasią głową. Gady zapewne były pokryte łuską, niektóre przypuszczalnie miały odrobinę futra. Między tylnymi łapami a czubkiem czwartego (i ostatniego) palca przednich nóg rozpięta była duża powierzchnia skóry, przypominająca żagiel. Te pozbawione szponów palce miały niemal taką samą długość jak przednie nogi, podczas gdy pierwsze 3 palce były krótkie i miały szpony. Współcześnie podobne błoniaste skrzydła, przyczepione do przednich kończyn, można znaleźć u nietoperzy, ale napinają je za pomocą kilku wydłużonych palców, a nie tylko jednego, dzięki czemu skrzydło jest bardziej stabilne. Pterozaurowe miały także skórną błonę rozciągającą się między tylnymi nogami a ogonem oraz inną błonę, znaną jako *propatagium*, rozciągającą się po każdej stronie przednich kończyn niczym niewielka markiza.

Ach, kości, te kości

Całkiem stosownie kość, która wywołuje awantury wśród wielbicieli pterozaurów, nosi nazwę pochodzącą od tych właśnie gadów: *pteroïd* – to zmodyfikowana kość nadgarstka występująca tylko u przedstawicieli tej grupy zwierząt. W przypadku jednego z gatunków pterozaura, *Coloborhynchus robustus* o rozpiętości skrzydeł 4,5 metra, miała około 15 centymetrów długości i była lekko zakrzywiona. Jak na kość nadgarstka to naprawdę sporo. Nie ulega wątpliwości, że *pteroïd* służył do podtrzymywania przedskrzydła, ale w którą stronę był zwrócony i z jaką kością się łączył? To pytanie może wydawać się niezbyt istotne dla przeciętnego człowieka, ale nie dla paleontologa, ponieważ – jak odkrył Matt Wilkinson z uniwersytetu w Cambridge, w Wielkiej Brytanii – odpowiedź miała niezwykle istotne znaczenie dla samych pterozaurów.

Kiedy Wilkinson zaczynał swoje badania, wielu ekspertów uważało, że *pteroïd* był skierowany w stronę ciała pterozaura, przebiegając mniej więcej równoległe do jego skrzydła. Jednak inni znawcy tych gadów sądzili, że był zwrócony do przodu, pod kątem prostym do przedniej kończyny, dzięki czemu powstawało znacznie szersze przedskrzydło.

Badacze pterozaurów niemal dosłownie stawali po dwu stronach sporu – niektórzy z nich sądzili, że sporna kość była skierowana ku przodowi, inni, że na bok. Aby rozstrzygnąć tę kwestię, uczeni poszukiwali więc nowych kości, jednak w ten sposób nie udało się niczego wykazać. Kości prehistorycznych gadów, ukryte w warstwach osadów, które przez miliony lat podlegały ścisnaniu, rozciąganiu i zgniataniu, zwykle układają się chaotycznie i są bardzo zniekształcone. W tej sytuacji – rzecz raczej dość niezwykła jak na zwyczaj ludzi zajmujących się sporami o skamieliny – Wilkinson, który współpracował z badaczem lotu pszczoł Charliem Ellingtonem, postanowił

rozstrzygnąć spór na swoją korzyść, odwołując się do praw fizyki. „Uświadomiłem sobie, że skoro nie dysponujemy rozstrzygającymi dowodami paleontologicznymi, mogę potraktować surowe wymogi, jakie stawia zwierzętom umiejętność latania, jako użyteczny sposób zawężenia zbioru potencjalnych połączeń anatomicznych i zachowań – opowiada Wilkinson. – Logiczny następny krok stanowiło poddanie testom, z wykorzystaniem zasad aerodynamiki, dwu zrekonstruowanych modeli skrzydła pterozaura, obejmujących *pteroïd*”.

Pterozaur wzbija się w niebo

Niezależnie od swoich kształtów, które tak mocno działają na wyobraźnię twórców filmowych, część pterozaurów naprawdę była bardzo zaawansowana w sztuce latania. Rodzina pterozaurów przypuszczalnie obejmuje największe zwierzęta, jakie kiedykolwiek wzbily się w powietrze. Jeden z największych, *Quetzalcoatlus northropi*, ważył przypuszczalnie 200–250 kilogramów, a więc mniej więcej tyle co dorosły lew, mimo że – podobnie jak dzisiejsze ptaki – starał się zmniejszyć swój ciężar za pomocą kości pustych w środku. Niemniej taka masa oznacza pewien problem. Masa zwierzęcia zależy w znacznej mierze od jego objętości, a tym samym rośnie z sześcianiem jego rozmiarów, podczas gdy powierzchnia skrzydeł rośnie jedynie z kwadratem ich wielkości. A zatem jeśli zwiększymy rozmiary zwierzęcia, jego skrzydła relatywnie zmaleją w stosunku do masy ciała. Jak wspominaliśmy wcześniej przy okazji lotu pszczoł, siła nośna zależy od powierzchni skrzydeł oraz takich czynników, jak: prędkość powietrza, jego gęstość oraz współczynnik siły nośnej skrzydła. W rezultacie większe zwierzęta, żeby wytworzyć odpowiednią siłę nośną i utrzymać swoje ciężkie

ciało w powietrzu, muszą mieć większe skrzydła proporcjonalnie do swoich rozmiarów i latać szybciej.

Te zasady stanowiły więc wyzwanie dla potwora niebios. *Quetzalcoatlus northropi* miał skrzydła o rozpiętości 12 metrów, czyli mniej więcej tyle co półtorej długości londyńskiego piętrowego autobusu (zwłaszcza ikonicznego modelu Routemaster z lat pięćdziesiątych, jeśli macie hopla na punkcie transportu, nowe współczesne routemastery są krótsze). „Przypuszczalnie pterozaurowy osiągały maksymalne rozmiary, jakie mogą mieć latające stworzenia – mówi Wilkinson. – Ogromne zwierzęta muszą mieć proporcjonalnie duże skrzydła. Jednak w końcu takie zwierzę nie byłoby w stanie utrzymać ciężaru w pełni rozwiniętych skrzydeł. Albo jego minimalna prędkość w powietrzu byłaby tak duża, że podczas lądowania rozwaliliby się na kawałki, albo nie byłoby w stanie uzyskać wystarczającej prędkości lotu, aby się oderwać od ziemi, choć skakanie z krawędzi klifu mogłoby trochę pomóc”.

Uczeni sądzą, że duże pterozaurowy latały z prędkością do 70 km/h. Te wielkie zwierzęta nie machały jednak skrzydłami w taki sam sposób jak wcześniejsze, i mniejsze, pterozaurowy – niektóre z nich miały rozpiętość skrzydeł zaledwie 25 centymetrów. W przypadku *Quetzalcoatlus northropi* poruszanie ogromnymi skrzydłami w górę i w dół oznaczało, że musiałyby mieć niezwykle silne mięśnie. A zatem te gady przypuszczalnie poruszały się lotem ślizgowym, tak jak współczesne albatrosy – rozpiętość ich skrzydeł od czubka od czubka wynosi 3 metry. Niemniej powolne machanie skrzydłami, albo szybowanie, ma z naszego punktu widzenia jedną istotną zaletę. Możemy analizować lot pterozaura (w przeciwieństwie do lotu pszczoł) za pomocą zasad konwencjonalnej aerodynamiki, w której przyjmuje się, że skrzydła są sztywne, jak w przypadku samolotów. A to bardzo ułatwia życie.

Aby rozstrzygnąć spór o *pteroid*, Wilkinson w 2001 roku zbudował, ze

stali i z nylonu, modele przekroju skrzydła pterozaura naturalnej wielkości, a następnie umieścił je w tunelu aerodynamicznym. Czy pterozaur, mając *pteroide* skierowany ku przodowi, będzie leciał lepiej w porównaniu z wersją, która ma kość skierowaną na bok? Jako inspiracji dla swoich modeli Wilkinson użył dwunastu odtworzonych w 3D niekompletnych skamieniałych szkieletów pterozaurów z gatunku *Anhanguera santanae*, innego gatunku pterozaurów o rozpiętości skrzydeł wynoszącej 4,5 metra. Podobnie jak nasz stary przyjaciel *Coloborhynchus robustus* mający *pteroide* długości 15 centymetrów, ten gad należał do rodziny pterodaktyli *Ornithocheiroidea*, która miała długie, wąskie skrzydła. Skamieliny pochodziły z rejonu Santa, w północno-wschodniej Brazylii, z miejsca, gdzie niegdyś znajdowało się płytkie wewnętrzne morze. Znalezione pterozaurowie po śmierci uwięzły w skale wapiennej, która zachowała ich szkielety w niezniekształconej postaci. „Mamy je w ich oryginalnym stanie, w 3D – mówi Wilkinson. – To naprawdę rzadkie, zazwyczaj są po prostu pozgniatane”. Dopasowując do siebie kości tych niezwykle dobrze zachowanych egzemplarzy, Wilkinson odkrył sprytną sztuczkę z zakresu fizyki, dzięki której być może pterozaurowie w ogóle mogły latać mimo swoich ogromnych rozmiarów. Jedno z ułożeń *pteroide* bez wątpienia okazało się zdecydowanie bardziej korzystne.

Kąt prosty ma rację

W tunelu aerodynamicznym wzorowane na pterozaurach modele skrzydeł mające *pteroide* skierowany ku przodowi, dzięki czemu w realnym świecie mogły posługiwać się przedskrzydłem o szerokości około 14 centymetrów, miały wyraźną przewagę. Ściśle biorąc, te modele wykazywały wysoką

wartość maksymalnego współczynnika siły nośnej, który oblicza się następująco: siła nośna pomnożona przez 2 oraz podzielona przez gęstość powietrza, kwadrat względnej prędkości powietrza i powierzchnię skrzydła. W miarę zwiększania się kąta natarcia skrzydła skokowo rośnie współczynnik siły nośnej, po czym słabnie, gdy strumień powietrza odrywa się od skrzydła i pojawia się przeciągnięcie. Jeśli mamy dobry współczynnik siły nośnej, nie musimy latać szybko, by uzyskać tę samą siłę nośną – kształt naszych skrzydeł nie wymaga dodatkowego dopalania. „Im wyższa wartość współczynnika siły nośnej, tym większa może być powierzchnia [skrzydła] – wyjaśnia Wilkinson. – Przypuszczam, że największe pterozaurow osiągały wartości graniczne”. Testy w tunelu aerodynamicznym pokazują również, że skrzydła mające *pterooid* skierowany do przodu miały też lepszy stosunek siły nośnej do oporu aerodynamicznego. Opór aerodynamiczny to siła, która działa w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu lecącego obiektu; przypomina trochę siłę tarcia, jakie występują na ziemi. A zatem dzięki dużej sile nośnej i małemu oporowi aerodynamicznemu pterozaurow mogły szybować dalej.

Z drugiej strony, gdyby *pterooid* (czyli nadgarstek) był skierowany w bok, pterozaur miałby węższe przedskrzydło, o szerokości zaledwie 6 centymetrów, co w rezultacie dawałoby mu niższy maksymalny współczynnik siły nośnej – 1,5 w porównaniu z 2,4 dla przedskrzydła o szerokości 14 centymetrów. Można powiedzieć, że gdyby pterozaur miał *pterooid* skierowany w stronę ciała, jego lot byłby bardziej niespokojny. Według Wilkinsona dowody aerodynamiczne wystarczają do przyjęcia tezy, że *pterooid* był skierowany ku przodowi.

W dodatku badacz jest przekonany, że pterozaurow, jeśli tego potrzebowały, mogły obracać wystający ku przodowi *pterooid* do dołu. W rezultacie pozwalałoby to na zakrzywianie powierzchni przedskrzydła.

„Wraz ze wzrostem kąta natarcia krawędź natarcia skrzydła może się zakrzywić, a wówczas strumień powietrza nie odrywa się od jego powierzchni i nie pojawia się przeciągnięcie – wyjaśnia Wilkinson. – Dzięki temu krawędź natarcia skrzydła zawsze jest skierowana w stronę strumienia powietrza. Ponieważ nawet przy bardzo dużych kątach natarcia potrafią zmieniać kąt, pod jakim ustawia się krawędź natarcia ich skrzydeł, mogą uzyskać dużą siłę nośną przy takich kątach, przy których w przypadku większości skrzydeł pojawiłoby się przeciągnięcie”. Co ciekawe, Wilkinson uważa, że nawet jeśli się myli i *pterooid* nie był skierowany ku przodowi, mimo to mógł być ruchomy. Dzięki temu pterozaur mógłby w taki sposób zwiąć przedskrzydło, nawet jeśli było węższe, że zakrzywiałoby się w stronę strumienia powietrza i opóźniało pojawianie się przeciągnięcia.

Jak wykazały badania Wilkinsona w tunelu aerodynamicznym, przy kącie natarcia 20 stopni model skrzydła mający *pterooid* skierowany ku przodowi, umożliwiającym tym samym zagięcie przedskrzydła w stronę strumienia powietrza, osiągał maksymalną wartość współczynnika siły nośnej: 2,4. Takie skrzydło mogłoby uzyskiwać wyższe maksimum współczynnika siły nośnej, gdyby Wilkinson mógł zwiększyć kąt natarcia powyżej 20 stopni, ale badacz wyjaśnia: „Z całą pewnością dochodziło do maksimum, gdy osiągałem górną wartość w tunelu aerodynamicznym – mogłoby wzrosnąć odrobinę, ale tylko odrobinę”. W przypadku większości skrzydeł samolotów przeciągnięcie pojawia się przy kącie natarcia od 15 do 20 stopni i mają one maksymalny współczynnik siły nośnej wynoszący 1,5. A zatem pterozaur mający skierowany ku przodowi *pterooid* zmieniający krzywiznę przedskrzydła osiągałby większą siłę nośną, niż potrafią współcześni inżynierowie mimo naszych wielkich mózgów i komputerów.

Z tak wysokim współczynnikiem siły nośnej pterozaur mógł wzbijać się w powietrze, rozkładając skrzydła i czekając na silny powiew wiatru, co

stanowiło zapewne możliwość o decydującym znaczeniu dla gadów żyjących z dala od wysokiej skarpy, z której mogłyby skoczyć. Znalaziono liczne szkielety pterozaurów pochodzące z terenów nadbrzeżnych, gdzie ich niegdysiejsi właściciele żywili się rybami morskimi, ale inne odkryto w głębi lądu, z dala od oceanów i skalistych wybrzeży. Poza tym, ze względu na duże powłoki skrzydeł przymocowane do ich kończyn, pterozaurowi przypuszczalnie biegały ociężale i nie mogły nabrać prędkości przed oderwaniem się od ziemi. Można by przyrównać ich bieg do próby sprintu w sukni balowej.

Podobnie jak pszczoła, pterozaur wykształcił sprytną metodę unikania przeciągnięcia, choć w tym przypadku współcześni inżynierowie lotniczy zdołali sami rozpracować jej mechanikę, nie uciekając się do naśladowania przyrody. Jeśli *pteroideum* był skierowany ku przodowi, pterozaur mógł sterować strumieniem powietrza w podobny sposób, jak to się dzieje w wielkich samolotach pasażerskich, które wzdłuż krawędzi natarcia skrzydeł mają umieszczone tak zwane skrzelki służące do opóźniania momentu wystąpienia przeciągnięcia.

Wszystko w nadgarstku

Jest tylko jeden szkopał. Co mamy zrobić z tymi, zniekształconymi ponoć przez wieki, skamieniałymi szkieletami, które pokazują, że *pteroideum* był skierowany w stronę ciała pterozaura? Wilkinson sądzi, że mogło to być następstwem innej użytecznej cechy tej kości zwróconej ku przodowi: w pozycji, w której *pteroideum* był w pełni skierowany ku przodowi, pterozaur mógł obrócić go w stronę ciała jak wycieraczkę w samochodzie, aby całkiem zwinąć swoje przedskrzydła. Niewykluczone, że wspomniane szkielety pokazują właśnie *pteroideum* w takiej postaci – złożony. W każdym razie tak

sądzi Wilkinson. Uważa swoje aerodynamiczne dowody za wystarczająco silne, choć inni specjaliści są innego zdania. Albowiem jeśli opisywana przez Wilkinsona teoria głosząca, że *pteroideum* był skierowany ku przodowi, jest słuszna, kość ta musiała łączyć się za pomocą jakiegoś stawu z inną kością nadgarstka, zwaną *medial distal carpal*. Na razie jednak nikt nie znalazł skamieniałości, w której te dwie kości znajdowałyby się obok siebie. Zamiast tego kość *pteroideum* zawsze leży obok niewielkiej kości o nazwie *sesamoid*, która – podobnie jak rzepka w kolanie – zwiększa siłę otaczającego ją mięśnia.

Ale i na to Wilkinson ma swoją odpowiedź. Twierdzi, że *sesamoid* przypuszczalnie znajdował się wewnątrz mięśnia, którym był poruszany *pteroideum*. „Po śmierci gada napięcie w przedskrzydle mogło wyciągać *pteroideum* ze stawu i w rezultacie powstaje wrażenie, że to *sesamoid* łączył się z nią stawem. Nie widzę żadnego innego miejsca, w którym *pteroideum* mógłby się łączyć z innymi kośćmi”. Ujmując rzecz brutalnie, *sesamoid* mógł wpychać się w niewłaściwe miejsce, między *pteroideum* a *medial distal carpal*, wprowadzając w ten sposób zamieszanie wśród paleontologów.

Wilkinson nadal wierzy, że ostatecznie uda nam się pokazać, że *pteroideum* rzeczywiście leżał obok *medial distal carpal*, co będzie oznaczało, że był skierowany ku przodowi. „W idealnej sytuacji potrzebujemy więcej materiału w 3D [szkieletów]. Niestety, te rzeczy nie trafiają się często” – mówi. W ciągu dziesięciolecia, jakie upłynęło od opublikowania artykułu Wilkinsona, nie znaleziono żadnych lepszych egzemplarzy skamieniałości. Wygląda na to, że spór o *pteroideum*, dotyczący umiejscowienia i ułożenia tej kości oraz sposobu latania wielkich gadów, zapewne nie skończy się – jak zgrabnie ujmuje to stara piosenka – dopóki nie pojawi się skamieniały pterozaur mający *pteroideum* przyczepiony do *medial distal carpal*. *Pteroid* nadal najwyraźniej pozostaje kością niezgody.

Płyny w mózgu

W tym rozdziale mieliśmy zasadniczo do czynienia z dwiema połówkami meczu: najpierw z cieczami, potem z gazami. Dzięki napięciu powierzchniowemu, naciągającemu niczym błonę górną warstwę cieczy, nartnikowate nie tylko nie toną, ale nawet chodzą po wodzie, wytwarzając pod wodą półsferyczne wiry. Dowiedzieliśmy się, jak pije kot: dotyka językiem powierzchni cieczy, po czym cofa język do pyszczka, wytwarzając kolumnę płynu. Karłowaty konik morski, żyjący w ciepłych wodach wokół Wysp Karaibskich, jeśli chce coś zjeść, musi zacząć się na swoją ofiarę i niepostrzeżenie się do niej zbliżyć, zadbawszy o to, żeby przy tej okazji nie powstał najmniejszy wir. W jego przypadku turbulencja to wielkie zło.

Co do gazów, uczeni nie mieli pojęcia, w jaki sposób pszczoły wytwarzają wystarczająco dużą siłę nośną, aby przeciwdziałać sile ciężkości, dopóki nie zbudowano mechanicznego owada i wydzielana z jego skrzydeł odrobina dymu nie ujawniła wielu pszczelich sekretów. Pszczoły przeciwdziałają odrywaniu się wiru powstającego w trakcie machania powyżej każdego ze skrzydeł i odsyłają go spiralnym ruchem w stronę końca skrzydła. I wreszcie badania z zakresu mechaniki płynów rzuciły nowe światło na wielki spór o skamieniałości, pokazując, że pterozaurowi latały być może o wiele łatwiej dzięki kości o nazwie *pterooid* skierowanej ku przodowi, a nie na bok.

A teraz, kiedy już daliśmy wyraz swoim poglądom na temat gazów, pora przejść do następnego tematu. To fala, która przebiega bezgłośnie i pomaga zwierzętom – o ile potrafią ją wykryć – porozumiewać się, znajdować pożywienie, zachować bezpieczeństwo i unikać zderzenia z czymś, a nawet się rozmnażać. Czas powiedzieć coś na temat dźwięków.

ROZDZIAŁ 4



DŹWIĘK

DOBRE WIBRACJE

**Uwodzicielskie pawie – Bitwy nietoperzy – Wężę o zabójczym
słuchu – Słonie stosujące triangulację – Langusta gra na
skrzypcach**

– Nagrywam na wideo pawie, które uprawiają seks.

Tak w latach 2009–2012 Angela Freeman zwykle odpowiadała na pytanie o to, czym się zajmuje. Jako studentka uniwersytetu w Manitobie, w Kanadzie, razem ze swoim kolegą Jamesem Hare'em godzinami przesiadywała w miejscowym zoo, filmując te piękne ptaki. W sumie dwoje badaczy podglądało 37 samców pawia z gatunku *Pavo cristatus*, które dumnie przechadzały się po ogrodzie, kusząc samice swym wdziękiem.

Nagrania filmowe zrobione przez Angelę Freeman pokazały, że pawie wiedzą dokładnie, co może skusić samice. Ich partnerki, które mają krótkie brązowe ogony, uwielbiają, kiedy samiec rozkłada pióra swojego długiego ogona w półkole, niczym tren ślubnej sukni, rozpostarty przez niewidzialne druhny. Każde pióro pawiego ogona ma na szczycie wzór w kształcie zielonego okręgu, wypełnionego brązowymi i granatowymi kropkami. Jednak dla samic te pawie oka znaczą coś więcej niż piękne oko uwodziciela.

Samice wybierają samce obdarzone długim trenem, ponieważ zwykle jego posiadacze są tłuściejsi, co wskazuje, że potrafią skutecznie radzić sobie w zdobywaniu pożywienia. Pawice na ogół – choć nie zawsze – wolą samce prezentujące duże pawie oka o jasnym środku, ponieważ kurczęta, które rodzą się ze związku z takimi ojcami, rosną szybciej niż młode pochodzące od mniej atrakcyjnych tatusiów. Rozkładając swój pawi ogon, samiec demonstruje, że będzie świetnym ojcem. To wizualna wskazówka, że ma dobre geny.

Jednak wygląd to nie wszystko, gdy chodzi o zdobycie względów pawicy. I właśnie w tym punkcie do akcji wkraczają Angela Freeman i James Hare. Kiedy podziwiamy pawie dumie kroczące w zoo, w parku albo na terenie jakiejś posiadłości, zwykle dobiega nas straszny jazgot. Pawie gruchają i kraczą, wydając krótkie, głośne okrzyki przypominające dźwięki wydobywające się z tanich piszczałek na dziecięcych przyjęciach – chodzi

o takie z plastikowym ustnikiem i zrolowaną rurką, która prostuje się, kiedy się w nią dmuchnie. Z naszego punktu widzenia ten wrzaskliwy jazgot kłóci się jakoś z pięknem pawiego upierzenia. Kiedy jednak nadstawimy ucha, możemy usłyszeć, że pawie wydają także cichsze i przyjemniejsze, wibrujące odgłosy powstające wtedy, gdy z szelestem poruszają swoimi ogonami.

Dwoje naszych szpiegów w świecie zwierząt chciało dowiedzieć się czegoś więcej na ten temat. A to, co odkryli, okazało się niespodzianką. Przekonali się, że pawie wydają nie tylko szelesty i wrzaski, ale także dźwięki zupełnie niesłyszalne dla ludzkiego ucha. W jaki sposób Angela Freeman i James Hare odkryli odgłosy, których ludzkie ucho nie potrafi usłyszeć? Oraz, co ważniejsze, dlaczego pawie w ogóle je emitują – aby zwrócić uwagę samic, odstraszyć rywali, a może jedno i drugie? Zanim jednak zajmiemy się na serio tą zagadką, pora powiedzieć parę słów na temat dźwięku.

Brzmi dobrze

Pewną wskazówkę przynosi plakat do filmu *Obcy* z 1979 roku. „W kosmosie – ostrzega – nikt nie usłyszy twojego krzyku”. Dzieje się tak dlatego, że dźwięki potrzebują jakiegoś ośrodka, w którym mogłyby się rozchodzić. Tu, na Ziemi, zwykle jest nim powietrze, choć dźwięki mogą także przenikać przez ciała stałe, o czym z przykrością przekonujemy się, gdy sąsiedzi puszczają muzykę na cały regulator i przez ścianę zaczyna docierać do nas pulsowanie basów. Hałasy mogą także rozchodzić się w cieczach – aby to zaobserwować, wystarczy zrobić w wannie wydech pod wodą. Ale w przestrzeni kosmicznej, która jest niemal idealną próżnią, nie ma żadnych dźwięków. A zatem, kiedy następnym razem oglądając jakiś

hollywoodzki hit, usłyszycie, że statek kosmiczny eksploduje z głośnym hukiem, będziecie wiedzieli, że reżyser nie odrobił pracy domowej.

Żeby powstał dźwięk – jakikolwiek: szelest, wrzask czy delikatny odgłos pękającej bańki mydlanej – musi istnieć obiekt poruszający się na tyle szybko, by wprowadzić w ruch medium, czyli ośrodek, w którym się porusza (mówiąc o medium, nie mamy na myśli osoby o zdolnościach parapsychicznych, ale jakąś substancję, taką jak ciało stałe albo powietrze). Spróbujcie coś zanucić. Aby wydać dźwięk, będziecie musieli na tyle energicznie wypuścić powietrze, by wprowadziło w wibracje wasze struny głosowe. Wibracja to podstawa każdego dźwięku, czy będzie to głos naszego ulubionego piosenkarza ryczącego na cały regulator z głośnika czy delikatny brzęk gitarowej struny. Wibrujące struny głosowe, membrana głośnika czy metalowy drut naciskają na sąsiadujące z nimi cząsteczki powietrza, co sprawia, że stają się one gęściej upakowane. Cząsteczki powietrza poddane ścisnaniu zaczynają szybko poruszać się w stronę miejsc, gdzie powietrze jest rzadsze, i zderzają się z cząsteczkami leżącymi nieco dalej. Nowa grupa cząsteczek przejmuje trochę pędu pierwotnych cząsteczek i porusza się dalej, napierając na inne cząsteczki położone w jeszcze większej odległości od źródła.

Rezultat? Dźwięk rozchodzący się w powietrzu pod postacią fali o występujących na przemian obszarach wysokiego i niskiego ciśnienia. Fala dźwiękowa – podobnie jak wszystkie fale – ma częstotliwość, oznaczającą, ile takich zmian ciśnienia, od wysokiego do niskiego i z powrotem, przechodzi przez dany punkt w ciągu sekundy. Częstotliwość to wygodna miara, ponieważ dzięki niej można podzielić dźwięki na różne kategorie. Jednostką częstotliwości jest herc (Hz), nazwany na cześć niemieckiego fizyka Heinricha Hertza (1857–1894), który w 1886 roku wyemitował pierwsze fale radiowe. Dźwięk środkowego C na fortepianie ma

częstotliwość 262 Hz. Głos ludzki stanowi mieszaninę dźwięków o różnej częstotliwości, ale jego podstawowe wibracje wahają się od 80 Hz, w przypadku mężczyzny śpiewającego głębokim basem, do 1100 Hz, w przypadku piszczącego wysokim głosem niemowlaka. Najwyższy dźwięk, jaki można wydobyć z fortepianu, położony na skali 3 oktawy powyżej środkowego C, ma jeszcze większą częstotliwość – 4186 Hz.

Zwierzęta wprawdzie nie zajmują się muzyką, ale dźwięki odgrywają w ich życiu ogromną rolę. Te fale wysokiego i niskiego ciśnienia pomagają zwierzętom żyjącym w naturze znajdować pożywienie, wykrywać zagrożenia, komunikować się z potencjalnymi partnerami seksualnym i poznawać otoczenie. Jak dowiemy się w tym rozdziale, zwierzęta wykorzystują dźwięki wszędzie, od rejonów wysoko nad naszymi głowami, gdzie latają nietoperze, przez zapyloną powierzchnię ziemi, po której pełzają węże, po morskie głębiny zamieszkałe przez skorupiaki. Aby jednak dźwięk miał znaczenie, zwierzę musi go usłyszeć. Ludzie słyszą dźwięki dzięki temu, że zmiany ciśnienia powietrza docierające do naszych uszu wprawiają nasze bębniuszki uszne w wibracje o takiej samej częstotliwości, jaką ma fala dźwiękowa. Następnie 3 kostki ucha środkowego – młoteczek, kowadełko i strzemiączko – przekazują te wibracje do ucha środkowego, gdzie wywołują falę w znajdującym się tam płynie, a ta z kolei porusza komórki rzęsate, które przekazują sygnały nerwowe do mózgu. A zatem odpowiedź na pytanie, czy drzewo upadające w pustym lesie wywołuje jakiś dźwięk, brzmi: tak, powstaje wtedy fala dźwiękowa, jednak musimy się tam znaleźć, aby ją usłyszeć.

Idziemy do zoo

Wróćmy do zakochanych pawi i dziwnych dźwięków, których nie potrafimy usłyszeć. Angela Freeman i James Hare nie mieli pieniędzy, aby polecieć w ojczyste strony pawi, do Indii, Pakistanu albo Sri Lanki, i obserwować te ptaki w naturze. Zainstalowali się więc w Assiniboine Park Zoo, w centrum Winnipeg, wyposażeni w sprzęt przystosowany do rejestracji odgłosów, jakie pawie wydają za pomocą swoich trenów, w tym dźwięków niesłyszalnych dla ludzkiego ucha. Poza tym mieli kamery wideo, dzięki którym mogli zarejestrować, jak blisko samice podchodzą do potencjalnych partnerów i – co najważniejsze – czy jakaś para uprawia seks.

Takie podglądanie pawi w komfortowych warunkach – żadnych zarzanych nocy, komarów, jadowitych węży ani skrajnych temperatur – może wydawać się niezłą fuchą. Jednak, jak opowiada Angela Freeman, ta praca była „wyjątkowo trudna”. Przede wszystkim, jeśli wiało albo padało, nie mogła zarejestrować żadnych dźwięków przyzwoitej jakości. Poza tym w zoo było tłoczno – goście, którzy głośno rozmawiali w chwili, gdy jakiś paw rozpościerał swój ogon, zakłócali nagrania. Obsługa Assiniboine postanowiła pomóc badaczom, wpuszczając Angelę Freeman i Jamesa Hare’a wcześniej, przed godziną otwarcia, aby mogli we względnie spokojnym otoczeniu zarejestrować wczesnoporanne dane. Wtedy pojawił się inny, nieoczekiwany problem: dzikie indyki mieszkające w zoo. „Kiedy pawie siadały na piknikowym stole, indyki, które tego nie potrafią, biegały wokół stołu, usiłując się zorientować, w jaki sposób się tam dostać” – opowiada badaczka. To nadaje zupełnie nowe znaczenie wyrażeniu „resztki ze stołu”.

Mimo tych trudności Angela Freeman i James Hare zarejestrowali mnóstwo dźwięków wydawanych przez pawie. Komputerowa analiza nagrań wykazała, jakie częstotliwości miały pawie skrzeki oraz jak długo trwały. Wydobywające się z gardła pawi słyszalne dźwięki o wysokiej częstotliwości trwały na ogół sekundę albo dwie i miały częstotliwości od 400 Hz do

20 tysięcy Hz. Dwoje badaczy zauważyło także dziwne sygnały o niskiej częstotliwości, w zakresie od 3 do 6 Hz. Podobnie jak nie widzimy światła podczerwonego, które ma niższą częstotliwość niż zwykle światło czerwone, nie potrafimy także słyszeć fal dźwiękowych o niskiej częstotliwości, czyli infradźwięków. Zresztą nie tylko pawie generują infradźwięki; potrafią to także inne zwierzęta, w tym hipopotamy, wieloryby i słonie. Źródłem takich fal o niskiej częstotliwości są nawet trzęsienia Ziemi, wybuchające wulkany, fale oceaniczne i meteoryty spadające na Ziemię.

Dziwne wrażenia

Nie słyszymy infradźwięków, ponieważ nasze uszy przestają reagować na częstotliwości poniżej 20 Hz, czyli mniej więcej 9 Hz niżej niż najniższy dźwięk na fortepianie – A położone jakieś 3 oktawy z kawałkiem poniżej środkowego C. Jednak niektórzy z nas potrafią wyczuwać dźwięki o niskiej częstotliwości w inny sposób. W 2003 roku brytyjska kompozytorka Sarah Angliss zorganizowała w Purcell Room w Londynie eksperymentalny koncert, na którym wykonała utwór muzyczny inkrustowany infradźwiękami o częstotliwości 17 Hz. Ponad jedna piąta uczestników koncertu twierdziła potem, że doświadczała niepokoju, obawy lub smutku albo czuła dreszcz przebiegający po kręgosłupie. To interesująca myśl, że słuchacze koncertu w jakiś sposób wyczuwali infradźwięki, choć nie można wykluczyć prostszego wyjaśnienia – należeli do osób bardziej lękliwych.

Niemniej pawie nie starają się nikogo przestraszyć. Chodzi im o seks. Zestawiając zarejestrowany obraz wideo z nagraniami dźwiękowymi, Angela Freeman i James Hare odkryli, że samiec wytwarza 2 rodzaje infradźwięków. W obu przypadkach używa jaskrawo ubarwionych piór, które rozkłada

w swoim pawim ogonie (zamiast właściwego ogona z krótkich brązowych piór). Kiedy paw wprawia długie pióra trenu w gwałtowne drzenie – w taki sposób, że przez każde z nich przebiega nagła fala z góry na dół – generuje infradźwięki w zakresie od 2,8 do 4,2 Hz. Kiedy zaś wprawia swój tren w pulsowanie przebiegające od końca pióra najbliższego ciała i przesuujące się na zewnątrz, powstają dźwięki, które mają przeciętnie nieco wyższą częstotliwość, z zakresu 3,1 do 6,4 Hz. Dlaczego paw w ogóle używa tych dwu rodzajów subtelnych i nieco odmiennych infradźwięków?

Aby znaleźć odpowiedź, musimy nieco głębiej zanurzyć się w fizykę dźwięków. Jeśli zdarza wam się mieszkać na trasie przelotu samolotów, znacie uczucie ulgi, jakie ogarnia was za każdym razem, kiedy samolot znika w oddali. Samolot nie robi się cichszy, gdy odlatuje, jego silniki nadal pracują na pełnych obrotach. Jednak dźwięk silników, który początkowo rozchodzi się w niewielkiej przestrzeni, rozprzestrzenia się we wszystkich kierunkach, niczym nieustannie nadmuchiwana piłka plażowa, i słabnie w miarę oddalania się od źródła. Oczywiście dźwięk słabnie wraz z pokonywaną odległością także dlatego, że wprawienie cząsteczek powietrza w wibracje wymaga wydatkowania energii na przewyciężenie ich niechęci do poruszania się, co oznacza, że dźwięk nieustannie traci energię, rozchodząc się w powietrzu. A ponieważ fale o wysokiej częstotliwości wprawiają powietrze w wibracje o wiele częściej w jednostce czasu, tracą energię szybciej niż fale o niskiej częstotliwości. To dlatego słyszycie basy dobiegające ze studenckiej balangi na końcu ulicy, ale już nie wokale. Głosy ludzkie mają wyższą częstotliwość i dlatego słabną szybciej.

I właśnie w tym „rozrzedzaniu się” dźwięku – słabnięciu wraz z odległością – kryje się odpowiedź na zagadkę muzyki uprawianej przez pawie. Jak pokazały nagrania Angeli Freeman, rodzaj infradźwięków wydawanych przez pawia zależy od odległości dzielącej go od obiektu

pożądania. Jeśli samica znajduje się nie dalej niż 5 metrów od niego, amant najczęściej wprawia swój tren w pulsowanie, ale jeśli atrakcyjna pawica jest nieco dalej, samiec zwykle emituje rodzaj infradźwięków powstających, gdy wprawia swoje pióra w drżenie. Dźwięk, który jest efektem tych wibracji, ma przeciętnie niższą częstotliwość niż dźwięk powstający w następstwie pulsowania, a zatem słabnie wolniej i dolatuje dalej, dzięki czemu z większym prawdopodobieństwem zwróci uwagę dalej znajdujących się samic. W końcu nie ma sensu szeptać czułych słówek do samicy, która znajduje się za daleko, aby mogła je usłyszeć.

Skąd możemy być pewni, że te ptaki odbierają infradźwięki? Żeby doprowadzić do końca swoją romantyczną misję, Angela Freeman i James Hare odtwarzali przez głośniki nagrane wcześniej głosy pawi innym pawiom w ogrodzie Assiniboine. Okazało się, że zarówno samce, jak i samice reagowały większym pobudzeniem na mieszaninę dźwięków słyszalnych oraz infradźwięków wydawanych przez pawi ogon. Samice biegały w kółko, podczas gdy samce odpowiadały na nawoływania i zwracały się w stronę głośników. Natomiast kiedy z głośników rozlegały się tylko słyszalne sygnały pawiego trenu, samice i samce nie reagowały. Infradźwięki muszą odgrywać podstawową rolę w komunikacji tych ptaków; samce odpowiadały nawoływaniem nawet wtedy, gdy odtwarzano wyłącznie infradźwięki. W dodatku pawie, które wykroiły sobie pewien teren jako własne terytorium – właściciele tego terytorium – reagowały bardziej energicznie na infradźwięki niż samce, które po prostu przechodziły obok zestawu głośnikowego badaczy. Sprawa zamknięta. Pawie emitują infradźwięki, aby zwrócić uwagę pawic, i wykrywają je, aby chronić swoje terytorium przed rywalami.

Wiedzę na temat rozrzedzania się (słabnięcia) dźwięków zawdzięczamy George'owi Gabrielowi Stokesowi, fizykowi znanemu nam z prawa Naviera-

Stokesa, który w latach czterdziestych XIX wieku badał to zjawisko na uniwersytecie w Cambridge, w Wielkiej Brytanii. Podczas swoich pionierskich badań Stokes nie interesował się zwierzętami, ale nieco później miał pewien przelotny kontakt ze sprawą pawia. Gdzieś w latach sześćdziesiątych XIX wieku Stokes dostał list od Charlesa Darwina, który wrócił w nim do pytania postawionego na początku XVIII wieku przez Isaaca Newtona. Newton zastanawiał się, czy zielona i błękitna barwa pawiego oka stanowi efekt nie tyle pigmentacji piór, ile raczej ich struktury, która sprawia, że światło odbija się od nich w tak niezwykły sposób (zob. rozdział 6).

„Będzie Pan uprzejmy zwrócić uwagę na pewną kwestię – pisał Darwin do Stokesa – a mianowicie, czy stopniowo coraz większa bądź też coraz mniejsza grubość, małymi krokami, poczynając od centrum w stronę obwodu, powierzchniowej warstwy barwnej substancji będzie odpowiedzialna za powstające w efekcie strefy barw; czy też muszą to być obszary zabarwionej materii różnego rodzaju”. Przeprowadzając kilka prostych eksperymentów, Stokes potwierdził przypuszczenie Newtona i Darwina. Jednak na pewno nigdy nie przyszło mu do głowy, że jego badania nad rozrzedzaniem się dźwięku przyczynią się 150 lat później do rozwiązania innej zagadki – i pozwolą odpowiedzieć na pytanie, dlaczego pawie tak starannie dobierają charakter wydawanych przez siebie odgłosów.

Sposób, w jaki pawie wykrywają infradźwięki, pozostaje zagadką, przy czym nie ulega wątpliwości, że mają lepszy słuch niż my w zakresie niższych częstotliwości. Nie chcemy przez to powiedzieć, że jesteśmy jakimiś mistrzami w wychwytywaniu częstotliwości wysokich. Większość z nas słyszy najlepiej w zakresie średnich częstotliwości, od 2000 Hz do 5000 Hz, czyli mniej więcej dwie środkowe oktawy na klawiaturze fortepianu. Nasz słuch słabnie szybko w wyższych częstotliwościach, zwłaszcza z upływem lat albo wtedy gdy często słuchaliśmy głośnej muzyki (spytajcie jakiejś

przebrzmiałej gwiazdy rocka cierpiącej na większą bądź mniejszą głuchotę). Nawet ci z nas, którzy są obdarzeni doskonałym słuchem, nie potrafią wychwycić niczego powyżej 20 000 Hz. Ultradźwięki są dla nas niesłyszalne. Dlatego badanie USG mające pokazać obraz ciąży przebiega w ciszy, jeśli nie liczyć okrzyków radości, jakie wybuchają, gdy rodzice po raz pierwszy widzą płód na monitorze. Ultradźwięki wytwarzane przez prąd elektryczny, który wprawia w wibracje kryształy w szpitalnym urządzeniu USG, zwykle przepływają swobodnie przez brzuch matki, ale odbijają się od tego, na co się tam natkną, i w rezultacie powstaje tak oczekiwany, choć nieco zamazany obraz dziecka: białe plamy oznaczają kości odbijające dźwięki; czarne – płyny, które przepuszczają dźwięk; szare bardziej miękkie tkanki.

Podczas gdy ludzie nie słyszą ultradźwięków, niektóre zwierzęta to potrafią. Wysokotonowa gwizdanka na psa emituje fale w zakresie od 23 000 do 54 000 Hz, idealnie nadające się do tego, aby przywołać waszego ulubieńca do porządku, nie irytując jednocześnie właścicieli innych psów. Koty również słyszą ultradźwięki, podobnie jak delfiny i żółwie. Ale jest pewien rodzaj zwierząt, który jest prawdziwym królem w świecie wysokich częstotliwości. Pora porzucić twardy grunt i spojrzeć w niebo na pewne stworzenie, które tam lata.

Na nietoperza!

Noc w parkowych zakamarkach angielskiej posiadłości. Nad rozległymi trawnikami góruje wielki londyński platan, w strumieniu srebrzy się odbite światło księżyca. To rodzaj miejsca, w którym spodziewalibyśmy się ujrzeć pawie, a przynajmniej jakiegoś ducha. Wieczór jest łagodny i w świeżym

powietrzu unosi się zapach liści oraz nocnych kwiatów; widać też, że nie brakuje licznych ciem. Od czasu do czasu granatowe niebo przecina trzepoczący skrzydłami nietoperz. Gacek zatacza kręgi i nagle robi zwrot, by wessać upolowane w locie owady.

Jest ciemno. W jaki sposób szybko latający nietoperz może złapać w locie równie szybko lecącego owada? Ten wyczyn wydaje się bardziej imponujący niż popisy na trapezie w cyrku, gdzie przynajmniej akrobata, który ma być schwytyany, gorąco tego pragnie. Niewykluczone, że nocna aktywność gacek stanowi pamiątkę z czasów, gdy jakieś 220 milionów lat temu podobni do myszy przodkowie nietoperzy ewolucyjnie wykształcili się z gadów i starali się nie dać się zjeść drapieżnikom. Dzięki życiu w ciemnościach mogli uniknąć spotkania z aktywnymi za dnia dinozaurami. Jednak po ciemku nie bardzo mogli się zorientować, gdzie się znajdują ani dokąd zmierzają. Kiedy niektóre z tych wczesnych ssaków po raz pierwszy wzbiły się w powietrze, wykształciły prymitywny system emitowania impulsów ultradźwiękowych, aby nieco lepiej się zorientować, jak wygląda otoczenie.

To nie znaczy, że te wczesne nietoperze wiedziały, co robią. „Przypuszczalnie zaczęło się od bardzo podstawowej analizy echa odbitego, z wykorzystaniem dźwięków pierwotnie wytwarzanych w innym celu, takim jak komunikacja – uważa Holger Goerlitz, specjalista od życia nietoperzy z Ornitologicznego Instytutu Maxa Plancka w Bawarii, w Niemczech. – Można to porównać do sytuacji, gdy wchodzisz do kościoła albo do piwnicy i rozmawiasz z kimś albo słyszysz odgłosy swoich kroków, i zauważasz, że te odgłosy brzmią inaczej w zależności od tego, czy pomieszczenie, w którym się znajdujesz, jest duże czy małe”.

Nietoperze emitują sygnały ultradźwiękowe o wysokiej częstotliwości w taki sam sposób, w jaki my mówimy albo śpiewamy, wprawiając

wibracje struny głosowe, przy czym „wykrzykują” ten dźwięk przez swój pyszczyk lub przez nos, jak robią to niektóre gatunki. Obserwując następnie, ile czasu trzeba na to, aby ultradźwięk powrócił do nich odbity od drzewa, ścian jaskini albo innych powierzchni odbijających dźwięki, nietoperze mogą zorientować się, jak daleko znajdują się te obiekty. Fala, która wróciła do nich szybko, z pewnością musiała uderzyć w coś leżącego w pobliżu, podczas gdy fala wracająca później z pewnością pokonała dłuższą drogę. Dzięki takiej echolokacji nietoperze mogą latać w ciemnościach, omijając przeszkody.

Ultradźwiękowe nawoływania nietoperzy należą do najgłośniejszych dźwięków w królestwie zwierząt. Aby nie ogłuszyć siebie samych emitowanym hałasem, niektóre nietoperze, w chwili gdy wydają swój krzyk, skurczają mięśnie zamykające uszy. Inne emitują dźwięki o częstotliwości, której same nie potrafią usłyszeć – w każdym razie nie wcześniej, nim dźwięk odbity do nich powróci. Starając się sprytnie ochronić uszy, nietoperz wykorzystuje to samo zjawisko fizyczne, które sprawia, że wysokość syreny ambulansu rośnie, kiedy pojazd się do nas zbliża, a opada, kiedy się oddala. To zjawisko, nazwane efektem Dopplera, na cześć Christiana Dopplera (1803–1853), polega na tym, że częstotliwość dźwięku rośnie, gdy źródło dźwięku się do nas zbliża, ponieważ w mniejszej przestrzeni musi zmieścić się więcej fal dźwiękowych. Częstotliwość spada, gdy pojazd się od nas oddala, ponieważ grzbiety fal są teraz bardziej od siebie oddalone. Tak zwane przesunięcie dopplerowskie pojawia się nawet wtedy, kiedy źródło dźwięku stoi, ale my jesteśmy w ruchu, zależy bowiem od względnego ruchu między nami a pojazdem wydającym dźwięk. A zatem gdy nietoperz, który nie słyszy wydawanych przez siebie ultradźwięków, leci w stronę wracającej do niego odbitej fali, to echo na skutek zjawiska Dopplera jest przesunięte w stronę wyższej częstotliwości i obecnie znajduje się w zakresie dźwięków,

które nietoperz może usłyszeć. Ale, co najważniejsze, to echo straciło w swojej drodze tam i z powrotem sporo energii i jest teraz cichsze niż pierwotny ultradźwiękowy impuls, dzięki czemu uszy nietoperza wychodzą z tego spotkania fal bez szwanku.

Wiele gatunków nietoperzy nie tylko pokonuje drogę od punktu A do punktu B, nie rozbijając się o żadne duże przeszkody, lecz potrafi także za pomocą echolokacji namierzać szybko poruszające się niewielkie owady, takie jak ćmy, z myślą o kolacji. Dzieje się tak dlatego, że bijące skrzydła ćmy nie tylko odbijają z powrotem w stronę nietoperza inną ilość dźwięku, ale w dodatku przyczyniają się też do powstania dopplerowskiego przesunięcia ultradźwiękowych impulsów wysyłanych przez nietoperze. W rezultacie powstaje dźwiękowa „sygnatura”, którą nietoperz może wyłowić z docierającego do niego echa, co pomaga mu zlokalizować pożądanego owada.

A teraz ucho

A jednak, mimo tej imponującej umiejętności echolokacji, nietoperz nie zawsze może postawić na swoim. Wiele ciem ma uszy i słyszy ultradźwięki ostrzegające je przed polującymi nietoperzami. Ta ewolucyjna odpowiedź w wojnie gatunków okazuje się skuteczna: ćmy, które mają uszy, zwykle rzadziej padają ofiarą nietoperza niż ich kuzynki pozbawione tego organu. Czy opłaca się nietoperzowi zareagować na tę odpowiedź jeszcze bardziej wyrafinowanym posunięciem? Jeżeli nietoperz nie schwyta ćmy, to oczywiście będzie dla niego nieprzyjemne, lecz nie umrze z głodu i następnego dnia będzie mógł zapolować znowu. Po prostu straci jeden posiłek. Jednak dla ćmy stawką w tej grze jest życie. Jeśli przegra potyczkę,

zostanie zjedzona. Biologowie nazywają tę nierównowagę szans zasadą życie kontra obiad.

Aby dowiedzieć się, czy nietoperze podniosły stawkę w tym wyścigu zbrojeń, Goerlitz i jego kolega Matt Zeale postanowili zbadać odchody grupy złożonej z 51 osobników z gatunku mopek zachodni (*Barbastella barbastellus*) i zobaczyć, co zjadły. Łacińska nazwa tego gatunku pochodzi od wyrażenia oznaczającego „brodatą gwiazdę”, ze względu na białe włosy, które porastają ich górną wargę. Mopki to nietoperze, które wydają najgłośniejsze ultradźwięki, o częstotliwości 33 000 Hz, znajdujące się w zakresie dźwięków słyszanych przez większość ciem wyposażonych w narząd słuchu. Pomyślelibyście więc, że ćma wyposażona w odrobinę rozsądku po usłyszeniu ultradźwiękowych nawoływań nietoperza odpłynie w dal. Jednak Goerlitz i Zeale, na podstawie badań genetycznych niestrawionych resztek pokarmu, z pewnym zaskoczeniem odkryli, że mopek zachodni żywi się niemal wyłącznie ćmami, które mają uszy. Innymi słowy, ten nietoperz uwielbia pożerać właśnie te ćmy, które nasłuchują jego odgłosów. Co tu się właściwie dzieje? – zadali sobie pytanie badacze.

Właśnie dzwoniłem...

Żeby się tego dowiedzieć, Goerlitz pojechał do Mottisfont, siedemnastowiecznej posiadłości na północ od Southampton, w Wielkiej Brytanii. Posiadłość, wzniesiona na miejscu dawnego klasztoru, pośrodku rozległych ogrodów, to jedno z niewielu miejsc w Wielkiej Brytanii, gdzie mopki się rozmnażają. Goerlitz jest entuzjastą terenowych badań życia nietoperzy, mimo że zwykle przeprowadza się je po zapadnięciu zmroku, są męczące i trudno cokolwiek zobaczyć, jeśli gacków nie obserwuje się

wczesnym wieczorem. „Część z tych gości pojawia się, kiedy jeszcze jest szarawo – mówi. – Jestem zafascynowany, kiedy mogę je zobaczyć, jak lecą szybko nad żywopłotem albo na tle nieba. Można dostrzec, jak nagle rzucają się w stronę jakiegoś owada: lecą i nagle robią ostry skręt, żeby coś złapać”.

Goerlitz przysłuchiwał się odgłosom nietoperzy, używając detektora, który przetwarza ultradźwięki na dźwięki o częstotliwościach słyszalnych przez człowieka. „Słyszysz te ich regularne nawoływania, czik-czik-czik – opowiada – a potem trzask i wydają bardzo szybką sekwencję, kiedy coś złapią. Masz wrażenie, że widzisz to, co robią, wyłącznie przysłuchując się dźwiękom”. Kolejna niespodzianka polegała na tym, że ultradźwiękowe fale wydawane przez mopka były 10 do 100 razy słabsze, niż Goerlitz się spodziewał. Ten ultradźwiękowy szept oznacza, że mopki mogą wykrywać jedynie owady znajdujące się w odległości do 5 metrów. Przy większej odległości echo powracające do nietoperza jest zbyt słabe, by ten mógł je usłyszeć. Jednak gatunki nietoperzy wydających głośniejsze dźwięki potrafią, posługując się echolokacją, namierzyć ofiarę w odległości do 15 metrów.

Oslabiać, osłabiać

Podsumujmy: po pierwsze, mopek woli raczej żywić się ćmami słyszącymi, że się zbliża, niż ćmami, które nie mogą go usłyszeć. Po drugie, cicho nawołując, nietoperz może odnaleźć jedynie te spośród ciem słyszących, które są bardzo blisko. A jednak jego strategia jest tak skuteczna, że biologowie ukuli nawet dla niej nazwę: ukradkowa echolokacja (*stealth echolocation*). A zatem jak to działa?

W końcu fizyka wcale nie stoi po stronie nietoperza. Echo wracające w stronę mopka jest cichsze niż dźwięk, jaki dociera do ćmy. A to dlatego że

sygnał wysłany przez nietoperza pokonał podwójną drogę – od nietoperza do ćmy i z powrotem – czyli dwukrotnie stracił swoją moc na skutek rozrzedzania się dźwięku, tego samego zjawiska polegającego na słabnięciu energii fali dźwiękowej, które spotkaliśmy przy okazji omawiania odgłosów pawia. Co gorsza, ultradźwiękowy sygnał nietoperza słabnie jeszcze bardziej, gdy odbija się od ćmy. Ten podwójny cios oznacza, że w sytuacji gdy reszta warunków się nie zmienia, nietoperzowi trudniej jest wykryć ćmę, niż ćmie usłyszeć nietoperza. Ćma potrafi usłyszeć nietoperza z większej odległości niż ta, na jaką musi się zbliżyć mopek do dźwięku, którego nasłuchuje. Czy to oznacza, że prawa fizyki sprzysięły się przeciwko nietoperzowi?

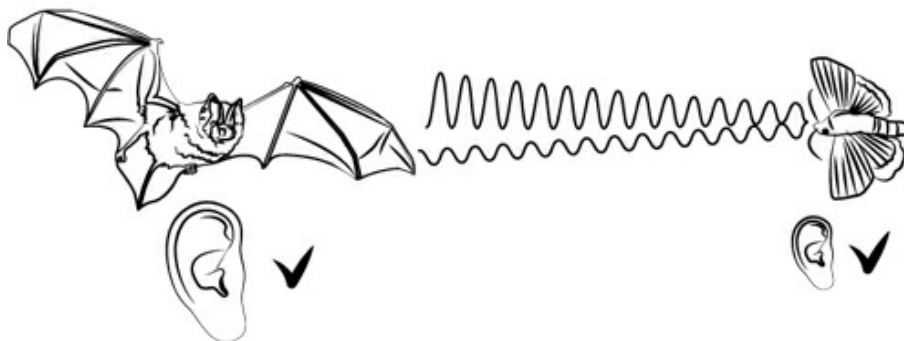
Goerlitz i jego koleżanka Hannah ter Hofstede postanowili przenieść uwagę z mopka na jego ofiarę, ćmę. Zainteresowali się zwłaszcza dużą żółtawą ćmą z gatunku rolnica tasiemka (*Noctua pronuba*), o rozpiętości skrzydeł około 50 mm, stanowiącą jeden z ulubionych przysmaków nietoperza. Podczas lotu albo kiedy rozkłada pomarańczowe tylne skrzydła, wystają one spod cętkowanych szarobrazowych skrzydeł przednich. Rolnica także słyszy ultradźwięki. Jednak, jak przekonali się badacze, duże żółte rolnice nie słyszą ich równie wyraźnie jak mopki.

W jaki sposób ta różnica w czułości słuchu wpływa na rezultat pojedynku między ćmą a nietoperzem? Konflikt między prawami fizyki działającymi przeciw nietoperzowi a jego dobrym słuchem oznacza, że na skali ultradźwięków o określonej wysokości natężenia hałasu istnieje punkt krytyczny, w którym nietoperz słyszy na tyle dobrze, żeby za pomocą echolokacji namierzyć ćmę, a ćma słyszy wystarczająco dobrze, by usłyszeć nietoperza. W tym położeniu nietoperz dzięki lepszemu słuchowi słyszy echo, jakie do niego dociera, choć jest słabsze (z powodu dodatkowego „rozcieńczenia” dźwięku) od dźwięku, jaki dobiega bezpośrednio od niego do ćmy. Nietoperz 0, ćma 0. Jeśli jednak nietoperz wyśle ultradźwięki

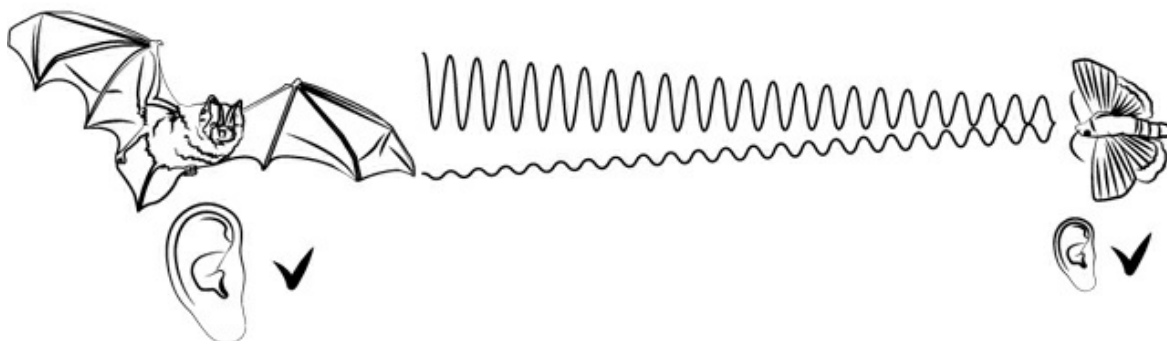
głośniejsze od tej krytycznej wartości równowagi, ćma wygrywa, ponieważ słyszy nietoperza wcześniej i z większej odległości, a więc w chwili gdy nietoperz nie potrafi jeszcze wykryć echa, i ćma ma czas bezpiecznie odlecieć. Nietoperz 0, ćma 1. Tylko emitując ultradźwięki o słabszym natężeniu, poniżej tego progu, mopek o wyostrzonym słuchu może wykryć słyszącą ćmę, podczas gdy ćma go nie słyszy. Nietoperz 1, ćma 0. Ultradźwiękowy impuls emitowany przez nietoperza jest cichy, echo, które do niego wraca, jest jeszcze cichsze, ale nietoperz je wychwytuje swoim lepszym słuchem. Dźwięk docierający do ćmy jest głośniejszy, ponieważ pokonał drogę tylko w jedną stronę, jednak przygłucha ćma nie potrafi go usłyszeć. A zatem, nieszczęsna ćmo, mimo swojego słuchu jesteś kolacją.

Zupełnie jak gdyby nietoperz zaczął się na ćmę, podkradając się ku niej tak cicho, że jego ofiara go nie słyszy aż do chwili, gdy jest za późno. Typowa duża żółta ćma, rolnica tasiemka, słyszy mopka dopiero wtedy, gdy napastnik znajdzie się w odległości 3,5 metra, jak stwierdził Goerlitz; w większej odległości sygnał nadawany przez nietoperza jest za cichy. A skoro mopek porusza się z prędkością około 8 m/s – tylko nieco wolniej niż sprinter na olimpiadzie – potrafi pokonać odległość 3,5 metra w niecałe 0,5 sekundy. W chwili gdy ćma wreszcie słyszy nietoperza, nie ma już czasu na ucieczkę. Biorąc pod uwagę czasy reakcji oraz to, że owad musi zaczekać na reakcję innego, mniej pobudliwego nerwu słuchowego, zanim zacznie swój gwałtowny zygzakowaty lot, aby uniknąć schwytania, te pół sekundy to za mało. Z punktu widzenia ćmy sytuacja wygląda tak, jak gdyby nietoperz nagle pojawił się nie wiadomo skąd.

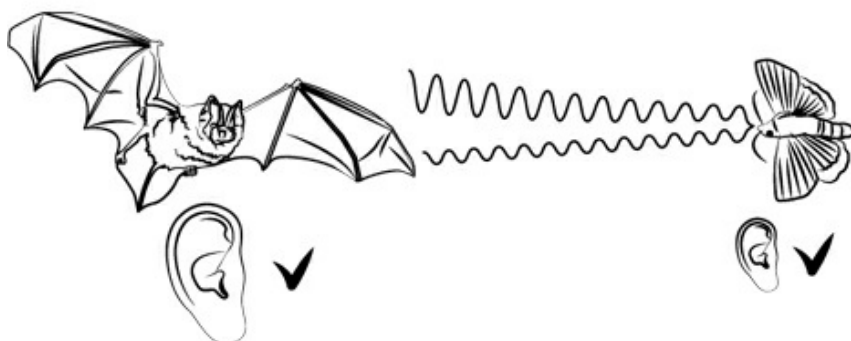
PUNKT KRYTYCZNY: NIETOPERZ 0 – ĆMA 0



NIETOPERZ WOŁA GŁOŚNIEJ: NIETOPERZ 0 – ĆMA 1



NIETOPERZ WOŁA CISZEJ: NIETOPERZ 1 – ĆMA 0



Rysunek 4.1 Atak nietoperza. Mopek zachodni wyjątkowo dobrym słuchem kompensuje sobie wynikające z praw fizyki osłabienie dźwięku odbitego od ofiary.

Mopek zrobił więc kolejny krok w wyścigu zbrojeń, emitując swoje

ultradźwiękowe sygnały tak cicho, że może nie zauważony zbliżyć się do swojej ofiary. Z punktu widzenia ćmy oczywistą odpowiedzią byłoby wyostrenie słuchu. Jednak, jak sądzi Goerlitz, rolnice nie zdecydowały się na ten krok, ponieważ wpadanie w panikę z powodu każdego słyszalnego dźwięku – takiego jak choćby odgłosy konika polnego albo sygnały nietoperzy znajdujących zbyt daleko, by mogły stanowić dla nich zagrożenie – oznaczałoby niepotrzebną stratę czasu i energii. Nie ma sensu reagować na zagrożenia, które nie są rzeczywiste.

Właściwie dlaczego mopek stara się przeciwdziałać skutkom osłabienia siły dźwięku i ściga ćmy, które słyszą, zamiast zająć się innymi rodzajami tych owadów? Sekret tkwi w rywalizacji. Ponieważ żaden inny gatunek nietoperzy nie wykorzystuje tej zasady fizyki tak jak mopek, nasz bohater może zjeść tyle ciem słyszających, ile ma ochotę, zostawiając innym nietoperzom uganianie się za ćmami pozbawionymi słuchu. Dzięki swojej taktycznej umiejętności wykorzystywania ultradźwięków – dobry słuch plus echolokacja za pomocą supercichych sygnałów – mopek wygrywa rywalizację. Ten gacek z pewnością nie jest gapowaty^[5].

Różowy ślad na piasku

Na zapyłonej ulicy w jakiejś wiosce w południowych Indiach leży w koszu zwinięta szarobrązowa kobra. Ten jadowity wąż długości około metra kryje się pod słomianą pokrywą pojemnika. Tuż obok, na macie, siedzi ze skrzyżowanymi nogami członek miejscowego plemienia Irula, ubrany w turban i bufiaste pomarańczowe spodnie. Mężczyzna, bacznie obserwowany przez zgromadzonych widzów, dmucha w *pungi*, rodzaj drewnianego fletu przypominającego nasz flet prosty, ale z bulwiastym

wybrzuszeniem pośrodku. Przebierając palami po otworach swojego instrumentu, mężczyzna wydobywa z niego uwodzicielskie dźwięki. Wreszcie kobra wyłania się z koszyka; unosząc pionowo górną część ciała, kołysze głową z boku na bok, jak gdyby była zaczarowana muzyką. Wydaje się, że flecista całkowicie panuje nad poczynaniami gada.

Ta sztuczka przez stulecia zapewniała chleb zaklinaczom węży. Jednak w rzeczywistości nie ma w niej żadnej magii. Węże nie mają uszu i nie słyszą dźwięków *pungi*. Gad obserwuje po prostu ruchy instrumentu, śledząc je, jak gdyby to był niebezpieczny przeciwnik. W samym zaklinaniu węży także nie ma nic czarującego: od lat siedemdziesiątych XX wieku posiadanie własnych węży jest w Indiach nielegalne.

A skoro węże nie mają otworów usznych, można by spytać, co właściwie robią w rozdziale poświęconym dźwiękom. Niemniej, jak odkryło dwoje amerykańskich biologów Bruce Young i Malinda Morain, kiedy sami zaczęli robić sztuczki z węzami, sprawa słuchu u tych gadów nie kończy się na braku uszu. Po przeprowadzeniu wielu eksperymentów „z udziałem dwu bardzo dużych kobr królewskich, które warczały jak wściekłe psy”, ilekroć do nich podchodził, by zbadać zjawiska fizyczne związane z tymi dźwiękami, Young zainteresował się „drugą stroną akustyki” – czyli tym, w jaki sposób węże odbierają dźwięki.

Bruce Young i Malinda Morain kupili 4 jadowite saharyjskie żmije rogate (*Cerastes cerastes*). Te beżowobrazowe węże, długości około pół metra, mają skórny róg powyżej każdego oka i żyją na pustyniach Afryki Północnej. Young hodował wcześniej dla przyjemności kilka takich gadów i uwielbiał je obserwować podczas polowania. „Leżą zakopane w piachu i nagle wyskakują w powietrze, robią zwrot i rzucają się na mysz” – opowiada. To mistrzynie zasadzki, które w oczekiwaniu na gryzonia albo przemykające nieopodal jaszczurki zwijają się tak, że wystaje tylko ich głowa.

Przyglądając się swoim ulubienicom, Young zastanawiał się, w jaki sposób saharyjskie żmije wyczuwają obecność ofiary. Ponieważ żmija ma oczy zasypane piachem, musi lokalizować swój posiłek nie wzrokiem, ale dzięki innym sygnałom. A skoro znajduje się pod powierzchnią ziemi, nie może wzorem innych węży znaleźć myszy, wystawiając język i „smakując” obecne w powietrzu chemikalia (nawiałoby jej tylko piachu do pyska). Żeby rozszyfrować tę zagadkę, Bruce Young i Malinda Morain, pracujący w Lafayette College w Pensylwanii, wsadzili swoje 4 żmije do wypełnionego piachem terrarium o wymiarach 2 na 2 metry. „Żmija rogata to bardzo dobre zwierzę do badań – mówi Young. – Moje terrarium z piachem miało na tyle wysokie ściany, że węże nie mogły uciec, a samo laboratorium było dobrze zabezpieczone, nie musiałem więc się martwić, że ukąszą jakąś przypadkową osobę. Każdego ranka przychodziłem i obserwowałem niskie pagórki, które powstają, kiedy żmija zakopuje się w piachu. Przypomniały mi się spotkania z członkami plemienia Irula w Indiach, którzy mają zdumiewający talent do tropienia węży”.

Utrzymując w terrarium, za pomocą lamp, odpowiednią pustynną temperaturę, badacze umieszczali w terrarium mysz w punkcie najdalej położonym od węża i włączali kamerę pracującą z dużą szybkością, by zaobserwować jej ruchy wokół siedliska gada. Gdy mysz zbliżała się na pewną odległość, wąż szybko przechodził do ataku – kąsał, przytrzymywał, po czym zabijał ofiarę. Uczni podczas tych eksperymentów wykorzystali 18 myszy, za każdym razem odnotowując położenie gryzonia w chwili, gdy wąż przypuszczał atak.

Jak dotąd żadnych niespodzianek; saharyjskie żmije rogata zachowywały się w laboratorium tak samo, jak zapewne zachowywałyby się na pustyni. Przyszła więc pora na sztuczki badaczy. Bruce Young i Malinda Morain lekarskim plastrem zalepiali węzom oczy w taki sposób, że gady nie mogły

niczego zobaczyć. Zatykali im też nos, żeby nie mogły niczego poczuć. Po tych zabiegach wąż umieszczony w klatce z myszą atakował ofiarę równie skutecznie jak wcześniej, zanim przesłonięto mu oczy i nos. Saharyjska żmija rogata, choć nie mogła niczego zobaczyć ani wywąchać, potrafiła mimo to wyczuć swoją ofiarę.

Podjeżdżając, że wąż wyłapuje odgłosy kroków myszy przemykającej po piasku, badacze postanowili poddać go działaniu sztucznych wibracji, żeby zobaczyć, w jaki sposób zareaguje. Najpierw zrobili ze styropianu kulę, mniej więcej o rozmiarach myszy, i umieścili ją w swoim terrarium. Następnie podgrzali lampą kulę do temperatury ciała myszy, 37 stopni C, po czym włożyli ją do terrarium węża z przewiązanymi oczami i zatkanym nosem. Cienkim patyczkiem z drewna balsa ostrożnie popychali kulę w stronę głowy węża, po czym w taki sposób uderzali w styropian, aby wytworzyć wibracje terenu, a jednocześnie nie dotknąć przy tym samego węża. Żmija natychmiast wysuwała język i przypuszczała atak na kulę. Chociaż nie mogła niczego dostrzec ani wywąchać, saharijska żmija rogata wyczuwała wibracje kuli i dochodziła do wniosku, że w pobliżu przemyka prawdziwe zwierzę.

Dwie połówki szczęki

Aby dowiedzieć się, w jaki sposób wąż wyczuwa wibracje, Young połączył siły z dwoma fizykami, Paulem Friedelem i Leo van Hemmenem z Uniwersytetu Technicznego w Monachium, w Niemczech. Van Hemmen zaczął fascynować się wężami po swoich badaniach nad słuchem sowy płomykówki i skorpionów. „Wydało mi się dość zabawne, że wiele węży żyje na pustyni, w piachu, i zastanawiałem się, w jaki sposób mogą

cokolwiek usłyszeć, skoro nie mają uszu – wspomina. – Zajęło mi trochę czasu, nim odkryłem, że węże wcale nie są głuche, tyle że zmysł słuchu działa u nich inaczej niż u innych zwierząt”.

To, że węże nie mają w głowie otworów usznych, nie oznacza, że są całkowicie pozbawione uszu. Te gady mają ucho wewnętrzne, ze ślimakiem – spiralną komorą kostną, która u innych zwierząt służy przekazywaniu wibracji fal dźwiękowych do komórek zajmujących się wykrywaniem i przetwarzaniem ich na sygnał wysyłany do mózgu. Te struktury stanowią u węży pozostałość „prawdziwych” uszu, jakie miały, zanim ewolucyjnie dostosowały się do życia pod ziemią, gdzie ich otwory uszne byłyby zatykane piachem. Czy ta archaiczna struktura mogła nadal funkcjonować mimo utraty kluczowego elementu, czyli kanału łączącego ucho wewnętrzne ze światem zewnętrznym? A jeśli tak, to w jaki sposób węże wyczuwają fale dźwiękowe, skoro ich uszy są stale zatkałe?

Przyszła pora, żeby przyjrzeć się innej części głowy węża: dolnej szczęce saharyjskiej żmii rogatej, która – podobnie jak u wszystkich węży – składa się z dwu połówek. Te dwie połówki nie są jak u człowieka spojone ze sobą na sztywno. Są połączone elastycznym więzadłem, dzięki czemu mogą się od siebie oddalać (górną szczęką nie potrafi zrobić tej sztuczki). Umiejętność poruszania niemal niezależnie każdą z połówek dolnej szczęki umożliwia wężowi bardzo szerokie rozwieranie paszczy, a co za tym idzie, wpychanie do gardła swojej ofiary w całości – zaczynając od głowy. Dzięki tej elastyczności pyton albo boa dusiciel mogą połknąć nawet coś tak wielkiego jak sarna, choć jest ona znacznie większa niż paszcza węża.

Van Hemmen zauważył, że żmija rogata zawsze trzyma głowę płasko na ziemi. A zatem, jak rozumował, jeśli fale dźwiękowe wytwarzane przez ofiarę rozchodzą się przez piach, będą wprawiać dolną szczękę węża w wibracje; ten ruch przechodzi następnie z każdej połówki dolejszej szczęki

przez kość kwadratową i kolumienkę, położone z tyłu głowy węża, do ucha wewnętrznego, gdzie włoski znajdujące się w ślimaku także zostaną wprawione w wibracje i pobudzą neurony, które wysyłają sygnały do mózgu gada. Ale zaraz! Które fale dźwiękowe? Dźwięk rozchodzący się w ciałach stałych ma bowiem pewne specyficzne własności, o których do tej pory nie wspominaliśmy, zamiótszy sprawę pod dywan.

Zejsćie pod ziemię

Czas postawić sprawę jasno: dźwięki wędrują w ciałach stałych na kilka sposobów, o czym pewnie wiedzą ci z was, którzy przeżyli trzęsienie Ziemi. Niektóre fale dźwiękowe poruszają się wówczas tak jak wibracje w powietrzu, wyrzuszając ziemię do przodu i do tyłu, w tym samym kierunku, w którym posuwa się fala dźwiękowa. To fale podłużne, jak mówią fizycy. Kiedy podczas trzęsienia Ziemi powstają takie fale, tak zwane fale pierwotne, przechodzą przez wnętrze Ziemi z prędkością około 5–8 km/h i są stosunkowo łagodne: pod ich wpływem najwyżej zatrząsą się szyby w oknach. Z kolei dźwiękowe fale poprzeczne potrzęsają ciałem stałym w górę i na dół, w płaszczyźnie pionowej do kierunku rozchodzenia się fali przez naszą planetę. Podczas trzęsienia Ziemi takie wtórne fale są bardziej niszczycielskie. Poruszają się wolniej, z prędkością 3–4 km/h, i pojawiają się po falach pierwotnych, a ich opóźnienie zależy od odległości, w jakiej znajdujemy się od epicentrum.

Nieco później można poczuć trzeci rodzaj fal dźwiękowych, jakie rozchodzą się w ciałach stałych. I właśnie ten rodzaj fal odgrywa podstawową rolę w życiu żmii rogatej. Ich istnienie przewidział brytyjski fizyk lord Rayleigh (1842–1919) pracujący na uniwersytecie w Cambridge.

Ten rodzaj fal stanowi mieszanę fal poprzecznych i podłużnych. Fale Rayleigha rozchodzą się tuż pod powierzchnią Ziemi (a nie w jej głębi) w ślimaczym tempie 50–300 m/s. Jednak kiedy wreszcie dotrą na miejsce, gwałtownie wstrząsają ziemią w górę i w dół oraz z boku na bok, czasami doprowadzając nawet do zawalania się budynków (nic dziwnego więc, że fale dźwiękowe rozchodzące się w ciałach stałych nazwano falami sejsmicznymi, od greckiego słowa oznaczającego potrząsanie). Jeśli stoicie w ogrodzie i patrzycie na jakiś punkt na ziemi w chwili, gdy przechodzi fala Rayleigha poruszająca się od lewej do prawej, ten punkt będzie – na skutek składania się ruchu w górę i dół oraz w lewo i prawo – poruszał się w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara, mniej więcej po elipsie. Ta elipsa będzie bardzo spłaszczona, ponieważ w przypadku fal Rayleigha zakres ruchu w górę i dół jest większy niż oscylacja od lewej do prawej.

Saharyjska żmija rogata nie musi się przejmować falami Rayleigha powstającymi podczas trzęsienia Ziemi, ale kiedy po piasku pustyni przemyka mysz, około 70 procent energii, jaką gryzoń wysyła w stronę piasku, zamienia się w takie właśnie fale, które podróżują pod powierzchnią pustyni z prędkością około 45 m/s, czyli nieco wolniej niż fale Rayleigha powstające podczas trzęsienia Ziemi. Mają częstotliwość od 200 do 1000 Hz, czyli mniej więcej od środkowego C na fortepianie do dwóch oktaw w górę. Jak łatwo się domyślić, fala Rayleigha wytwarzana przez biegnącą mysz jest nie tylko wolniejsza, ale także znacznie delikatniejsza niż fale powstające podczas trzęsień Ziemi. Ich amplituda – wielkość wibracji – wynosi zaledwie 0,001 milimetra.

Czujesz te wibracje?

Pomysł, że żmija rogata słyszy mysz wytwarzającą fale Rayleigha dzięki temu, że wprawiają one jej dolną szczękę w drżenie, jest sprytny. Van Hemmen miał wszelkie powody po temu, by wierzyć w prawdziwość tej hipotezy: testy wykazały, że węże potrafią za pomocą swojej dolnej szczęki reagować na minimalne wibracje o amplitudzie rzędu 0,00001 milimetra. Ale nawet jeśli żmija rogata potrafi wyczuć drżenie ziemi wywołane przez przemykającą mysz, to zaledwie połowa sukcesu. Wąż musi jeszcze się zorientować, w którym miejscu znajduje się jego potencjalny obiad. Czy to stworzenie wprawia w drżenie piasek z tyłu, za krzakiem? A może gdzieś po lewej? Wąż poluje nocą, więc nie może tego zobaczyć. Poza tym, jak wykazały eksperymenty Bruce'a Younga i Malindy Morain z zasłanianiem węzom oczu, żmija rogata nie potrzebuje zmysłu wzroku, żeby polować.

I znów sekret skuteczności saharyjskiej żmii rogatej kryje się w jej dwuczęściowej szczęce. Jeśli mysz nie znajduje się bezpośrednio przed węzem albo tuż za nim, wytwarzane przez nią fale Rayleigha nie docierają do obu części szczęki węża jednocześnie. W rezultacie powstające wibracje docierają do ucha wewnętrznego żmii z pewnym przesunięciem czasowym i wysyła ono do mózgu odrębne sygnały. Jeśli mysz porusza się dokładnie po prawej stronie szczęki węża, fale dobiegają do niego pod kątem 90 stopni w stosunku do długości szczęk i docierają do prawej strony szczęki jakieś pół milisekundy wcześniej niż do lewej. Jednak jeśli mysz porusza się przed siebie, fale dźwiękowe, jakie wytwarza, docierają do węża pod mniejszym kątem, a zatem powstaje mniejsza różnica czasowa między dźwiękiem uderzającym w dwie strony szczęki węża. Ta różnica czasowa zmniejsza się ponownie, jeśli mysz porusza się w stronę przodu węża. A jeśli gryzoń znajduje się bezpośrednio przed albo za nim, dźwięk dociera do obu połówek

szczęki w tym samym czasie. To przesunięcie w czasie, albo jego brak, wyposaża węża w stereofoniczny odbiór dźwięku i pomaga mu zorientować się, w którym kierunku przypuścić atak.

Rezultat? Za pomocą fal Rayleigha i prostych zasad geometrii wąż może dokładnie wyliczyć, w którym kierunku powinien się udać w poszukiwaniu smaczego posiłku. Van Hemmen i Friedel, jako fizycy, postanowili opracować model odbierania dźwięków przez węża; przy czym dla uproszczenia obliczeń przyjęli, że szczęka saharyjskiej żmii rogatej ma kształt cylindra unoszącego się w morzu piasku. Poza tym założyli, że piasek jest płynem – co, ściśle biorąc, nie jest prawdą – ale to, co tracisz na dokładności, zyskujesz w kategoriach prostoty. Odkryli, że wąż odbiera mniej więcej połowę amplitudy nadchodzącej fali Rayleigha; jego słuch nie jest doskonały i dlatego druga połówka się gubi. Mimo to nadal można mówić o zdumiewającym osiągnięciu, zważywszy na to, że wielkość wspomnianej amplitudy jest rzędu zaledwie miliona atomów wodoru. Inne węże także słyszą stereofonicznie, ale żaden gatunek nie działa z taką precyzją jak żmija rogata.

Kończąc z węzami, wracamy do lorda Rayleigha oraz nazwanych na jego cześć fal, dzięki którym można odpowiedzieć na pytanie, w jaki sposób słyszą te gady. Rayleigh, który nie tylko wyjaśnił, dlaczego niebo jest niebieskie, ale także dostał Nagrodę Nobla za odkrycie argonu, napisał dwutomowe arcydzieło *The Theory of Sound*, pracując nad nim w latach 1872–1873 w Egipcie, gdzie dochodził do zdrowia po ataku gorączki reumatycznej. Okazuje się, że właśnie ten kraj jest ojczyzną saharyjskiej żmii rogatej, choć nie jest jasne, czy Rayleigh zdawał sobie sprawę ze zdolności tych gadów do wyczuwania wibracji. Jednak tuż przed śmiercią Rayleigh został przewodniczącym Society for Psychical Research, które zajmuje się badaniem zjawisk paranormalnych i istnieje do dziś. Z całą pewnością byłby

zaintrygowany, gdyby się dowiedział, że w demonstrowanej przez ten gatunek węży umiejętności wykrywania obecności myszy nie ma nic paranormalnego, mimo że wąż ma zasłonięte oczy i nie potrafi jej wywęszyć. To tylko fizyka.

Czy Ziemia drży?

Jest lipiec 2013 roku, znajdujemy się w Parku Narodowym Etosza w Namibii. To pora sucha i wokół licznych wodopojów, rozsianych w tym rejonie sawanny, roi się od zwierząt. Niemniej jedno słońiętko z gatunku słońia afrykańskiego (*Loxodonta africana*) czuje się wyraźnie bardziej osamotnione, niż miałyby na to ochotę. Niedawno 2 młode słońie zaatakowały jego grupę rodzinną i przestraszony malec w panice stracił kontakt ze swoim stadem. Teraz krąży tam i z powrotem w pyle pustyni, wypatrując matki. Nagle zastyga, po czym unosi najpierw przednią, a potem tylną nogę wysoko w powietrze.

To smutna scena, jednak malec nie był całkiem osamotniony. Jego poczynania obserwowała Caitlin O'Connell z Uniwersytetu Stanforda w USA, która większość życia poświęciła badaniu słońi. Tego dnia po raz pierwszy widziała, jak małe słońiętko, naśladowując dorosłych, robi to, co robią słońie, kiedy są w kłopotcie. Dorosłe słońie przenoszą ciężar ciała na 3 nogi, unosząc jedną stopę tuż nad ziemią, w bardziej powściągliwej wersji gestu malca wymachującego nogami. Niektóre filmy nakręcone przez Caitlin O'Connell sprawiają wrażenie komediowych popisów – dorosłe słońie zachowują się, jak gdyby zastygały podczas tańca, z jedną nogą elegancko uniesioną do góry, jakby pozując do zdjęcia. Ale to nie jest zabawa. Słońie unoszą nogę do góry, żeby zdobyć więcej informacji na temat otoczenia. Jeśli

wyczuwają niebezpieczeństwo, stado skupia się razem, chroniąc młode zgromadzone w środku i osłonięte przez masywne ciała dorosłych osobników, które stoją z uniesionymi głowami i szeroko rozstawionymi uszami. Dorosły samiec słonia afrykańskiego waży do 6000 kilogramów, 2 razy więcej niż samica, i może mieć w kłębie 4 metry wysokości, będąc największym zwierzęciem, jakie żyje na lądzie.

Słoniątko, które zgubiło swoje stado, niestety, nie mogło liczyć na taką ochronę. Do jego dalszych losów wrócimy później. Ale dlaczego malec unosił jedną nogę, kiedy poczuł się porzucony? I co to ma wspólnego z fizyką fal dźwiękowych?

Caitlin O'Connell zainteresowała się subtelnymi sposobami porozumiewania się zwierząt, gdy jako studentka, na początku lat dziewięćdziesiątych, badała zachowania owadów. Swoją fascynację przeniosła z owadów na słonie, gdy po przyjeździe do Afryki zaczęła pracować jako wolontariuszka w parkach narodowych i zdobyła trzyletni grant z międzynarodowych funduszy, jakie rząd Namibii otrzymał na badania nad zachowaniami słoni. Okazało się nawet, że na jej korzyść przemawiała wiedza, jaką zdobyła na temat owadów. „Spodobało im się, że mam doświadczenie w zakresie ochrony przyrody i zwalczania szkodników” – wspomina badaczka. Jej zwierzchnicy mieli nadzieję, że przyczyni się ona do złagodzenia problemów miejscowych rolników ze słoniami. „Z mojej strony to była oczywista decyzja – mówi Caitlin O'Connell o swoim postanowieniu, żeby się zaangażować w ten projekt. – Słonie po prostu wpadły mi w ręce”. W 1992 roku badaczka wyruszyła w busz wyposażona w dobrej jakości magnetofon, mikrofon i kamerę wideo. Od tego czasu jest zakochana w słoniach.

Telegraf w buszu

Słonie robią mnóstwo hałasu: trąbią, ryczą, wyją i pomrukują. Niektóre składowe ich nawoływań są bardzo niskie, o częstotliwości około 20 Hz, a tym samym lokują się w zakresie infradźwięków niesłyszalnych dla naszego ucha. Poza tym słonie są głośne, ale możemy jedynie określić liczbowo siłę ich głosu w decybelach, jeśli porównamy uzyskane pomiary wydawanych przez nie dźwięków z innymi dźwiękami. Decybel (dB) – nazwany na cześć szkockiego wynalazcy telefonu Alexandra Grahama Bella (1847–1922) – to skomplikowana jednostka. Jest miarą średniego ciśnienia fali dźwiękowej w stosunku do ciśnienia, jakie przyjmujemy za punkt odniesienia; zwykle to 20 mikropaskali – najcichszy dźwięk, jaki może usłyszeć ludzkie ucho, z grubsza odpowiednik bzyczenia komara lecącego w odległości 3 metrów. Aby ocenić głośność jakiegoś dźwięku, dzielimy jego przeciętne ciśnienie przez 20 mikropaskali, wyciągamy dziesiętny logarytm z odpowiedzi i mnożymy przez 20. Otrzymana jednostka to decybel dB SPL (od *sound pressure level*, poziom ciśnienia akustycznego). Tak jak powiedzieliśmy, to skomplikowane. Wróćmy więc do słoni.

Ich nawoływania mają około 120 dB, czyli trochę mniej niż 130 dB siły krzyku niektórych nietoperzy, ale mniej więcej tyle samo co ryk, jaki wydaje stojący metr od nas kibic piłkarski dmący w wuwuzelę. Trąbienie słoni rozchodzi się w powietrzu, dzięki czemu mogą je słyszeć inne słonie swoimi wielkimi uszami *à la* Dumbo. Jeśli ryk słonia obejmuje niższe częstotliwości (około 20 Hz), ten dźwięk przenika też przez ziemię. Przymuszalnie nie wynika to ze szczególnej strategii słoni; ich ryk jest tak głośny, że po prostu jego energia musi znaleźć jakieś ujście. Podobnie jak saharyjska żmija rogata, słoń wyczuwa sejsmiczne komponenty fali dźwiękowej, choć nie jesteśmy całkiem pewni, w jaki sposób to robi. Ta sama umiejętność cechuje także

niektóre gady, owady i niewielkie ssaki, takie jak ślepiec (*Spalax*), piaskogrzeb przylądkowy, inaczej kretoszczur (*Georychus capensis*), czy szczuroskoczek (*Dipodomys*). Żyjąca na północy mirunga północna (*Mirounga angustirostris*), czyli słoń morski, to jedyny inny duży ssak, o którym wiemy, że potrafi wyczuwać fale sejsmiczne. Samiec mirungi – zwykle 3 razy cięższy niż samica – uderza z wielką siłą swoim ciałem o ziemię, wysyłając sejsmiczne komunikaty mówiące: „Patrz, jaki jestem ogromny, lepiej ze mną nie zadzieraj”, aby w ten sposób zniechęcić inne samce do wdzierania się na jego terytorium.

Caitlin O’Connell sądzi, że dorosłe słonie zbijają się w stadko, kiedy wyczuwają sejsmiczną część alarmu wysłanego przez jakiegoś oddalonego od nich słonia, który zauważył jakieś zagrożenie, na przykład polującego lwa. Przypuszczalnie słoń nadający komunikat jest znany członkom grupy; w badaniach Caitlin O’Connell słonie reagowały silniej na dźwięki emitowane przez zwierzęta, z którymi miały kontakt wcześniej. Fale sejsmiczne pomagają także słoniom w śledzeniu ruchów innych słoni, a nawet informują je o nastroju zbliżającej się grupy, w zależności od tego, czy jej członkowie idą czy biegną. Poza tym, ze względu na swój specyficzny krok, „podpis stopy”, który różni je od innych zwierząt, słonie wiedzą, czy w pobliżu przechodzi antylopa. Być może potrafią nawet wyczuwać nadciągające trzęsienie Ziemi – więcej na ten temat dowiemy się później.

Słuchać, słuchać

Jak one to robią? Badacze nie są całkiem pewni. Słoń afrykański z pewnością wyczuwa sejsmiczne fale dźwiękowe za pośrednictwem poduszek gęstego tłuszczu, jakie ma w stopach. Poza tym zapewne wychwytuje wibracje albo

usami, albo receptorami ciśnienia. Możliwe nawet, że stosuje obie techniki – specjaliści wciąż nie wydali ostatecznego werdyktu w tej sprawie. Jeśli słoń wykorzystuje uszy do wyłapywania fal sejsmicznych za pomocą słuchu kostnego, mogłoby to wyjaśnić, dlaczego zastyga pochylony do przodu i przenosi ciężar ciała na przednie stopy, mocno przyciskając je do ziemi. W takiej postawie jego nogi znajdują się bezpośrednio pod głową i przekazują sejsmiczne wibracje ze stóp, przez kości nóg, do uszu, gdzie wprawiają w drżenie kostki ucha środkowego – młoteczek, kowadełko i strzemiączko.

Druga – a może dodatkowa – metoda, pomagająca słońom w odbieraniu fal sejsmicznych, wiedzie przez znajdujące się z przodu i z tyłu jego stóp receptory, które wychwytyją niewielkie zmiany ciśnienia i wysyłają sygnały nerwowe do mózgu. Wykorzystanie przez słonia tych receptorów – noszących nazwę ciała Vatera-Pacini (inaczej ciała blaszkowatego) na cześć włoskiego anatoma Filippa Pacini (1812–1883), który odkrył, że znajdują się w ludzkiej skórze – może wyjaśnić, dlaczego „nasłuchuje” sygnałów sejsmicznych pochylony do przodu, na palcach, albo kołysze się do tyłu, aby stanąć na piętach. „Zawsze tak robią, zanim pojawi się inna grupa rodzinna słońi czy nawet jakiś pojazd” – wyjaśnia Caitlin O’Connell. Niewykluczone, że słonie wyczuwają drżenie ziemi także czubkiem trąby, gdzie również znajdują się ciała Vatera-Pacini.

Użycie każdej z tych metod wykrywania drgań – za pomocą uszu albo ciałek blaszkowatych – wyjaśnia, dlaczego słonie pochylają się do przodu. Ale dlaczego odrywają nogę od ziemi? Wydaje się, że to dziwne posunięcie w przypadku słonia „nasłuchującego”, czy nie grozi mu jakieś niebezpieczeństwo. Jeśli odbierasz fale sejsmiczne stopami, z pewnością ma sens postawienie wszystkich czterech mocno na ziemi? Jednak według Caitlin O’Connell uniesienie jednej stopy powoduje, że ciężar ciała słonia

rozkłada się na pozostałe, nacisk na nie jest większy i lepiej wychwytyują one drżenie ziemi. W dodatku, używając trzech nóg zamiast czterech, słoń może łatwiej zorientować się, skąd dochodzi dźwięk, a to dzięki zastosowaniu triangulacji – innej metody, do której wrócimy później.

Wysokie i niskie

Słonie wykorzystują komunikację sejsmiczną, „ponieważ mają taką możliwość”, jak mówi Caitlin O’Connell. „Sygnał biegnie w ziemi, jest dostępny i potrafią go wykryć”. Transmisja sejsmiczna jest niezwykle użyteczna, gdy jest wietrznie albo gdy zwierzęta znajdują się w lesie, w obu przypadkach bowiem dźwięki rozchodzące się w powietrzu mogą ulec gwałtownemu zakłóceniu. Ale jest jeszcze jeden powód wyjaśniający, dlaczego fale sejsmiczne są takie użyteczne.

Jak wspominaliśmy przy okazji pawy i nietoperzy, dźwięki rozchodzące się w powietrzu rozprzestrzeniają się w trzech wymiarach i tracą mniej więcej około 6 dB z każdym podwojeniem się odległości od źródła. Dla odmiany dźwięk rozchodzący się w ziemi rozprzestrzenia się głównie jako fala Rayleigha, która rozchodzi się bardziej powierzchniowo (w dwu wymiarach) i słabnie zaledwie o 3 dB z każdym podwojeniem się odległości od źródła. Innymi słowy, dźwięk podróżujący w ziemi, zanim całkowicie osłabnie, dociera dalej niż wtedy, gdy rozchodzi się w powietrzu. Fale sejsmiczne dają zatem słoniom ważne informacje na temat wydarzeń zachodzących w większej odległości, informacje, które mogłyby do nich nie dotrzeć, gdyby ograniczały się do odbierania jedynie dźwięków rozchodzących się w powietrzu.

Podobnie jak saharyjska żmija rogata, która także wyczuwa fale

sejsmiczne, słoń musi jednak przede wszystkim wiedzieć, skąd dobiega odebrany sygnał. I właśnie w tym punkcie daje o sobie znać przewaga, jaką daje możliwość skorzystania z obu metod. Albowiem to, że dźwięk rozchodzący się w ziemi dociera dalej niż w powietrzu, nie oznacza, że rozchodzi się szybciej. Jego prędkość zależy od miejscowych warunków. W Parku Narodowym Etosza, gdzie gleby są głównie piaszczyste, ślimaczy się w tempie 240 m/s, czyli o mniej więcej jedną trzecią wolniej niż w powietrzu, gdzie biegnie z prędkością 343 m/s (dokładna wartość zależy od temperatury i wilgotności powietrza). A zatem dźwięk wychodzący z tego samego źródła dociera do słonia w dwu różnych momentach, w zależności od drogi, jaką zmierza – najpierw sygnał wędrujący drogą prawdziwie królewską (przez powietrze), nieco później bardziej wyboistą (w ziemi). I dokładnie tak samo jak upływ czasu między pojawieniem się błyskawicy na niebie a odgłosem gromu mówi nam, jak daleko znajduje się burza, czasowy dystans między dźwiękami odbieranymi z powietrza a sygnałami docierającymi z ziemi pozwala słoniowi zorientować się, jaką odległość pokonał dźwięk.

Poza tym słonie potrafią jeszcze dokładniej zorientować się, skąd dobiega dźwięk, za pomocą triangulacji. Żeglarze posługiwali się tą geometryczną sztuczką przez stulecia, aby oszacować odległość, jaka dzieli ich od innych statków, gór albo brzegu, jednak niewykluczone, że słonie wpadły na to pierwsze. Ponieważ uszy słonia oraz źródło dźwięku stanowią 3 punkty bardzo długiego, wąskiego trójkąta, aby ocenić, skąd dochodzi dźwięk, zwierzę musi jedynie wyczuć dokładny kąt, pod jakim fale dźwiękowe docierają do każdego z jego uszu przez powietrze. Znając 2 kąty i rozstaw swoich uszu (około 0,5 metra), słoń może ocenić, z jakiego kierunku i z jakiej odległości dotarł do niego dany sygnał. I w tym przypadku fale sejsmiczne mogą okazać się bardziej użyteczne niż dźwięki rozchodzące się

w powietrzu. Ponieważ tylne i przednie nogi słonia dzieli około 2,5 metra – a więc odległość 5 razy większa niż rozstaw jego uszu – umiejętność wykrywania dźwięku stopami wyposaża zwierzę w bardziej precyzyjne narzędzie triangulacyjne do oceny położenia jego źródła.

Dźwięk rozchodzący się pod ziemią daje jeszcze jedną korzyść. Ponieważ nogi słonia są szeroko rozstawione, fala sejsmiczna najprawdopodobniej dociera do jego prawej przedniej stopy w innej fazie, niż trafia do lewej. Faza mówi nam o tym, w jakim miejscu swojego cyklu wysokiego i niskiego ciśnienia znajduje się fala dźwiękowa. Jeśli fale docierające do obu nóg nie są w tej samej fazie, jedna stopa poczuje niskie ciśnienie, podczas gdy druga poczuje wysokie. Różnica w fazie jest niewielka, ale słoń ma większą szansę ją wykryć w przypadku fal sejsmicznych niż fal rozchodzących się w powietrzu, które docierają do jego uszu. Fala dźwiękowa o częstotliwości 20 Hz, podróżująca w Parku Narodowym Etosza w powietrzu z prędkością 340 m/s, ma długość 17 metrów (prędkość równa się częstotliwość razy długość fali), w ziemi zaś, gdzie dźwięk rozchodzi się wolniej, długość fali wynosi zaledwie 12 metrów. Fale, które ze względu na mniejszą długość mają za sobą więcej cykli, będą w sposób bardziej uchwytne niesynchronizowane, co pomaga słoniowi zlokalizować ich źródło. W dodatku, jeśli słoń wykorzystuje stopy, ma do dyspozycji do 4 receptorów, a nawet 5, jeśli doliczyć trąbę, a nie jedynie 2. Modyfikując nieco sławne zdanie z *Folwarku zwierzęcego* Orwella, można by powiedzieć: „Cztery nogi dobrze, dwoje uszu źle”.

Chociaż potencjalnie te zdolności słoni do lokalizowania źródła dźwięków mogłyby pomóc w sprowadzeniu zagubionego słońątka (które zauważyła Caitlin O’Connell) na łono rodzinnego stada, jednak tak się nie stało. Niemniej wszystko skończyło się dobrze. Słonie to zwierzęta społeczne, więc inna grupa starszych, niespokrewnionych z nim samców

zaczekała w pobliżu, dopóki małe nie wydał głośnego ryku. Wtedy wróciła jego rodzina, przypuszczalnie wychytując jego wołanie dobiegające w powietrzu.

Słysz się czasem, że dzięki umiejętności wykrywania fal sejsmicznych słonie potrafią wcześniej wyczuwać nadchodzące trzęsienie ziemi. Jednak dowody zgromadzone przy okazji straszliwego trzęsienia ziemi i tsunami na Oceanie Indyjskim z 2004 roku nie są jednoznaczne. Krąży wiele opowieści o słońiach azjatyckich, które przed uderzeniem tsunami zmierzały w stronę wyżej położonych terenów i ratowały w ten sposób życie turystów, niosąc ich na swoim grzbiecie. Niemniej, jak opowiada Caitlin O'Connell, jedyne naukowe dowody, jakimi dysponujemy, dotyczą grupy słońi na Sri Lance, które przypadkiem były wyposażone w obroże nadające sygnał satelitarny. Te zwierzęta wcale nie zareagowały. „Niektóre anegdoty pasują do tego, czego moglibyśmy się spodziewać” – mówi, mając na myśli opowieści o słońiach, które zareagowały na ruchy Ziemi jakąś godzinę przed uderzeniem zabójczej fali. Badaczka jest przekonana, że przypuszczalnie szelf kontynentalny w oceanie zatrzymał wibracje trzęsienia ziemi i dlatego nie dotarły one do grupy na Sri Lance. „Anegdoty mają wielką moc, jeśli można oprzeć na nich dane statystyczne” – dodaje Caitlin O'Connell.

Parki i rekreacja

Umiejętność słońi używania fal sejsmicznych do komunikowania się działa tak skutecznie, że wykorzystujemy je do odnajdowania zbłąkanych osobników i bezpiecznego sprowadzania ich do rezerwatów. Samce słonia potrafią zawędrować bardzo daleko w poszukiwaniu samicy gotowej do rozrodu. To sytuacja, w której czas naprawdę się liczy, ponieważ u samicy

słoni jajeczka są dojrzałe do zapłodnienia jedynie przez 4 do 5 dni, i to zaledwie co 4 do 6 lat. A zatem samce w swoich wędrówkach wyprawiają się daleko od bezpiecznych terenów parków narodowych, narażając się na niebezpieczne spotkania z ludźmi zamieszkującymi sąsiednie tereny. Strażnicy parków zwykle zaganiają zagubione słonie za pomocą helikopterów albo strzałów z broni palnej oddawanych w powietrze. Jednak równie skuteczną metodą zwabiania słoniowych romeów z powrotem w bezpieczne rejony okazuje się nadawanie zagubionym samcom głośnych sygnałów z nagranych wcześniej nawoływań samic gotowych do kopulacji – te dźwięki zawierają komponentę zarówno fal rozchodzących się w powietrzu, jak i sejsmicznych. „Im szybciej się je zawróci, tym lepiej” – mówi Caitlin O’Connell. Na filmach zamieszczonych na internetowej stronie badaczki, Utopia Scientific, można zauważyć pewne podobieństwo odtwarzanych w przyspieszonym tempie gestów słonia przysłuchującego się głosowi samicy i filmowego chodu Charliego Chaplina wyposażonego w laseczkę i za duże buty.

Piękno pomysłu, żeby wykorzystać także sejsmiczne składniki nawoływań samic oprócz fal rozchodzących się w powietrzu, polega na tym, że w ten sposób można zwabić samce z większej odległości – nawet kilku kilometrów, a nie zaledwie 500 metrów, jak to się dzieje w przypadku nagrań słyszalnych dla ludzkiego ucha. Jeśli strażnicy stopniowo przesuwać źródło dźwięku z powrotem w stronę parku narodowego, zachowując odpowiednią odległość od słonia, mogą sprowadzić samca na miejsce bez narażania się na niebezpieczeństwo. W dodatku, wykrywając fale sejsmiczne powstające podczas marszu tych zwierząt, pracownicy parków zajmujący się ochroną przyrody mogą policzyć słonie albo zlokalizować kłusowników.

Człowiek także potrafi wyczuwać wibracje rozchodzące się w ziemi, choć nie tak dobrze, by móc chwycić słonie bez pomocy urządzeń. Wydaje się na

przykład, że rdzenni Amerykanie potrafili lokalizować duże stada bizonów dzięki receptorom znajdującym się w ich nagich stopach; natomiast rdzenni mieszkańcy Australii posługują się instrumentem didgeridoo, który emituje część dźwięków, wprawiając ziemię w wibracje – koniec tego instrumentu dotyka podłoża. Niektórzy ludzie cierpiący na kłopoty ze słuchem używają części mózgu, która normalnie przetwarza sygnały pochodzące z uszu – kory słuchowej – do analizowania wibracji. Kiedy Caitlin O’Connell nie prowadzi badań w Afryce, zajmuje się wykorzystaniem tych zdolności w pracach nad zbudowaniem urządzeń „wibracyjno-dotykowych”, które przekazywałyby użyteczne dźwięki, takie jak odgłos dzwonka do drzwi albo telefonu, za pośrednictwem wibracji odbieranych przez skórę dłoni. „Staramy się opracować język przypominający Braille’a” – mówi Caitlin O’Connell. Dzięki takiemu urządzeniu będzie także można jej zdaniem ćwiczyć korę słuchową osób mających kłopoty z implantami ślimaka (wszczepami, które zastępują komórki rzęstate ślimaka). W przypadku ludzi niecierpiących na upośledzenie słuchu wibracje nie odgrywają dziś dużej roli. „W naszych czasach możemy odbierać wibracje, jednak nie zwracamy na nie uwagi – mówi Caitlin O’Connell. – Do rozmów długodystansowych mamy telefony komórkowe”.

Caitlin O’Connell przeszła długą drogę od badań nad owadami, przez badania słoni, po prace nad urządzeniami wspomagającymi ludzki słuch. Badaczka nadal uważa swoje spotkanie ze słoniami za magiczne doświadczenie. „Jadę w odległe miejsca, niedostępne dla większości ludzi, widzę osobniki, które znam, obserwuję, jak się porozumiewają, i uczę się każdego dnia czegoś nowego – opowiada. – Czuję się wyróżniona tym, że mam wgląd w życie społeczności słoni. Człowiek musiałby spędzić z nimi setki lat, żeby zgłębić ich sekrety”.

Brzmi rybio

I tak przeszliśmy z jednego końca królestwa zwierząt na drugi. A teraz, no cóż, nie wiemy, czy akurat wy należycie do tego grona, ale są ludzie, którzy zaklinają się, że kiedy się wrzuci langustę do rondla z wrzącą wodą, można usłyszeć jej krzyk. Te odgłosy, jak powiadają, są świadectwem tego, że zwierzę umiera w męczarniach. Zoologowie nie są pewni, czy langusty czują ból, lecz jeśli w tej sytuacji powstają jakieś dźwięki, ich źródłem są bańki powietrza uwięzione między skorupą langusty a jej ciałem, które rozszerzają się pod wpływem temperatury i wydają charakterystyczny pisk, gdy przeciskają się przez szczeliny skorupy.

Co nie znaczy, że langusty za życia nie wydają żadnych dźwięków. Kiedy zajrzycie na stronę internetową Discovery of Sound in the Sea Uniwersytetu Rhode Island, możecie posłuchać odgłosów produkowanych przez najróżniejsze rodzaje zwierząt żyjących pod wodą: od langusty, przez wieloryby i krewetki, aż po ryby z rodziny luszczołowatych. Wiele z tych stworzeń wydaje dźwięki, które szczerom lądowym mogą wydawać się dziwaczne. Jedno z nich – tau (*Opsanus tau*) – brzmi na przykład jak obłąkana koza. Jednak z punktu widzenia fizyki pierwsze miejsce na liście przebojów w kategorii dziwnych dźwięków zajmuje kalifornijska langusta (*Panulirus interruptus*).

Ten czerwonawobrazowy skorupiak długości do 30 centymetrów ma zgrabne odnóża pokryte pionowymi paskami i ogromne kolczaste czułki. Żyje u wybrzeży Kalifornii i Meksyku, od strony Pacyfiku. Langusta wydaje, w krótkich gwałtownych wybuchach, serie dźwięków przypominających zgrzytanie zębów metalowego grzebienia o krawędź stołu. Jeszcze dziwniejsze jest to, w jaki sposób zwierzę wytwarza te odgłosy.

Według Sheili Patek z Duke University, amerykańskiej badaczki, którą

spotkaliśmy już wcześniej w rozdziale 2, kiedy omawialiśmy jej badania nad rawką błaznem i saharyjskimi mrówkami, w wodach oceanu rozlega się prawdziwa kakofonia dźwięków: trzasków, terkotów, gwizdów i pomruków. Przełamujące się fale, krople deszczu, trzęsienia ziemi, statki i łodzie podwodne oraz wojskowe sonary dudnią, świszczą, stukoczą, szumią i pulsują. Zwierzęta, w tym krewetka pistoletowa z rozdziału 2, wydają te dźwięki, aby się porozumiewać, zwracać uwagę partnerów seksualnych, bronić swojego terytorium, wyczuwać, co się dzieje w otoczeniu, i znajdować pożywienie. Jak dowiemy się w rozdziale 6, światło nie przenika zbyt daleko pod powierzchnię morza i w głębinach panuje półmrok albo jest całkiem ciemno. Dlatego dźwięki odgrywają podstawową rolę w życiu wielu zwierząt zamieszkujących morza i oceany.

Pod wodą dźwięk to zupełnie inna para kaloszy. „Wszystko wygląda zupełnie inaczej” – mówi Sheila Patek. Dźwięk rozchodzi się znacznie szybciej niż w powietrzu, ponieważ cząsteczki wody nie tracą wiele energii podczas wibracji. A skoro osłabienie dźwięku jest tak małe, odgłosy wydawane przez morskie stworzenia rozchodzą się na tysiące metrów, zanim całkiem osłabną, co sprawia, że zwierzętom pod wodą trudniej się ukryć. Pojawia się też inny problem: mieszkańcy morza, którzy pragną odczytać jakąś wiadomość, muszą wyłowić ją z chaosu dźwięków, wprowadzającego w błąd echa oraz szumów tła.

W dodatku dźwięk rozchodzi się w wodzie 5 razy szybciej niż w powietrzu. Aby się dowiedzieć dlaczego, cofnijmy się o 350 lat, do czasów naszego etatowego geniusza Isaaca Newtona, który zdołał, jak dotąd, pojawić się w każdym rozdziale *Kudłatej nauki*. Prawdę mówiąc, Newton mimo swojego błyskotliwego umysłu bardzo się pomylił, wyliczając prędkość dźwięku. Jego siedemnastowieczni koledzy zmierzylili szybkość rozchodzenia się dźwięku w powietrzu całkiem dokładnie, choć nie mieli nowoczesnych

urządzeń, takich jak precyzyjne zegary. Niektórzy z nich sprawdzali, jak daleko muszą stanąć od ściany, aby usłyszeć echo – powiedzmy – w ciągu pół sekundy; inni obserwowali rozbłysk oddanego w oddali wystrzału z broni palnej, po czym za pomocą wahadła starali się określić, w jakim czasie dociera do nich huk wybuchu.

Około 1660 roku ci pionierzy doszli do zgodnej opinii, że dźwięk rozchodzi się z prędkością 349 m/s, a więc tylko odrobinę powyżej współcześnie przyjmowanej prędkości 343 m/s, w suchym powietrzu w temperaturze 20 stopni C. A zatem na razie wszystko gra. Ale w 1687 roku Newton w swoim epokowym dziele *Principia Mathematica*, szczegółowo opisującym prawa ruchu (zob. rozdział 2), zamieścił także równanie, które jego zdaniem określało prędkość rozchodzenia się dźwięku w dowolnym środowisku. Problem polegał na tym, że wyliczona na podstawie tego równania prędkość dźwięku w powietrzu była o 20 procent niższa niż wartość uzyskana dzięki pomiarom podczas nasłuchiwanie echa albo odgłosu wystrzałów. O rany! Czyżby genialny Newton popełnił błąd?

Nasz geniusz uważał, że aby wyliczyć prędkość dźwięku, trzeba podzielić ciśnienie w danym ośrodku, w którym dźwięk się rozchodzi, przez gęstość tego ośrodka, a następnie wyciągnąć pierwiastek kwadratowy z ilorazu. Głupiec! Chociaż Newton manipulował przy swoich obliczeniach, aby dopasować wyniki do uzyskiwanych pomiarów, jego teoria nie brzmiała, hm, aż tak zdrowo, jak mu się wydawało. Ta niezgodność utrzymała się aż do początku XIX wieku, gdy francuski matematyk Pierre Simon Laplace (1749–1827) dostrzegł w rozumowaniu Newtona subtelny, ale podstawowy błąd.

Newton wiedział, że fala składa się z następujących po sobie regionów wysokiego i niskiego ciśnienia, niestety, przeoczył to, że regiony, w których ciśnienie jest wyższe, trochę się ogrzewają, ponieważ cząsteczki ocierają się o siebie nawzajem. Dźwiękowe wibracje następują po sobie tak szybko, że to

ciepło nie ma gdzie uciec. Wyższa temperatura prowadzi do wyższego ciśnienia, a tym samym do wyższej prędkości dźwięku. Kiedy uwzględnimy te nowe okoliczności, otrzymamy formułę znaną jako równanie Newtona-Laplace'a. Powiada ona, że aby wyliczyć prędkość dźwięku w jakimś ośrodku, należy podzielić jego sztywność (a nie ciśnienie w tym ośrodku, jak sądził Newton) przez jego gęstość, a następnie wyciągnąć pierwiastek kwadratowy z uzyskanego ilorazu. Po wstawieniu odpowiednich wartości kłopotliwe 20 procent różnicy między teorią a empirią znika. Z tego powodu, oraz ze względu na inne osiągnięcia, Laplace jest jednym z 62 francuskich uczonych, inżynierów i matematyków, których nazwiska uwieczniono na wieży Eiffla (możecie je zobaczyć po stronie północno-zachodniej, tuż pod pierwszym balkonem, o ile oczywiście nie jesteście zbyt zajęci wcinaniem czekoladowych *crêpes* kupionych na pobliskim straganie).

Wracając szybko do XXI wieku, możemy użyć tej formuły dwóch autorów, aby wyliczyć prędkość dźwięku w oceanie. Woda morska ma duży współczynnik – miarę sztywności – 2,2 miliona N/m^2 (niutonów na metr kwadratowy) oraz gęstość $1,025 \text{ kg/m}^3$ (kilogramów na metr sześcienny) w temperaturze 20 stopni C. Jeśli podzielimy pierwszą liczbę przez drugą i wyciągniemy pierwiastek kwadratowy, uzyskamy... hm, lepiej wstukać te liczby w kalkulator. Prędkość 1500 m/s, z zaokrągleniem do najbliższej setki. To 5 razy więcej niż prędkość dźwięku w powietrzu, jeśli uwzględnić nieduże odchylenia w zależności od temperatury wody, zasolenia i głębokości morza.

Ta wyższa prędkość to jednak coś więcej niż ciekawostka, ponieważ ma bardzo istotny wpływ na życie zwierząt morskich. Z jednej strony niekorzystny: szybsze rozchodzenie się dźwięku oznacza, że zwierzęta muszą reagować szybciej, jeśli chcą się dowiedzieć, skąd dźwięk dochodzi. Z drugiej strony zaś w wodzie jest łatwiej wykryć dźwięk w stosunkowo

niedużej odległości od źródła. W tym obszarze „bliskiego pola” cząsteczki wody przekazujące wibracje dźwiękowe drgają o wiele silniej niż cząsteczki oddalone od źródła. Takie potężne wibracje bliskiego zasięgu występują także w przypadku dźwięku rozchodzącego się w powietrzu, ale ponieważ dźwięk pod wodą rozchodzi się 5 razy szybciej, w morzu ta strefa rozciąga się 5 razy dalej niż na lądzie.

Langusty, podobnie jak kraby, krewetki i inne morskie skorupiaki, do wyczuwania wibracji znajdujących się blisko źródła dźwięku wykorzystują włoski na swoich odnóżach. Dzięki temu potrafią wyczuć dźwięk bez pomocy uszu takich jak nasze, wyposażonych w bębenek, który przejmuje wzrost i spadek ciśnienia fali dźwiękowej, zamiast wyczuwać bezpośrednio wibrację cząsteczek. „Gdybym mijala cię na chodniku, może poczułabym lekki ruch powietrza z twojej strony – wyjaśnia Sheila Patek – ale pod wodą wysyłasz mi pełen zakres częstotliwości i długości fal, jakie powstają w następstwie twojego ruchu”.

Miękko, miękko

Kalifornijska langusta nie tylko słyszy inaczej niż my, lecz także wytwarza dźwięki w sposób, który według Sheili Patek jest wyjątkowy. Langusta nie ma innego wyjścia. Co kilka miesięcy zrzuca swój twardy szkielet zewnętrzny podczas linienia, które jest niezbędne, żeby mogła rosnąć. Jednak utrata ochronnego pancerza ma swoją cenę. Nagie maziowate ciało skorupiaka stanowi smaczny kąsek dla przepływającej ryby, ośmiornicy czy wydry morskiej, a kalifornijska langusta nie ma szczypiec, którymi mogłaby się obronić, lecz jedynie kolczaste czułki. Jako broni przeciw wrogom używa dźwięków. Jednak w odróżnieniu od innych stawonogów nie może

wytwarzać dudniącego hałasu przez pocieranie czymś twardym o serię wyrostków, co przypominałoby brzdąkanie napastrkiem po tarce. Taka metoda „szorowania pilnikiem” wymaga dwu twardych powierzchni, czyli dokładnie tego, czego langustie brakuje po zrzuceniu pancerza.

W efekcie, jak odkryła Sheila Patek, langusta okazuje się pierwszym znanym nam zwierzęciem, które wytwarza dźwięki, używając części swojego ciała jako skrzypiec. Jednak te odgłosy nie są zbyt melodyjne: ich celem jest odstraszenie. Mniej przypominają koncert Beethovena, bardziej samochodowy alarm. Langusta stosuje metodę znaną jako „przyleganie i ślizganie się” (*stick and slip*), która polega na pocieraniu miękką powierzchnią o coś gładkiego. W przypadku gry na skrzypcach tę rolę odgrywa smyczek (tradycyjnie zrobiony z włosia z końskiego ogona), którym pociera się o strunę (z nylonu, jeśli ktoś jest zwolennikiem nowoczesności, albo z katgutem dla tradycjonalistów; nie ma to jednak nic wspólnego z kotami, chodzi o jelito owcy albo kozy).

„W przypadku skrzypiec mamy więc nieustanny ruch smyczkiem poruszonym przez ramię skrzypka w górę i dół, ale jeśli przyjrzeć się nieco bliżej filmowi nakręconemu kamerą działającą z dużą prędkością, można zauważyć, że smyczek od czasu do czasu przylega do struny i ślizga się po niej, by wprawić ją w wibracje” – wyjaśnia Sheila Patek. To dlatego skrzypkowie smarują smyczek żywicą – zapewnia to lepsze przyleganie. Smyczek ślizgający się po strunie przylega do niej, a potem odrywa się, przylega ponownie i jeszcze raz, przy każdym ruchu wytwarzając wibracje – a tym samym dźwięk.

Langusta nie ma smyczka, ale na końcu każdego czułka ma coś w rodzaju miękkiego plektronu, którym pociera o znajdującą się poniżej oczu gładką i sztywną „tabliczkę” stanowiącą podczas pocierania, jak ujmuje to Sheila Patek, „rodzaj gontu, podobnie jak pokrycie dachu domu”. Za każdym razem

gdy plektron podskakuje na płytce, powstaje dźwięk. Langusta używa obu czułków do wytwarzania dźwięków jednocześnie, co przypomina skrzypka, który grałby dwoma smyczkami. Kiedy skorupiak zrzuca stary pancerz, sztywne powierzchnie poniżej jego oczu miękną, ale jego system wydania dźwięków działa, ponieważ nie polega na pocieraniu dwu sztywnych powierzchni – w odróżnieniu od metody przypominającej granie na tarce, stosowanej przez owady takie jak konik polny. „Ten system przylegania i poślizgu dwu miękkich powierzchni doskonale odgrywa swoją rolę przez cały okres linienia langusty kolczastej i posługuje się nim ona z wielkim zapalem, kiedy jest najbardziej narażona na atak” – mówi Sheila Patek.

Podstawą tego systemu jest tarcie, zjawisko, które spotkaliśmy w rozdziale 2 – siła powstająca, kiedy dwie powierzchnie ocierają się o siebie (siła ta przysparzała kłopotów starożytnym filozofom greckim analizującym zjawisko ruchu, zabierając część energii toczącego się wozu). Podczas przylegania i ślizgania się tarcie przejmuje energię ruchu czułków langusty, albo ramienia skrzypka, i przetwarza ją na dźwięk. W przypadku koncertującego skrzypka ten ruch staje się muzyką. W przypadku dziecka, które dorwało się do skrzypiec, przekształca się w nieprzyjemną dla ucha kocią muzykę. W przypadku langusty – w odstrasżające wrogów krzyki.

Jeśli ktoś umie grać na skrzypcach, powstające dźwięki brzmią przyjemnie, ponieważ struny i korpus instrumentu są zbudowane w taki sposób, aby wchodzić w rezonans przy pewnych częstotliwościach. Kalifornijska langusta kolczasta z kolei generuje szeroki zakres częstotliwości. „Nie brzmi to słodko – mówi Sheila Patek – to raczej charkliwy hałas przypominający dźwięki wydawane przez większość zwierząt w celu odstrasżania drapieżników. Nie zależy im na wrażeniach estetycznych, chcą jedynie ogłuszyć system słuchowy drapieżcy”. Podobnie jak każde żyjące na lądzie zwierzę wydające szkaradne dźwięki, gdy poczuje

zagrożenie, jak choćby ptaki, które emitują skrzekliwe odgłosy, starając się przepędzić kota, albo schwytyany królik, który wrzeszczy rozgłośnie, langusta stara się drzeć możliwie najgłośniej, w nadziei, że napastnik uzna hałas za nieznośny i oddali się.

Można posłuchać kalifornijskiej kolczastej langusty na stronie internetowej Sheili Patek. Chrapliwe dźwięki wydawane przez skorupiaka techniką przylegania i ślizgania się są zaskakująco ostre, zważywszy na miękkość substancji, dzięki którym powstają. Warto także posłuchać innych langust z tej witryny internetowej, które w podobny sposób emitują hałasy. Langusta *Palinustus waguensis*, żyjąca w zachodnich i centralnych rejonach Oceanu Indyjskiego, emituje dźwięki przypominające odgłos ziaren kukurydzy pękających na rozgrzanej patelni; jej sąsiadka *Panulirus longipes* wydaje się czerpać inspirację z brzmienia piszczałki *kazoo*. Inne langusty wydają odgłosy przypominające kumkanie żaby.

Podobnie jak to się często zdarza w życiu, wytwarzanie dźwięku w celu odstraszenia wrogów ma swoją ciemną stronę. „Mamy tu prawdziwy paragraf 22 – wyjaśnia Sheila Patek. – Chcesz wytwarzać dźwięki, aby odstraszyć drapieżnika i sprawić, żeby zostawił cię w spokoju, uciekając w popłochu, ale jednocześnie powiadamiasz wszystkie zwierzęta w okolicy, że właśnie obawiasz się ataku i mogą przyjść i cię zjeść”. Langusta broniąca się przed jednym agresorem odsłania swoją słabość przed innymi. Jednak ma ona dużo szczęścia. Można by się spodziewać, że „okrzyki” langusty będą pod wodą rozchodzić się daleko, jednak pomiary Sheili Patek pokazują, że hałas otaczającego tła jest tak głośny, że te ostrzeżenia skierowane do drapieżników pokonują zaledwie metr, po czym rozplywają się w tle.

Nadal mało wiemy o tym, w jaki sposób działa wytwarzanie dźwięków techniką przylegania i ślizgania się. „To naprawdę interesujący mechanizm fizyczny, a zarazem niezwykle trudny obszar badań – mówi Sheila Patek. –

Mamy tu całą litanię problemów: niewiele wiadomo na temat dźwięków wytwarzanych przez zwierzęta żyjące w oceanie, jeśli nie liczyć morskich ssaków i niektórych ryb, więc umieszczanie tego zjawiska w szerszym kontekście stanowi poważne wyzwanie; dźwięki na pewno rozchodzą się w wodzie, ale niewykluczone, że rozchodzą się także za pośrednictwem dna morskiego; nie wiemy nawet, czy większość zwierząt żyjących w morzu ma uszy czy nie (...) ani czy posługują się wyłącznie słuchem, gdy w grę wchodzi nieduże odległości; i wreszcie: ocean jest miejscem hałaśliwym i zmiennym, a tym samym niemal nie sposób dokonywać w nim precyzyjnych pomiarów”.

Nawet jeśli nie wiemy dokładnie, w jaki sposób kalifornijska langusta kolczasta wytwarza dźwięki, jedno jest pewne: odstraszają one drapieżniki. Podczas jednego z eksperymentów langusty, którym badacze uniemożliwiali posługiwanie się metodą przylegania i ślizgania się, szybciej padały ofiarą ataku niż te, które nadal mogły wydawać odgłosy. Grając jak na skrzypcach, langusta zdobywa więc niezbędne narzędzie samoobrony.

Podsumowanie dźwięków

To godne uwagi, że dźwięki – nieuchwytnie fale wysokiego i niskiego ciśnienia – mogą mieć tak głęboki wpływ na życie zwierząt. W przypadku ludzi dźwięki często budzą irytację: hałaśliwi studenci bawiący się zbyt głośno, samochody dudniące za oknem, pralka wydająca potępieńcze jęki. Wszyscy poczulibyśmy się lepiej bez tych hałasów. Ale dla wielu zwierząt dźwięk jest czymś niezbędnym do przetrwania. Jak widzieliśmy, pawie wykorzystują infradźwięki, aby kusić partnerki. Na drugim biegunie skali nietoperze, wykorzystując ultradźwięki, unikają zderzenia ze ścianą jaskini

oraz chwytają łup. Saharyjska żmija rogata wyczuwa ruchy myszy dzięki wibracjom rozchodzącym się w ziemi, podczas gdy słonie w ten sam sposób wyczuwają niebezpieczeństwo. Jeśli chodzi o zwierzęta żyjące w morzu, takie jak kalifornijska langusta kolczasta, dźwięk odgrywa kluczową rolę w ich samoobronie.

Podczas podróży przez krainę dźwięków poznaliśmy podstawowe pojęcia, dzięki którym opisujemy ich właściwości: prędkość, długość fali, częstotliwość, amplitudę. Wspomnieliśmy nawet o zjawisku słabnięcia dźwięku oraz triangulacji i dowiedzieliśmy się nieco o dźwiękach rozchodzących się pod wodą. W rozdziale 6 zajmiemy się innym rodzajem fal, które są niezwykle istotne w życiu zwierząt – światłem. Najpierw jednak przyjrzyjmy się dwóm zjawiskom fizycznym od stuleci budzącym zdumienie człowieka. Zaczniemy od szokującej południowoamerykańskiej ryby, dzięki której powoli poznawaliśmy oba te zjawiska.

[5] W oryginale gra słów: *bat* (nietoperz) i *batty* (stuknięty).

ROZDZIAŁ 5



ELEKTRYCZNOŚĆ I MAGNETYZM NIECH SYPIĄ SIĘ ISKRY

**Węgorze elektryczne – Przypadek naładowanych pszczół –
Żółwie opływają Atlantyck – Szerszenie, które opanowały
mechanikę kwantową**

Życie w elektrycznych snach

Kiedy na początku lat dziewięćdziesiątych XX stulecia Tim Berners-Lee, pracujący w ośrodku CERN pod Genewą, zajmującym się badaniem cząstek elementarnych, wymyślił World Wide Web, chodziło mu o to, aby pomóc fizykom całego świata w dzieleniu się informacjami na temat badań. Nawet nie przyszło mu do głowy, że pewnego dnia ludzie będą zamieszczali na YouTube niezliczone filmiki przedstawiające różne słodkie zwierzątka. Na przykład w 2012 roku Internet oszalał na punkcie Tardar Sauce, znanego jako najbardziej marudny kot świata, gdy jego właściciel umieścił w sieci nagrania przedstawiające tego smętnego ponuraka. Dziś można nawet kupić kubki, książki i T-shirty z wizerunkiem mocno skwaszonego kocura.

Na Tweeterze entuzjaści w niezliczonych wpisach ćwierkają na temat najróżniejszych stworzeń, od kaczek i psów po papugi i świnki morskie. Jednak naszym ulubionym autorem tweetów jest Miguel Wattson, węgorz elektryczny (*Electrophorus electricus*, właściwie: strętwa) mieszkający w akwariium Rivers of the World, w Tennessee Aquarium w Chattanooga, w USA. Miguel zamieścił swojego pierwszego tweeta pod koniec 2014 roku pod adresem @ElectricMiguel i chociaż wysyłane przez niego wiadomości piszą pracownicy Aquarium, od Miguela zależy, kiedy nowy wpis pójdzie w świat. Elektryczne impulsy emitowane przez Miguela, gdy przemierza wody swojego akwariium, są wychwytywane przez odpowiednie czujniki i jeśli wykażą, że impuls przekracza określoną wartość, kolejny tweet z przygotowanej wcześniej listy trafia do mediów społecznościowych.

Tweety przynoszą głównie niewyszukane dowcipy o zwierzętach, oparte na grze słów w rodzaju: „Jakie jest najsilniejsze zwierzę w morzu?

Omulek!”[6]. Albo: „Dlaczego kolibry nucą? Bo nie potrafią spamiętać słów!”[7]. W tym czasie wzmacniacz przetwarza impulsy emitowane przez Miguela na strumień odgłosów nadawanych z głośników na użytek gości przechadzających się po oceanarium. W dodatku każdemu odgłosowi towarzyszy rozbłysk żarówki, której jasność zależy od siły impulsu, co przekształca bezdźwięczne skądinąd elektryczne emisje Miguela w prawdziwy spektakl światła i dźwięku.

Niemniej, pomijając banalne dowcipy, projekt ma wartość edukacyjną: chodzi w nim o poprawę wizerunku węgorzy elektrycznych. Te zwierzęta nie mają bowiem najlepszej reputacji. Wysyłane przez nie impulsy elektryczne, którymi posługują się do zabijania krabów i innych stworzeń, są na tyle mocne, że mogą zaszkodzić człowiekowi. A zatem jeśli planujecie wizytę u Miguela Wattsona, pamiętajcie, żeby trzymać ręce z dala od jego akwarium. Jeśli zachowacie bezpieczny dystans, węgorze elektryczne okażą się idealnym kandydatem do roli stworzenia, które wprowadzi nas w rozdział poświęcony temu, jak zwierzęta wykorzystują elektryczność i magnetyzm. Pod koniec XVII wieku właśnie te stworzenia zainspirowały pierwsze badania w tej dziedzinie fizyki. W dodatku uczeni dopiero niedawno odkryli, że węgorz elektryczny ogłusza ofiarę mniej więcej w taki sam sposób, jak robią to elektryczne paralizatory typu Taser, używane przez policję. Taser to pistolet wynaleziony przez pracującego w NASA fizyka Jacka Covera, który nadał mu nazwę na cześć postaci z książeczki, jaką czytał w dzieciństwie; Taser to akronim Thomas A. Swift’s Electric Rifle.

Warto zauważyć, że – wbrew pozorom – węgorze elektryczne wcale nie są węgorzami. To kościste słodkowodne ryby, które snują się przy dnie mulistych trzęsawisk i strumieni wpadających do Amazonki i Orinoko w Ameryce Południowej (węgorze także są rybami, ale z innej rodziny). Węgorze elektryczne są szarobrązowe po bokach i żółtopomarańczowe na

brzuchu, mają do 2,5 metra długości, płaską głowę i szeroki pysk. Są obdarzone świetnym wzrokiem i zwykle polują oraz żyją nocą, poruszając się za pomocą jednej długiej płetwy na podbrzuszu. W wodach rzek, w których żyją, jest tak mało tlenu, że nie potrafią wychwycić go w wystarczającej ilości skrzelami i co 10 minut wypływają na powierzchnię, aby zaczerpnąć powietrza, po czym ponownie nurkują w stronę dna. Mają także dziwne obyczaje reprodukcyjne: samica składa jaja w gnieździe zrobionym przez samca ze śliny.

Naprawdę straszne

Węgorze elektryczne zawdzięczają jednak swoją sławę głównie budzącym lęk elektrycznym impulsom, jakie wytwarzają. Pierwsze wiadomości o tych tajemniczych stworzeniach dotarły do Europy w XVI i XVII wieku. Francuski astronom Jean Richer (1630–1696) donosił na przykład, że podczas ekspedycji z 1670 roku widział rybę przypominającą węgorza, która była „gruba jak noga”, i kiedy dotknął jej palcem, na 15 minut pozbawiła go czucia w ręce. Zaintrygowani tymi „drżącymi węgorzami” europejscy podróżnicy przeprowadzili wiele dość brutalnych eksperymentów, które współcześnie z pewnością uznano by za nieetyczne oraz niedozwolone z powodów zdrowotnych. Badacze zachęcali na przykład tubylców do tego, aby wkładali ramię do zbiornika, w którym znajdowała się jedna z takich ryb, i dotykali jej gołą ręką albo metalowym prętem. Rzecz skrajnie niebezpieczna – wiemy dziś, że dorosły węgorz elektryczny może wytworzyć impuls elektryczny o napięciu 600 V – i niewielu nieszczęśników miało ochotę powtórzyć to doświadczenie. Kiedy w 1745 roku angielski chirurg Dale Ingram usiłował pogłaskać węgorza elektrycznego żelazną obręczą

z beczki po maderze, uderzenie prądu było tak silne, że wytrąciło mu metalowy przedmiot z ręki niczym niewidzialny przeciwnik rozbijający szermierza.

Jak pisze historyk William Turkel w swojej książce *Spark from the Deep*, relacje tego rodzaju zwróciły uwagę osiemnastowiecznych uczonych, takich jak Amerykanin Benjamin Franklin i Brytyjczyk Joseph Priestley, którzy starali się rozszyfrować tajemnicze zjawisko elektryczności. Krążące opowieści przekonały badaczy, że impulsy emitowane przez drżącego węgorza mają charakter elektryczny – to przypuszczenie zostało potwierdzone w 1775 roku przez brytyjskiego badacza Johna Walsha, który odkrył, że węgorz, sprowadzony do Londynu z Ameryki Południowej, może wytworzyć iskrę elektryczną przebiegającą w powietrzu. Widok tego zjawiska przekonał niedowiarków, że impuls wytwarzany przez to zwierzę jest powiązany z innymi, lepiej znanymi formami elektryczności, na przykład z piorunem.

W świecie laptopów i żarówek uważamy elektryczność za coś oczywistego, ale w XVII wieku było to zjawisko dziwne i organizowano nawet publiczne pokazy związanych z nim efektów. Niemiecki profesor Johann Heinrich Winckler na przykład naelektryzował służącego, po czym podał mu szklankę brandy. „Iskry z języka służącego zapaliły alkohol, co wprawilo w rozbawienie wszystkich, przypuszczalnie prócz służącego” – pisze Turkel w *Spark from the Deep*. Pokazy miały także bardziej złowrogie następstwa. Szwajcarski fizyk Jean Jallabert posłużył się puszką lejdejską – urządzeniem służącym do przechowywania ładunków elektrycznych – żeby wywoływać mimowolne skurcze mięśni własnego ramienia, co wywołało istne szaleństwo na punkcie tak zwanej elektroterapii. Lekarze pragnęli się dowiedzieć, czy elektrycznością można wyleczyć pacjenta z najrozmaitszych dolegliwości, od epilepsji i szczękoscisku po

reumatyzm i ból zębów. Turkel opowiada przerażającą historię pewnego urzędnika z holenderskiej kolonii Essequibo (w dzisiejszej Gujanie), który każdego dnia wrzucał do wanny z węgorzem elektrycznym nieletniego niewolnika cierpiącego na skrzywienie rąk i nóg. Ryba tak silnie raziała chłopca prądem, że ledwo wypełzał z wanny albo musiał wyciągać go pomocnik, który także przy tej okazji był rażony prądem. Nieszczęsny chłopak nie został jednak wyleczony i do końca życia miał zdeformowane kości podudzia.

Te wczesne eksperymenty były odstręczające moralnie, niemniej węgorze elektryczne wywarły ogromny wpływ na rozwój nauki. Wiadomość o doświadczeniu Johna Walsha, które wykazało, że węgorze emitują elektryczne iskry, szybko rozeszła się po Europie i zainspirowała włoskiego badacza Luigiego Galvaniego (1737–1798) do przeprowadzania z użyciem żab eksperymentów pokazujących, że elektryczność ma wpływ na funkcjonowanie nerwów i mięśni. Trzeba uczciwie powiedzieć, że węgorze elektryczne przyczyniły się do narodzin nowoczesnej neuronauki. Pokazy Walsha zainspirowały także innego włoskiego badacza, Alessandra Volte (1745–1827), który wywołał skurcz mięśnia żaby, przytykając do jej nerwu końce drutu zrobionego z dwu różnych metali. Kiedy Volta przyłożył jeden z takich bimetalicznych drutów do swoich ust, poczuł kwaskowaty smak i doszedł do wniosku, że drut elektrycznie pobudza receptory smakowe na języku. Te eksperymenty doprowadziły go do zbudowania urządzenia wytwarzającego elektryczność. W tym celu Volta ustawił na sobie wiele okręgów zrobionych ze srebra i z cynku, przedzielonych kawałkami papieru nasączonego roztworem soli. Tak zbudowany tak zwany stos Volty, który powstał pod wpływem zachowań węgorza elektrycznego, stanowił pierwszą na świecie baterię elektryczną. Wynalazek Volty pod tym względem przypominał południowoamerykańską rybę, że w artykule, w którym uczony

opisywał w 1800 roku swoje odkrycia dla Royal Society, nazwał je „sztucznym organem elektrycznym”. Wiemy obecnie, że w ciele węgorza elektrycznego znajduje się kilka tysięcy malutkich, przypominających dysk komórek, umieszczonych jedna na drugiej, niczym gigantyczna wersja pierwotnego ogniwa Volty. Te komórki, znane jako elektrocyty, znajdują się w trzech specjalnych organach, które zajmują dwie trzecie ciała węgorza elektrycznego, podczas gdy jego serce, wątroba i jelita są ściśnięte w wąskiej przestrzeni z przodu ryby. W jaki sposób te komórki generują elektryczność? Oraz – skoro już o tym mowa – czym właściwie jest elektryczność?

Bieżące myślenie

Nazwa „elektryczność” pochodzi od słowa, którym Grecy określali bursztyn: *elektron*. Jeśli potrzymamy bursztyn kawałkiem futra, ta żółtawa skamieniała żywica się naelektryzuje. Na skutek pocierania następuje przepływ elektronów – ujemnie naładowanych cząstek znajdujących się w każdym atomie – z futra do bursztynu. Można teraz użyć ujemnie naładowanego bursztynu do zbierania kawałków papieru (bursztyn odpycha elektrony w papierze, sprawiając, że staje się on na powierzchni naładowany dodatnio, dzięki czemu jest przyciągany przez ujemnie naładowaną bryłkę, którą trzymamy w dłoni). Podobnie będzie, jeśli potrzymamy balonik o sweter – spowodujemy przepływ elektronów do balonu. Możecie następnie zabawić się, przyklejając balonik do ściany, albo sprawić, że włosy staną wam na głowie (doskonała sztuczka do ożywienia dziecięcej zabawy urodzinowej). W następstwie tego samego zjawiska polegającego na elektryzowaniu się (po angielsku *triboelectric*, od greckiego słowa *tribo*, które znaczy pocieram) może się okazać, że po przejściu po nylonowym dywanie będziecie

naładowani do wartości kilku tysięcy woltów. A kiedy sięgniecie ręką w stronę metalowej klamki, wszystkie elektrony zgromadzone na waszej dłoni przeskoczą przez powietrze do metalu. Aj!

Bursztyn pocierany kawałkiem futra albo wasze ciało naładowane po zetknięciu się z nylonem to przykłady elektryczności statycznej. Powierzchnia takich naładowanych przedmiotów ma więcej albo mniej elektronów, niż powinna. Ładunek pozostaje na miejscu – jest statyczny – dopóki nie ma okazji odpłynąć w postaci prądu elektrycznego, co właśnie dzieje się w chwili, gdy wyciągniemy naładowaną dłoń w stronę klamki. Elektryczność statyczna odgrywa podstawową rolę w pracy fotokopiarek, ale w życiu codziennym zwykle mamy do czynienia z elektrycznością w postaci elektronów płynących jako prąd elektryczny w przewodach i kablach albo w tranzystorach (to prąd zasila wasz monitor, jeśli czytacie *Kudłatą naukę* w postaci e-booka). I tym właśnie jest elektryczność – przepływem ładunków elektrycznych. Jeśli ładunek ma postać elektronów, w grę wchodzi wielkie liczby. W przypadku prądu elektrycznego o natężeniu 1 ampera (A) mamy ponad 6 miliardów elektronów przepływających w dowolnym punkcie w ciągu 1 sekundy. Nazwa jednostki pochodzi od nazwiska francuskiego fizyka André Marie Ampère'a (1775–1836), który wykazał, że 2 biegnące równolegle przewody, w których płynie prąd, przyciągają się, jeśli w obu strumień elektryczny płynie w tym samym kierunku, i odpychają się, jeśli strumienie płyną w przeciwnych kierunkach. Nazwisko *monsieur* Ampère'a, podobnie jak nazwisko Pierre'a Simona Laplace'a, zostało uwiecznione na wieży Eiffla. To samo dotyczy innego francuskiego fizyka o dwóch imionach, Charles'a Augustina de Coulomba (1736–1806), którego nazwisko nosi jednostka ładunku elektrycznego: 1 kulomb to ilość ładunku, jaką prąd o wielkości 1 ampera przenosi w ciągu 1 sekundy. Bardzo tam tłoczno.

Ale Francuzi nie mają monopolu na jednostki związane z elektrycznością.

Na cześć Włocha, *signore* Volty, nazwano jednostkę wolt, która jest miarą potencjału elektrycznego. W baterii elektrony przepływają dzięki różnicy potencjałów elektrod, ale żeby popłynęły od bieguna ujemnego do dodatniego, musimy połączyć ze sobą oba bieguny, powiedzmy, za pomocą lampki w rowerze. Prąd elektryczny przypomina wodę płynącą w górskim strumieniu: popłynie ona tylko wtedy, gdy wcześniej wydatkowaliśmy pewną energię, transportując ją na szczyt góry, przy czym wysokość góry jest odpowiednikiem napięcia elektrycznego liczonego w woltach. Jeśli góra jest wysoka, napięcie będzie duże i woda popłynie w dół wartkim strumieniem. Jeśli zaś jest niewielka, napięcie będzie małe i strumień powolny. Jeśli postawimy na sobie dwie góry, jedną na drugiej (jeżeli potraficie to sobie wyobrazić), wtedy podwoimy napięcie – coś jak połączenie ze sobą dwu baterii 1,5 V, aby uzyskać 3 V. Jeśli pomnożymy natężenie prądu przez napięcie, otrzymamy ilość mocy elektrycznej mierzonej w watach; ta jednostka została nazwana na cześć pochodzącego z Birmingham inżyniera Jamesa Watta (dlatego węgorz elektryczny z Tennessee nazywa się Miguel Wattson).

Aby popłynął prąd elektryczny, wcale nie potrzeba jednak elektronów. Prąd może także składać się z atomów, które straciły elektrony (co sprawia, że stały się jonami naładowanymi dodatnio) albo zyskały elektrony (wtedy powstają jony naładowane ujemnie). Coś takiego dzieje się właśnie u węgorza elektrycznego, który wytwarza prąd elektryczny z dodatnio naładowanych jonów sodu, wapnia i potasu. Jony przechodzą przez błonę komórkową każdego elektrocytu i przylegają do niej od zewnątrz, dzięki czemu jej zewnętrzna powierzchnia staje się naładowana dodatnio. W rezultacie wewnętrzna powierzchnia błony komórkowej – gdzie występuje niedobór jonów dodatnich – staje się naładowana ujemnie. Każda strona komórki jest czymś w rodzaju malutkiej baterii z biegunem dodatnim

i ujemnym oraz napięciem 0,085 V. To niewiele, skoro zwykła bateria AA ma napięcie 1,5 V i aby uruchomić rowerową latarkę, potrzeba dwu takich baterii. W dodatku mamy jeszcze jeden problem: ponieważ obie strony elektrocytu, prawa i lewa, są od zewnątrz naładowane dodatnio, a od środka ujemnie, wygląda to tak, jakbyśmy mieli dwie baterie, które stykają się ujemnymi biegunami (+ – – +). Napięcie w sumie równa się zero i żaden prąd nie płynie. Ale zaraz, czekajcie... węgorz elektryczny ma jeszcze jednego asa w rękawie.

Elektrocyty nie są symetryczne: po jednej stronie każdego z nich znajdują się wypustki, podczas gdy druga jest gładka i połączona tkanką nerwową z mózgiem węgorza. Kiedy ryba zaczyna snuć elektryczne myśli, niewielkie pory po gładkiej stronie otwierają się, dzięki czemu dodatnio naładowane jony przywierające do zewnętrznej strony elektrocytu wpływają z powrotem do wnętrza komórki. Gładka strona jest teraz naładowana dodatnio na wewnętrznej powierzchni, a ujemnie na zewnętrznej, dzięki czemu po tej stronie komórki powstaje napięcie 0,065 V. Strona z wypustkami ma nadal napięcie 0,085 V i jest naładowana dodatnio na zewnątrz i ujemnie wewnątrz. A zatem komórka jest naładowana następująco: + / – + / –. Jeśli dodamy obie te wielkości, otrzymamy 0,15 V, a to już znacznie większe napięcie.

Z czasem pory zamykają się i komórka traci swoje napięcie, ale węgorz elektryczny nie jest głupkiem i potrafi tak zsynchronizować swoje elektrocyty, aby wszystkie włączały się w tym samym momencie. Mając do dyspozycji 6 tysięcy takich komórek, może wygenerować napięcie 6 tysięcy razy 0,15 V, co daje w sumie 900 V. Innymi słowy, ryba staje się wielką baterią o napięciu 900 V, przy czym jej biegun dodatni znajduje się w głowie węgorza, a ujemny w jego ogonie. Prąd płynie od przodu, przez wodę, do ogona. Trudno powiedzieć, jak wielki jest ten prąd, ponieważ przepływa przez całą przestrzeń wokół węgorza, ale każde zwierzę, które znajdzie się na

drodze elektrycznej ryby, zostanie porażone prądem.

Ups!

Wiemy więc, jak węgorz elektryczny generuje prąd, ale w jaki sposób używa go do ogłuszania ofiary? Mimo niezliczonych badań, jakie prowadzono nad tymi rybami przez stulecia, odpowiedź na to pytanie poznaliśmy dopiero w 2014 roku, gdy sprawą zainteresował się Kenneth Catania z Vanderbilt University w Tennessee. Jeśli chcemy przeprowadzać eksperymenty z udziałem węgorzy elektrycznych, musimy najpierw złapać takiego oślizłego osobnika, co nie jest wcale proste, ponieważ najpierw trzeba go zmusić, żeby wysyłał impulsy elektryczne, dopóki mu się nie wyczerpie bateria. Catania kupił więc po prostu kilka węgorzy od wyspecjalizowanego dostawcy i umieścił je w plastikowym akwarium wielkości wózka na zakupy w supermarkecie. Dbając o dobre samopoczucie swoich podopiecznych, dodał żwirek oraz plastikowe gałęzie i rośliny, a także dopilnował, żeby woda miała przyjemną temperaturę 26–27 stopni C. Ernie, Ellie i 2 inne węgorze (nie znane nam z imienia) dostawały do jedzenia dżdżownice i raki.

Żeby móc obserwować poczynania swojego kwartetu w zwolnionym tempie, Catania umieścił przy akwarium kamerę wideo działającą z dużą prędkością oraz zainstalował w wodzie elektryczne czujniki do pomiaru prądu elektrycznego wytwarzanego przez ryby. Catania zauważył, podobnie jak wcześniej inni badacze, że elektryczny węgorz wcale nie jest ciamajdą, o nie. Te ryby potrafią dostrzec podejrzaną zmianę ruchu wody wokół siebie w ciągu zaledwie 0,03 sekundy. „Nawet kiedy śpią, a ty poruszysz wodą, choćby bardzo lekko, natychmiast się budzą” – wyjaśnia Catania. Węgorze elektryczne wiedzą, co się wokół nich dzieje, dzięki umieszczonym na pysku

niewielkim receptorom w kształcie otworów, które nieustannie monitorują pole elektryczne w otaczających wodach. Jeśli strzeli ci do głowy obłąkany pomysł, żeby wsadzić rękę do wody obok jednej z takich ryb, zaburzysz to pole, a tym samym zmienisz ilość prądu przepływającego przez skórę węgorza. To niewielki efekt, ale receptory węgorza są niezwykle czułe. Dzięki temu elektryczne węgorze są mistrzami elektrolokacji (nie mylić z echolokacją – to były nietoperze, w rozdziale 4). Kiedy wyczują jakąś smaczną ofiarę, nie czekają długo – potrafią zaatakować i połknąć swój obiad w ciągu dziesiątej części sekundy.

Oczywiście węgorze elektryczne nie ograniczają się do czekania na zmiany w polu elektrycznym. O ile właśnie nie ucięły sobie drzemki, zawsze są na posterunku i przemierzając mętne wody rzek, w których żyją, stale wysyłają impulsy o niskim napięciu. Kiedy węgorz podejrzewa, że coś smakowitego przesuwają w wodzie albo czai w pobliskiej roślinności, wysyła serię 2–3 impulsów o znacznie wyższym napięciu. Jeśli to coś jest zwierzęciem, jego mięśnie skurczą się i nieuchronnie w wodzie powstaną niewielkie fale. Dzięki swoim receptorom na pysku węgorz wie, czy obiekt jego zainteresowania jest jadalny; kawałek drewna na przykład nie poruszy mięśniami i nie zaburzy przepływu wody w odpowiedzi na testowy elektryczny sygnał.

Mniej więcej 20 do 40 milisekund od chwili gdy węgorz elektryczny zorientuje się, że jego cel jest żywym stworzeniem, i ma na widoku smaczny obiad, wysyła w tempie 400 razy na sekundę serię sygnałów o wysokim napięciu. Takie impulsy, o napięciu do 500 V, to nie zabawa dla zaatakowanej ofiary; w ciągu kilku milisekund od trafienia przez pierwszy z nich zwierzę czuje się jak sparaliżowane i nie może się poruszyć. Impulsy działające na neurony motoryczne ofiary powodują mimowolny skurcz jej mięśni. A kiedy ofiara nie może się ruszyć, węgorz zaczyna ucztę; zupełnie

jak gdyby za pomocą pilota miał pełnię władzy nad mięśniami ofiary. Mniej więcej to samo się dzieje, gdy policjanci użyją elektrycznego paralizatora typu Taser. Ta broń umieszcza w ciele człowieka dwie wystrzeliwane z rękojeści pistoletu elektrody, które w ciągu sekundy emitują około 20 impulsów elektrycznych o wysokim napięciu. W rezultacie, zanim się zorientujesz, co cię trafiło, leżysz na ziemi i nie możesz się ruszyć. W odróżnieniu od ofiary wężorza nie zostaniesz jednak zjedzony, ale odwieziony na posterunek policji na przesłuchanie. Podobnie jak w następstwie użycia tasera, paraliż ofiary jest jedynie czasowy. Zaatakowane zwierzę, jeśli nie zostanie natychmiast zjedzone, odzyskuje zdolność poruszania się i może bezpiecznie uciec. Niemniej wysyłanie kilku impulsów testowych przed przypuszczeniem frontalnego ataku stanowi „naprawdę sprytny sposób oszczędzania energii” – twierdzi Catania. „Emitowanie kolejnych serii impulsów o bardzo wysokim napięciu pochłania dużo energii i wężorz decyduje się na to, jedynie kiedy jest pewny, że jego ofiara jest czymś ożywionym” – dodaje.

Wężorz ma w zanadrzu jeszcze kilka innych sztuczek. Catania odkrył, że do elektrolokacji wężorz używa nie tylko impulsów o niskim napięciu – biolodzy wiedzieli o tym od lat pięćdziesiątych XX wieku – ale także impulsów o wysokim napięciu. Innymi słowy, posługuje się seriami impulsów o wysokim napięciu w dwu różnych sytuacjach: po pierwsze, aby ogłuszyć ofiarę, jak widzieliśmy wcześniej, oraz po drugie, aby odnaleźć sparaliżowaną ofiarę, która nie pozostaje w bezruchu, lecz unosi się w wodzie. W dodatku, jeśli wężorz elektryczny atakuje jakieś większe zwierzę, takie jak rak, posługuje się jeszcze inną taktyką: kąsa ofiarę, po czym otacza ją swoim ciałem w taki sposób, że niemal dotyka ogonem własnej głowy. Umieściwszy w ten sposób łup między dodatnim a ujemnym biegunem swojego pola elektrycznego (głową i ogonem), doprowadza do

podwojenia siły pola elektrycznego powstającego dzięki impulsom o wysokim napięciu. Zwiększona moc, w połączeniu z wysoką częstotliwością impulsów, błyskawicznie paraliżuje mięśnie ofiary i zaatakowane zwierzę szybko poddaje się wyczerpane. A kiedy opadnie z sił, węgorz może spokojnie połknąć je w całości.

Prawdę mówiąc, przy pisaniu tego fragmentu *Kudłatej nauki* poczuliśmy, że doskonale rozumiemy fascynację Catanii węgorzami elektrycznymi. Badacz zainteresował się nimi po zdobyciu stypendium Guggenheim Foundation na pracę nad książką o tym, w jaki sposób różne zwierzęta odbierają bodźce zmysłowe. „Początkowo sądziłem, że węgorze elektryczne będą swego rodzaju przerywnikiem w moich głównych badaniach, wkrótce jednak przekonałem się, że to najciekawsze zwierzęta na świecie, mimo że zajmowano się nimi od stuleci – mówi. – Wciągnęło mnie bez reszty”. Nawet wielki przyrodnik Karol Darwin uznał węgorze elektryczne za wielką zagadkę i w swoim arcydziele *powstawaniu gatunków drogą doboru naturalnego* umieścił opis ich elektrycznych organów pod nagłówkiem „Szczególne trudności, które napotyka teoria doboru naturalnego”. Wielki uczoney uznał, że „nie sposób przedstawić sobie, przez jakie fazy przechodziły w swym rozwoju te zadziwiające twory^[8]”. Darwin bez wątpienia z zainteresowaniem przyjąłby wiadomość, że węgorze elektryczne wcale nie są przykładem stworzenia, które stać tylko na jedną mało wyrefinowaną sztuczkę, jak niegdyś myśleli o nich biolodzy, i potrafi jedynie ogłuszać swoje ofiary, rażąc je prądem o wysokim napięciu. Jak się okazuje, te ryby to prawdziwi mistrzowie w posługiwaniu się polem elektrycznym.

Niestety, nigdy się nie dowiemy, co pomyślałby o Miguelu Wattsonie i jego wpisach na Tweeterze.

Niech pole będzie z tobą

Piękno węgorzy elektrycznych polega też na tym, że mogliśmy dzięki nim wprowadzić podstawowe pojęcia związane z elektrycznością, takie jak ładunek elektryczny, napięcie i prąd. Jednak opisując sposób funkcjonowania węgorzy, sprytnie przemyciliśmy bez dalszych wyjaśnień pewien termin: „pole elektryczne”. Z pojęciem pola zetknęliśmy się już w rozdziale 3, przy okazji równania Naviera-Stokesa, masywnej formuły matematycznej, dzięki której można wyliczyć, jak szybko i w jakim kierunku porusza się każdy punkt płynu. Tym właśnie jest pole: wielkością, której wartość można wyliczyć dla każdego punktu przestrzeni. Jeśli za pomocą komputera rozwiążemy równanie Naviera-Stokesa, otrzymamy mapę z tysiącem strzałek pokazujących, w jakim kierunku porusza się płyn w każdym punkcie, przy czym długość strzałki będzie określała prędkość, z jaką się przemieszcza. Jeśli połączymy wszystkie strzałki, uzyskamy wyobrażone linie, które stanowią wygodny sposób wizualizacji płynu jako pola, przypominający linie przedstawiające wiatry na telewizyjnej mapie pogody.

Pod pewnym względem siła elektryczna jest podobna do grawitacji (zob. rozdział 2). Siła grawitacji działająca między dwoma obiektami słabnie czterokrotnie z każdym podwojeniem dzielącej je odległości i tak samo wielkość siły elektrycznej działającej między dwoma ładunkami jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości. Ale są też między nimi 2 ogromne różnice. Pierwsza z nich to ta, że siła elektryczna jest miliard razy miliard, razy miliard razy silniejsza niż siła grawitacyjna. Czujemy skutki działania grawitacji jedynie na większe przedmioty, jak choćby wtedy gdy nasz telefon komórkowy wyśliznie nam się z rąk i przyciągnięty przez siłę grawitacji naszej planety spadnie na chodnik (a do tego pęknie w nim wyświetlacz). Brrr. Druga wielka różnica polega na tym, że siła grawitacji

jest siłą przyciągającą oddziałujące obiekty, podczas gdy w przypadku siły elektrycznej przeciwności się przyciągają, ale ładunki podobne się nie lubią. Elektrony odpychają inne elektrony. Protony – dodatnio naładowane cząstki, które kryją się w jądrze atomu – odpychają inne protony, ale kuszą elektrony. A teraz, jeśli wydawało wam się, że pole elektryczne jest czymś dziwnym, zajmiemy się innym polem, które jest jeszcze dziwniejsze. Pora wrócić do zwierzęcia, o którym mówiliśmy w rozdziale 3 – kryje ono przed nami jeszcze wiele sekretów.

Cudownie kwitnące

Trzmiel ziemny, o płożożółtym odwłoku, z delikatnym bzyczeniem przelatuje z jednego purpurowego kwiatka, zanurzonego w morzu zieleni, na drugi. Niektóre ignoruje i szybko leci dalej. Na innych ląduje i swoim długim językiem wysysa z wnętrza kwiatu nektar. Wydaje się, że trzmiel jest zadowolony, ale jest w tej łące coś dziwnego. Wszystkie kwiaty wyglądają identycznie. Nie widać żadnych odcieni barwy, żadnej naturalnej zmienności. Każdy kwiat jest idealnie okrągły, idealnie płaski. To e-kwiaty, sztuczne petunie. Każda została zrobiona z fioletowego plastikowego krążka osadzonego na stalowym pręcie i leżącego płasko na zielonej drewnianej tabliczce umieszczonej na powierzchni pokrytej zieloną taśmą izolacyjną. W sumie przypomina to gigantyczny zestaw klocków lego albo scenerię filmu o teletubisiach. Na górze każdego e-kwiatu znajduje się biały plastikowy pojemniczek wypełniony płynem, a u spodu każdej tabliczki wije się czarny kabel.

Następnie badacz naciska przełącznik. Na pierwszy rzut oka nic się nie zmieniło poza tym, że teraz owad jedynie na krótko zatrzymuje się przy

niektórych wybranych kwiatach, od czasu do czasu kręcąc głową z niesmakiem. Trzmiel szuka roztworu cukru, odgrywającego rolę fałszywego nektaru, ale zamiast cukru natyka się na związek chininy, która pszczołom wydaje się gorzka (podobnie jak nam – chinina nadaje smak tonikowi). Przed naciśnięciem guzika trzmiel biorące udział w eksperymencie znajdowały cukier w ośmiu kwiatach na dziesięć, teraz dostają nagrodę jedynie za co drugim razem.

W jaki sposób człowiek przyciskający guzik, Daniel Robert, specjalista w dziedzinie zwierzęcych zmysłów z uniwersytetu w Bristolu, w Wielkiej Brytanii, staje na drodze trzmieli szukających pożądanego nektaru? I dlaczego w ogóle zbudował ten obłąkany sztuczny ogród? Czy to jakiś maniak, który pragnie zdobyć władzę nad umysłami owadów i potajemnie próbuje robić eksperymenty zainspirowane książką *Człowiek, który gapił się na kozy* (2004)? A przede wszystkim: dlaczego prawdziwe kwiaty w ogóle oferują pszczołom słodkie pożywienie?

Kwiaty nie są zainteresowane towarzyskimi wizytami owadów; nie ma czegoś takiego jak darmowy lunch. To prawda, że kwiaty rozdają pszczołom pożywienie w postaci bogatego w białko pyłku (nasienia męskich kwiatów), którym pszczoły karmią swoje larwy, oraz nektaru, który pszczoły, po przetrawieniu, wypluwają po powrocie do ula w postaci miodu. Handlowcy nie zwracają może na ten szczegół naszej uwagi na opakowaniach, lecz miód to zasadniczo wymiociny pszczół. Wymiociny o całkiem przyjemnym smaku, ale mimo wszystko wymiociny. Jednak jeśli pyłek zostanie zjedzony przez larwy pszczół, rośliny, w kategoriach reprodukcji, nic z tego nie mają. W zamian za swój posiłek pszczoły muszą więc roznieść część pyłku na inne kwiaty tego samego gatunku, zamiast zabrać wszystko ze sobą do ula. W odróżnieniu od roślin owady są mobilne i mogą w ciągu jednego dnia odwiedzić wiele kwiatów.

Aby zwiększyć swoje szanse na to, że pszczoła następnie gdzieś porzuci zabrany pyłek, kwiaty umieszczają swoje męskie organy płciowe i żeńskie organy płciowe, oraz zasoby nektaru, w jednym miejscu, czyli w samym środku kwiatu. W zależności od gatunku rośliny kwiaty mogą być zarazem męskie i żeńskie albo tylko jednego rodzaju. Kiedy pszczoła wpada na słodkiego drinka do kwiatu z męskimi organami, ociera się o pokryte pyłkiem elementy pręcików. Nawet gołym okiem widać te barwne grudki na końcach cienkich włókien pręcików znajdujących się w centrum wielu kwiatów. Kiedy pszczoła się posila, tysiące ziarenek pyłku przyklejają się do jej włochatego ciała. Następnie owad się oporządza, przenosząc ziarenka pyłku do koszyczków umieszczonych na swoich nogach, dzięki czemu powstają swoiste żółte pantalone z pyłku. Jednak pszczoła nie może dosięgnąć pyłku znajdującego się na swoim grzbiecie. I kiedy odwiedza inny kwiat tego samego gatunku, tym razem wyposażony w żeńskie części rozrodcze, część tego pyłku spada, spotyka się z zalążkiem i powstaje ziarenko. To też jest seks, Jim, tylko trochę inny^[9].

Pracowite pszczołki

Zasadniczo pszczoła pożąda pożywienia, a kwiat pragnie seksu: połączenia się pyłku i zalążka. W przypadku pszczoł to jest prawda, nawet jeśli kwiat będzie sztuczny, zrobiony przez badaczy w laboratorium. Pora dowiedzieć się, o co właściwie chodziło Danielowi Robertowi z tymi sztucznymi petuniami. „Zadaliśmy pszczołom pytanie, czy potrafią znaleźć kwiaty, w których kryje się słodka nagroda” – opowiada Robert. Okazało się, że tak – za pomocą pola elektrycznego.

Na początku badań kwiaty zawierające roztwór cukru, sacharozy, miały

napięciu 30 V, a e-kwiaty zawierające roztwór chininy – napięciu 0 V. Po 50 wizytach na łące z elektronicznymi kwiatami pszczoła przyswoiła sobie lekcję: 30 V – dobrze, 0 V – źle, co wyjaśnia jej osiemdziesięcioprocentową skuteczność w znajdowaniu słodkich e-kwiatów. Aby sprawdzić, czy pszczoły po prostu nie zapamiętują położenia e-kwiatów, Robert i jego współpracownicy przestawiali kwiaty losowo między wizytami owadów. Poza tym czyścili je etanolem, by usunąć wszystkie feromony, jakie pszczoły mogły na nich zostawić jako sygnał dla siebie, oraz wodą, by wyeliminować ślady chininy. Ale co będzie, jeśli okaże się, że pszczoły, żeby znaleźć słodkie kwiaty, posługują się jako wskazówką czymś innym niż napięciem – na przykład zapachem albo inną subtelną różnicą, której nie potrafią wychwycić słabe ludzkie zmysły? Aby przyłapać pszczoły na gorącym uczynku, badacze wyłączyli więc prąd. „No i proszę! Kiedy zabierzesz napięcie, nie potrafią tego zrobić. Po staremu szukały losowo – opowiada Robert. – Studenci strasznie się wtedy ucieszyli, podskakiwali jak dzieci w całym laboratorium”.

Pszczoły pokazały badaczom, że posługują się polem elektrycznym do uczenia się i podejmowania decyzji. To imponujące, zważywszy na rozmiary ich mózgu. Pszczoły potrafią nawet wykrywać rozkład pola elektrycznego, nie tylko jego obecność. W następnych eksperymentach Robert przygotował smaczny e-kąsek w postaci kwiatu naładowanego na zewnątrz dodatnim napięciem 20 V, a wewnątrz 10 V, ujemnym. Chinina tymczasem znajdowała się w e-kwiatach utrzymywanych w stałym napięciu + 20 V. I znów okazało się, że pszczoły dobrze się uczą i podczas ostatnich 10 wizyt miały siedemdziesięcioprocentową skuteczność w poszukiwaniu cukru, nie potrafiły jednak powtórzyć tej sztuczki, jeśli napięcie zostało wyłączone.

Zwierzęta wykorzystujące prąd elektryczny – obdarzone zdolnością do wyczuwania pól elektrycznych, wytwarzania pól albo jednego i drugiego –

stosunkowo często spotyka się w środowisku wodnym. Pszczoły są pierwszym gatunkiem, o którym wiemy, że potrafi wykrywać pole elektryczne w powietrzu. Jak dowiódł Robert, wykorzystują informacje zawarte w polu elektrycznym, podejmując decyzję, czy warto odwiedzić dany e-kwiat. Uczony, który w 2013 roku opublikował wyniki swoich badań w „Science”, jest podekscytowany, że udało mu się odkryć „nowy zmysł u zwierzęcia od ponad dwu tysięcy lat budzącego zainteresowanie ludzkości – w końcu mnóstwo pożywienia, jakie mamy na swoim stole, powstaje bezpośrednio w następstwie zapylania”.

Podobnie jak Robert także jesteśmy zafascynowani pszczołami. Wraz ze swoimi bliskimi krewnymi, osami i szerszeniami, te owady wyposażone w żądło najczęściej występują w naszej książce; na drugim miejscu wspólnie plasują się psy, węże i komary. Zapewne jest w tym jakiś dowcip, ale na razie nie potrafiliśmy go złapać. Niemniej to książka naukowa i nie wystarczy, że będziemy coś podziwiać: musimy też wiedzieć, jak to działa. Mamy tu dwa podstawowe pytania. W jaki sposób kwiat w naturze, nie podłączony kablem do kontaktu, wytwarza pole elektryczne? Oraz, przede wszystkim, jak to się dzieje, że pszczoły wykrywają to pole?

Bzykacze włączone

W tym, że zwierzęta wytwarzają pole elektryczne, nie ma nic zaskakującego; w końcu sami używamy impulsów elektrycznych w komórkach nerwowych i do poruszania mięśni. Jednak rośliny nie poruszają mięśniami i nie mają mózgu, więc to wcale nie jest takie oczywiste, w jaki sposób i dlaczego wytwarzają pole elektryczne. Zresztą na ogół tego nie robią, choć kiedy obdarzone elektrycznym ładunkiem rozpuszczone jony wędrują w roślinie,

rzeczywiście powstają różnice potencjałów i niewielkie przepływy prądu elektrycznego.

Sekret kryje się w powietrzu otaczającym rośliny. W pogodny dzień kwiaty są zanurzone w polu elektrycznym, które powstaje w następstwie około 2 do 3 tysięcy burz, jakie każdego dnia wybuchają na świecie. Kryształki lodu pocierające o siebie u podstawy chmur burzowych wytwarzają tak silny ładunek ujemny, że spływa on na ziemię. Po zniknięciu elektronów w atmosferze utrzymuje się w sumie ładunek dodatni. Potencjał elektryczny – szczyt góry, jeśli odwołać się do naszej analogii z podrozdziału o węgorzach – wynosi mniej więcej 0 V na powierzchni ziemi i osiąga maksymalną wartość, około 300 000 V, jakieś 30 do 50 kilometrów wyżej. Na wysokości kwiatów ten potencjał ma około 100 V/m. Petunia (*Petunia integrifolia*), na której wzorował się Robert, kiedy budował swoje sztuczne kwiaty, ma około 30 centymetrów wysokości, co oznacza, że w słoneczny dzień potencjał elektryczny w powietrzu wokół tych kwiatów ma wartość około 30 V – taką samą, jaką stosował Robert w przypadku swoich ekwiatów. Jednak łodyga i korzenie uziemiają petunię i w efekcie jej potencjał elektryczny jest taki sam jak na powierzchni ziemi, która przy dobrej pogodzie jest zawsze naładowana ujemnie – nieco bardziej niż atmosfera, ponieważ w ziemi znajduje się mnóstwo elektronów. A zatem między kwiatem a otaczającym go powietrzem mamy różnicę potencjałów około 30 V. Poza tym dodatni ładunek, obecny w atmosferze, indukuje ładunek ujemny, zachęcając elektrony z ziemi do wędrówki przez kwiat i zbierania się na jego powierzchni. Jednak podczas deszczu wszystko się zmienia; lokalne pole elektryczne w atmosferze ma wartość 0 V, ponieważ kropelki wody przewodzą elektryczność lepiej niż powietrze i usuwają nadmiar ładunków.

Włochaty biznes

Wiemy już, jak to się dzieje, że kwiat ma pole elektryczne. Czas na pytanie numer dwa: w jaki sposób pszczoła je wykrywa? „Wielu badaczy zauważyło, że owady zapylające są zwykle bardzo owłosione – mówi Robert. – Są włochate i przyjemne dla oka, więc budzą u ludzi większą sympatię”. Jednak niewykluczone, że te same włoski, które zwiększają popularność pszczół, mogą także, jak sądzi Robert, pomagać im w wykrywaniu pól elektrycznych. „Pamiętam, jak w czasach przed nadejściem telewizorów o płaskim ekranie, które są przyjemnie nieelektrostatyczne, kiedy się przechodziło koło telewizora, łapał człowieka prąd – opowiada. – To jest ta sama zasada. Jeśli podchodzisz do monitora albo na wystawie zbliżasz się do obrazu namalowanego akrylami, czujesz, jak włoski stają ci na przedramieniu. Nie zostały stworzone w tym celu, ale czujesz, że tak się dzieje”.

Jednak z tego, że coś się porusza, nie wynika, że to coś czuje cokolwiek. „Mógłbym położyć na stole kamyk, włączyć głośnik na pełen regulator i za pomocą lasera pokazać ci, że kamyk wibruje – wyjaśnia Robert. – Ale czy to oznacza, że kamyk słyszy? Przypuszczalnie nie. Nie powinniśmy wpadać w tę pułapkę”. Nawet jeśli pszczele włoski reagują na pole elektryczne, być może pszczoły wcale nie wykorzystują tej informacji. Dlatego właśnie Robert opracował swoje eksperymenty z udziałem e-kwiatów. „Dajmy pszczole szansę, żeby sama nam powiedziała, czy ma zmysł wyczuwający jej elektrostatyczne interakcje z kwiatami” – opowiada. I pszczoła udzieliła odpowiedzi.

Co dokładnie się dzieje, kiedy pszczoła przelatuje niedaleko elektrycznie naładowanego kwiatu, to kwestia złożona, ponieważ pszczoła ma pewien własny ładunek elektryczny. Wiemy od lat osiemdziesiątych XX wieku, że większość pszczół jest naładowana dodatnio. Robert natomiast odkrył, że

około 6 procent trzmieli należy do przeciwnego typu i są one naładowane ujemnie. „Pszczoły są jak ludzie – wyjaśnia. – Jedni są naładowani bardziej pozytywnie niż inni”. Tarcie z cząsteczkami powietrza, jakie powstaje podczas lotu tych dodatnio naładowanych pszczół, musi strącać elektrony z ich powierzchni, pozostawiając im pewien nadmiar ładunków dodatnich. Z drugiej strony, kiedy lecą w powietrzu zawierającym cząsteczki pyłu, zmiatają z nich elektrony, więc być może w efekcie pszczoły są naładowane ujemnie. Mamy tu jeszcze raz zjawisko elektryzowania się.

Dom Clarke, jeden ze studentów Roberta, ma wielki tytuł do chwały: pierwszy zmierzył dokładną wartość ładunku pszczoły. To trudne zadanie. Biorąc pod uwagę jej żądło, lepiej nie zadzierać z wysoce – albo nawet odrobinę – naładowaną pszczołą. Co powiedziawszy, musimy przyznać, że w ciągu 4 lat swoich badań nad owadami Robert nigdy nie został ukąszony. „Albo bardzo mnie lubią, albo mnie nie lubią – mówi. – Nie wiem, czy jedno, czy drugie”. Trzmiele są łagodne – „to wspaniałe istoty”. Niemniej pszczoły cały czas są w ruchu. Na szczęście z pomocą badaczom przyszła metoda opracowana w XIX wieku przez pewnego introligatora, który został uczonym, Michaela Faradaya (1791–1867).

Posługując się wykonanym ze stopu cyny z ołowiem wiadrem na lód, Faraday pokazał, że jeśli wewnątrz metalowego naczynia umieścimy naładowany przedmiot w taki sposób, aby nie dotykał jego boków, to po zewnętrznej stronie naczynia pojawi się ładunek niemal takiej samej wielkości i o takim samym znaku – dodatnim albo ujemnym. Na pozór to cudowne zjawisko, ale to tylko fizyka. Jak ujął to Arthur C. Clarke: „Każda wystarczająco zaawansowana technologia jest nieodróżnialna od magii”. Ponieważ dziewiętnastowieczna technologia Faradaya nie jest już dziś tak rewolucyjna, możemy wyjaśnić, co się tu dzieje. Jeśli wewnątrz wiadra znajdzie się dodatnio naładowana pszczoła, owad będzie indukował na

wewnętrznej stronie tak zwanego wiadra Faradaya ujemny ładunek tej samej wielkości, przyciągając wiele elektronów z wiadra w stronę jego wewnętrznej powierzchni. W rezultacie na zewnętrznej powierzchni wiadra pojawia się ładunek dodatni, znów o tej samej wielkości jak ładunek pszczoły, jednak tym razem o tym samym znaku. Nie ma w tym nic nadprzyrodzonego, niemniej sztuczka jest zgrabna.

Jeśli uda wam się odrobiną cukru zwabić pszczołę do wiadra, wszystkie wasze problemy związane z pomiarem jej ładunku rozwiążą się: wystarczy, że podłączycie do wiadra, nie do pszczoły, amperomierz o odpowiedniej czułości. Dawniejsi badacze mierzyli ładunek elektrostatyczny pszczoły, używając elektrometrów, ale dzięki wykorzystaniu wiadra Faradaya można zmierzyć całość tego ładunku. Stosując zestaw wiadro-amperomierz, Dom Clarke i Daniel Robert przekonali się, że pszczoła przeciętnie ma na sobie 0,000 000 032 kulomba ładunku o znaku dodatnim, co odpowiada utracie 1000 do 2000 elektronów. Mogłoby się to wydawać dużo, lecz pszczoła przeciętnej wielkości ma miliard miliardów razy więcej elektronów – a zatem utrata tysiąca czy dwóch nie szkodzi jej aż tak bardzo. Aby umieścić rzecz w odpowiednim kontekście: 1 kulomb to ładunek, jaki przepływa przez energooszczędną żarówkę o mocy 9 W w ciągu 25 sekund. Typowy piorun przesyła na ziemię 15 kulombów.

Kto tu dowodzi?

Cała ta fizyka znaczy tyle, że kwiaty mają odrobinę ładunku ujemnego, a pszczoły są naładowane dodatnio. Czy kiedy się je połączy, w tkaninie czasoprzestrzeni powstaje niewielka dziura o kształcie pszczoły? Hm. Jak w przypadku większości gazetowych nagłówków opatrzonych znakiem

zapytania odpowiedź brzmi: nie. Nic nie znika, ale rezultat może być widowiskowy. Kiedy pszczoła zbliża się do kwiatu, można zobaczyć, jak obłoczek żółtego pyłku przeskakuje na jej najbardziej z tyłu położoną parę odnóży. To prawdziwie królewska metoda przenoszenia pyłku (choć przytrafia się robotnicy). Coś jak odkrycie, że jeden z artykułów na liście naszych zakupów w supermarkecie nagle sam wylądował w koszyku. I znów nie ma w tym żadnej magii, jedynie elektrostatyka. Kiedy pszczoła i pyłek znajdują się blisko siebie, siła przyciągania ich ładunków elektrycznych o przeciwnym znaku rośnie, aż wreszcie staje się tak duża, że w końcu przeważa ciężar pyłku i jego siłę przylegania do pylników na pręcikach i w efekcie nasienie kwiatu przeskakuje dzielącą je przestrzeń.

Żeby przekonać się dokładniej, co się właściwie dzieje, kiedy pszczoła i kwiat zbliżają się do siebie, Robert podłączył łodygę petunii do elektrody i umieścił kwiat wewnątrz drewnianej skrzynki w taki sposób, że pszczoła mogła latać w niej swobodnie. Na filmie wideo, który Robert nakręcił podczas swoich eksperymentów, kwiat z początku wydaje się opuszczony niczym samotny mak wyrastający na rumowisku. Kiedy pszczoła zaczyna się do niego zbliżać, elektryczny potencjał łodygi kwiatu zaczyna rosnąć. Można oglądać animowaną ilustrację zmian potencjału łodygi, który stopniowo maleje, od wartości 10 miliwoltów (mV), a potem rośnie w miarę zbliżania się pszczoły: owad znika, głową naprzód, w głębi dzwonkowatego kwiatu, chwilę w nim zabawia, po czym odlatuje. Jednak po jego zniknięciu napięcie kwiatu jeszcze przez kilka sekund rośnie, osiągając maksymalną wartość 40 mV, po czym spada do zera. Chociaż typowa wizyta pszczoły trwa zaledwie 4 sekundy, potencjał łodygi jeszcze przez jakąś minutę pozostaje większy, niż był wcześniej. Cały ten proces toczy się bardzo powoli i nie przypomina działania zwykłego obwodu elektrycznego, w którym żarówka zapala się, gdy tylko naciśniemy włącznik i pozwalamy płynąć elektronom. „Wydaje

się, że coś tu się powinno dziać bardzo szybko, ale tak nie jest. To się toczy bardzo powoli” – opowiada Robert. Musimy się więcej dowiedzieć na ten temat.

Robert odkrył, że po wizycie jednej pszczoły łodyga petunii miała dodatni ładunek wyższy o 25 mV niż poprzednio. Po wizycie kolejnych pszczoł była naładowana jeszcze bardziej; za każdym razem gdy dodatkowo naładowana pszczoła odwiedza kwiat, kilka elektronów przechodzi z kwiatu na pszczołę, redukując wielkość jej dodatniego ładunku i zmniejszając ujemny ładunek kwiatu. Robert na razie nie wie, jaki wielki jest ładunek, który przechodzi podczas każdej takiej wizyty, ani dlaczego przepływa tylko część ładunku kwiatu. Trudno to zmierzyć, ponieważ w chwili gdy podłączymy miernik elektryczny, zbierzemy wszystkie ładunki.

Jak widzieliśmy wcześniej, pszczoły używają pola elektrycznego otaczającego kwiaty do wykrywania substancji i uczenia się skuteczniejszych zachowań. Jaką korzyść z wytwarzania takiego pola ma kwiat? „Nie ma sensu dla mnie, petunii, aby ktoś mnie odwiedzał, jeśli przez resztę dnia zamierza odwiedzać maki” – wyjaśnia Robert. To wszystko sprawa marketingu: rośliny potrzebują lojalności klientów wobec swojej marki, czyli stałości pszczoł w wyborze gatunku kwiatów. Z punktu widzenia kwiatów to rzecz o decydującym znaczeniu, aby pszczoły karmiły się wyłącznie pyłkiem jednego gatunku. Dlatego żeby pszczoły były im wierne, kwiaty muszą unikać fałszywej reklamy. Jeśli jakiś kwiat ma wielu gości, w końcu wyczerpie mu się nektar i będzie potrzebował trochę czasu, by uzupełnić zapasy. Jeśli jego słodko pachnące, barwne reklamy będą mówiły pszczołom, że mogą liczyć na mnóstwo słodkich dobroci, gdy w rzeczywistości kwiat ich nie ma, pszczoły zaczną szukać nektaru gdzie indziej, u innego gatunku kwiatów, które okażą się bardziej wiarygodne. „Jeśli idziesz do supermarketu i przez 3 dni z rzędu okazuje się, że nie ma chudego organicznego mleka

w litrowych opakowaniach, myślisz sobie: »Hm, muszę spróbować gdzie indziej, pójdę do innego supermarketu«” – wyjaśnia Robert.

Rozczarowane pszczoły to ostatnia rzecz, jakiej pragnie kwiat. Ale kwiaty nie mogą szybko zmienić swojej barwnej przyciągającej pszczoły reklamy ani zapachu. Wykształciły więc ewolucyjnie sztuczkę odwołującą się od praw fizyki, aby poinformować pszczoły, że mają właśnie przerwę, jednak wkrótce dostawy nektaru zostaną wznowione.

Robert sądzi, że poprzez zmianę parametrów pola elektrycznego kwiat mówi pszczole, że chwilowo nie ma pożądaných przez nią dóbr. To bardziej cyfrowy wyświetlacz z napisem „wyprzedane”, który zapala się, gdy tylko spada ilość nektaru w kwiecie, niż tradycyjna deska, na której trzeba własnoręcznie wykaligrafować napis. Jak ujmuje to Robert, kwiat może powiedzieć: „Jestem odpowiedniej barwy i pachnę ładnie, ale przez jakieś 5 minut nie będę miał dość nektaru. Wpadnij do mnie ponownie, lecz nie zmieniaj całkowicie swojej strategii, skoro podoba ci się moja barwa i zapach; poleć raczej w odwiedziny do mieszkających po sąsiedzku moich przyjaciół z tego samego gatunku”.

Pszczoła przelatująca kilka centymetrów od kwiatu, który niedawno został odwiedzony przez inne pszczoły, przypuszczalnie może wyczuwać, że kwiat ma niezwykle wysoki ładunek dodatni oraz zmieniony rozkład ładunku, i postanawia wrócić do niego później. „Każda pszczoła pozostawia po sobie na tym kwiecie pewien ślad” – mówi Robert, dodając że zmiana ładunku elektrycznego jest „cieniem obecności innej pszczoły”. Kwiat i pszczoła zgodnie współpracują, aby pozostawić szybko wysłaną elektryczną wiadomość (bee-mail?) dla innych pszczół. Dzięki temu głodne pszczoły znajdują nektar szybciej, a kwiat może utrzymać lojalność pszczół wobec swojej marki. Wszyscy wygrywają.

Ma to szczególne znaczenie dla pszczół miodnych, które szybko odlecą

z powrotem do ula, jeśli znaleziona grupa kwiatów nie spełni ich wszystkich wymagań. Tam przekażą tę smutną wiadomość swoistym tańcem pszczół (więcej na ten temat w rozdziale 6), dzięki czemu cała grupa poszukujących pokarmu robotnic może skierować się na inne, bardziej obiecujące pastwiska. Trzmielce natomiast nie tańczą, aby przekazać jakieś informacje, i nie wracają do gniazda tak regularnie jak pszczoły miodne – czasem spędzają nawet noc poza domem. Fúj!

Cała naprzód

Rośliny reagują nie tylko na ruchy pszczół, ale także na ruchy człowieka. Robert, wielki entuzjasta komunikowania wyników swych prac, zamieścił na swojej stronie internetowej film, na którym widać, że podłączył fiołek afrykański do woltomierza i wymachuje ręką w stronę kwiatu. To niesamowite wrażenie, gdy widzimy, że kwiat reaguje niemal jak zwierzę – elektryczny potencjał fiołka zmienia się, gdy zbliża się do niego dłoń Roberta. Przypominają się przestrogi, że „marchewki wrzeszczą, kiedy je wyrwać”, jakie wielu wegetarian usłyszało od zapalonych, choć źle poinformowanych mięsożerców. Nie jesteśmy pewni, w jaki sposób w roślinie powstaje ta reakcja elektryczna, ale znów może to mieć coś wspólnego z elektrostatyką.

Na razie nie zaszliśmy zbyt daleko, jeśli chodzi o wiedzę na temat sposobu, w jaki pszczoły wykrywają pole elektryczne – mnóstwa rzeczy nadal nie rozumiemy i Robert kontynuuje swoje badania. Niewykluczone, że pszczoły wykorzystują swoje elektryczne zdolności do wykrywania innych informacji prócz stanu zaopatrzenia kwiatu w nektar. Może na przykład dzięki wyczuwaniu potencjału elektrycznego w atmosferze, który wzrasta

wraz z wysokością, orientują się, jak wysoko lecą. A ponieważ zawarte w chmurach kropelki wody przewodzą elektryczność, pszczoła, przypuszczalnie wyczuwając ją, może ocenić, czy nad jej głową zbiera się chmura, a nawet czy napływa w jej stronę. Dlatego Robert zajmuje się obecnie liczeniem, jak wiele pszczół miodnych opuszcza ul w zależności od warunków atmosferycznych.

Robert uważa, że inne owady także być może wyczuwają pole elektryczne – kto wie, może pewnego dnia się okaże, że nawet bakterie to potrafią. A co z nami, ludźmi? „Gdybym brał udział w [teleturnieju] *Mastermind*^[10], poddałbym to pytanie – mówi. – Ludzie twierdzą, że są wrażliwi na prądy elektryczne. Ale nie wiem, nie sądzę, żebym sam był. Pytam ich wtedy, jaki składnik pola wyczuwają, a oni nie potrafią mi tego powiedzieć. Niemniej te osoby mają wrażenie, że wyczuwają te pola. To ciekawa kwestia, ale mam mnóstwo innych ciekawych rzeczy do zbadania”.

W porównaniu z tym, jak wiele wiemy o innych zmysłach zwierząt – wzroku, słuchu, smaku, dotyku czy powonieniu – jesteśmy jakieś 150 lat do tyłu, jeśli chodzi o to, jak pszczoły, i być może inne zwierzęta lądowe, wyczuwają pola elektryczne. „To fascynujące czasy, ponieważ wszystko jest jeszcze przed nami – ekscytuje się Robert. – Nagle masz mnóstwo pytań, które przychodzą ci do głowy szybciej niż odpowiedzi, a to zawsze dobry znak w badaniach, ale myślisz: No dobra, pora wziąć głębszy oddech. To którym z nich naprawdę chciałbyś się zająć? Nie możesz naraz gonić wszystkich królików”.

Przyciąganie magnetyczne

Zanim wdaliśmy się w te wszystkie opowieści o pszczołach, wspomnieliśmy,

że siła elektryczna działająca między dwoma obiektami słabnie czterokrotnie wraz z dwukrotnym wzrostem dzielącej je odległości. Nazywamy tę zasadę prawem Coulomba na cześć naszego starego znajomego *monsieur* Coulomba (tego z wieży Eiffla), który w latach osiemdziesiątych XVIII wieku eksperymentował w swoim paryskim laboratorium z metalowymi kulami obdarzonymi ładunkiem elektrycznym. Jednak to prawo obowiązuje tylko wtedy, gdy obiekty obdarzone ładunkiem pozostają w bezruchu. Jeśli się poruszają, siła pola elektrycznego zależy także od sposobu, w jaki dany obiekt się porusza. Ten fragment pola, który zależy od ruchu, nazywany jest siłą magnetyczną.

Dziś wiemy, że elektryczność i magnetyzm są dwiema stronami tego samego medalu, ale kiedy w 1821 roku Faraday ogłosił wyniki swoich eksperymentów, jego odkrycie stanowiło prawdziwą rewolucję. Podczas badań w laboratorium Royal Institution Faraday zauważył, że jeśli w pobliżu będącego częścią obwodu zamkniętego przewodu elektrycznego, przez który płynie prąd, umieści magnes, drut się porusza. Krótko mówiąc, mamy tu zasadę działania silnika elektrycznego. Z kolei kiedy Faraday poruszał magnesem w pobliżu przewodu, w przewodzie płynął prąd. W taki sposób działają generatory elektryczności, na przykład turbiny w elektrowni czy staroświeckie dynamo w rowerach. Dzięki odkryciu metody wytwarzania elektryczności na żądanie w większości rejonów globu pojawiły się światło i energia elektryczna. Poza tym odkrycie stanowiło dobrą wiadomość dla węgorzy elektrycznych, które przestały być cennym źródłem elektryczności i mogły odtąd spokojnie przemykać w mrocznych wodach południowoamerykańskich rzek.

A zatem jeśli umieścimy magnes w pobliżu przewodu, w którym płynie prąd elektryczny, przewód się poruszy. Ale skąd wziąć magnesy? Współcześnie to dość łatwe (można nawet kupić *on-line* magnes na lodówkę

z podobizną Einsteina), lecz w czasach starożytnych trzeba było się udać do Grecji. A to dlatego że właśnie tam, pod palmami, wśród lasów i na plażach miasta Magnezja^[11], na wschodzie kraju, kryły się czarne skały złożone z tlenku żelaza. Jak odkryli starożytni Grecy, te skały – magnetyty – potrafią przyciągać kawałki żelaza albo inne naturalnie namagnesowane minerały (a ponieważ te skały pochodziły z rejonu Magnezji, nazwano je magnesami). W dodatku, jeśli zawiesimy kawałek takiego namagnesowanego magnetytu na nitce, magnes będzie orientował się wzdłuż linii północ – południe. To spostrzeżenie doprowadziło do wynalezienia kompasu, którym chińscy żeglarze posługiwali się już w XII wieku – to rzecz na morzu niezbędna, jeśli zeglujesz z dala od brzegów, a na niebie nie widać gwiazd, które mogłyby wskazać ci kierunek.

Jednak dopiero w XVI wieku angielski uczyony William Gilbert (1544–1603) uświadomił sobie, że igła kompasu ustawia się wzdłuż linii północ – południe, ponieważ sama Ziemia jest wielkim magnesem. Ta radykalna wówczas koncepcja stanowiła główny temat jego epokowego dzieła *De Magnete*, które zapoczątkowało badania nad magnetyzmem. Gilbert był tak mocno przekonany o wartości swoich pomysłów, że wysupłał z własnej sakiewki 5 tysięcy funtów – ogromną sumę w tamtych czasach – aby udowodnić je eksperymentalnie, choć nie miał pojęcia, dlaczego Ziemia zachowuje się jak gigantyczny magnes.

Większość z nas nie potrafi wyczuwać pola magnetycznego (więcej na ten temat dowiemy się później), ale możemy je zobaczyć, jeśli przykryjemy magnes kartką papieru i posypiemy opiłkami żelaza. Namagnesowane kawałki metalu szybko ruszą do akcji i ułożą się wzdłuż linii pola magnetycznego. Dla magnesu o kształcie prostokąta rezultat będzie przypominał obraz podłużnej sztabki na każdym z końców ozdobionej fryzurą osobnika, w którego strzelił piorun – to bieguny magnesu: północny

i południowy – z włosami z żelaznych opiłków układających się wzdłuż boków i łączących się ze strzechą na obu biegunach. Zwykle przedstawiamy te linie jako biegnące od północnego do południowego bieguna magnesu.

Z Ziemią jest podobnie. Linie pola magnetycznego płyną z południowej półkuli w stronę półkuli północnej. To, co nazywamy biegunem północnym Ziemi, jest w istocie jej biegunem magnetycznym południowym. Dlatego biegun północny magnesu o kształcie prostokąta wskazuje w stronę magnetycznego bieguna południowego; podobnie jak w przypadku ładunku elektrycznego przeciwieństwa się przyciągają. Na równiku linie tego pola, tworzące łuk między biegunami, biegną równoległe do powierzchni Ziemi. Umysły ściśle nazywają to zerowym kątem inklinacji. Uczni o umyśle mniej ścisłym – zwani geografami – mówią o kącie nachylenia magnetycznego. W miarę oddalania się od równika ten kąt (niezależnie od swojej nazwy) rośnie. Na biegunach linie pola magnetycznego przecinają powierzchnię Ziemi pod kątem inklinacji równym 90 stopni. Jak zauważył Gilbert w *De Magnete*, gdybyśmy umieli wyczuwać kąt inklinacji, mielibyśmy wyobrażenie o swojej szerokości geograficznej – odległości, jaka dzieli nas od równika, w stronę północy lub południa.

Gilbert nie wiedział, jak powstaje pole magnetyczne Ziemi, ale my wiemy. Chodzi o zawarte w jej jądrze żelazo. Wewnętrzne jądro Ziemi, które jest ciałem stałym i ma temperaturę 5700 stopni C, ogrzewa płynne związki żelaza w zewnętrznej warstwie jądra i nieustannie krążą one na zasadzie prądów konwekcyjnych (podobnie jak ciepła woda w wannie z rozdziału 1). A kiedy tak krążą, pod wpływem ruchu obrotowego Ziemi powstaje wirowa cyrkulacja tych prądów. Ta wirująca kula roztopionego żelaza jest uporządkowana wzdłuż osi północ – południe. Nikt dokładnie nie wie, jak działa to geodynamo, ale poruszający się metal generuje prąd elektryczny, który wytwarza pole magnetyczne.

Niemniej warto zauważyć, że to pole jest dość słabe, chociaż Ziemia jest tak wielka. W miejscu, gdzie jest najsłabsze, nad Ameryką Południową, ma zaledwie 0,000 025 tesli – jednostka nazwana na cześć amerykańskiego inżyniera elektryka, serbskiego pochodzenia, Nikoli Tesli (1856–1943). Tesla po raz pierwszy zainteresował się nauką, gdy w dzieciństwie zauważył iskry, które powstawały, gdy głaskał swojego ulubionego kota o imieniu Mačak. Nawet tam gdzie to pole jest najsilniejsze, na biegunach, magnetyczne pole Ziemi jest zaledwie 3 razy mocniejsze – wynosi 0,000 065 tesli. Zwykły magnes na lodówkę z podobizną Einsteina, który kupiliście *on-line*, ma pole ponad 1000 razy silniejsze (0,1 tesli) i dlatego wasz Albert trzyma się mocno na jej drzwiach, zamiast odlecieć w stronę najbliższego bieguna magnetycznego. Urządzenia do badań rezonansem magnetycznym (MRI), używane w szpitalach do wykrywania raka mózgu, guzów i innych chorób, są wyposażone w magnesy o imponującej sile 1,5 tesli. Osoby obsługujące te aparaty muszą bardzo uważać, aby wszystkie dające się namagnesować przedmioty znalazły się z dala od pomieszczenia, w którym przeprowadza się badanie, ponieważ w innym wypadku mogłyby błyskawicznie polecieć w stronę skanera, zabijając po drodze pacjenta.

Zważywszy na to, że pole magnetyczne Ziemi jest tak słabe, można by przypuszczać, że zwierzęta nie mają z niego wielkiego pożytku. Tak jednak nie jest, zwłaszcza jeśli jesteś żółwiem morskim.

Wyleźć ze skorupy

Gdzieś w początkach XX wieku, zapewne około 1915 roku, grupa rybaków z Kajmanów wybrała się na połów zielonych żółwi morskich u północnych wybrzeży Nikaragui. Mężczyźni, jak to było w zwyczaju, umieszczali swoje

inicjały na skorupach złapanych gadów i ładowali je do łódki zmierzającej w stronę Key West w USA. Niestety, u wybrzeży Florida Keys trafili na potężny sztorm: łódka wywróciła się do góry dnem i żółwie uciekły. Kilka miesięcy później ci sami rybacy ponownie znaleźli się u wybrzeży Nikaragui i ze zdumieniem zobaczyli swoje inicjały na skorupach dwu żółwi złapanych w sieci; zbiegłe żółwie pracowicie przyplłynęły z Florydy – pokonawszy co najmniej 1150 kilometrów – w te same rejony żerowania, w których je wcześniej schwytano.

Kapitan poławiaczy żółwi opowiedział tę zachwycającą historię Archiemu Carrowi (1909–1987), jednemu z pionierów badań nad żółwiami morskimi z Uniwersytetu Florydy. Carr szczegółowo opisał ją w swojej książce z 1956 roku *The Windward Road. Adventures of a Naturalist on Remote Caribbean Shores*, która przyczyniła się do powstania Braterstwa Zielonego Żółwia, Brotherhood of the Green Turtle. Dziś organizacja nosi mniej romantyczną, ale bardziej genderowo poprawną nazwę: Towarzystwo Ochrony Żółwia Morskiego, Sea Turtle Conservancy.

„Zanim Archie Carr rozpoczął swoje badania, rybacy w wielu rejonach świata wiedzieli, że żółwie migrują, pokonując ogromne odległości, ale jakoś umykało to uwadze uczonych” – mówi Ken Lohmann z Uniwersytetu Karoliny Północnej, w USA, który rozwikłał wiele zagadek dotyczących nawigacji żółwi. Potrzeba było starannych badań Carra i wielu innych uczonych, którzy obrączkowali i ponownie chwyтали żółwie, by potwierdzić, że te gady rzeczywiście pokonują podczas swoich migracji ogromne odległości i często co roku wracają w te same rejony, żeby składać jaja.

W jaki sposób żółwie odnajdują miejsce, w którym przyszły na świat? Carr i jego koledzy wysunęli kilka hipotez odwołujących się do różnych zjawisk z zakresu fizyki. Aby znaleźć drogę, żółwie mogą na przykład „spytać Wszechświata” i szukać pomocy u Słońca i gwiazd. Albo mogą

wykorzystywać zjawisko polaryzacji światła (zob. rozdział 6). Wiele z tych koncepcji ma jednak słabe punkty. Przede wszystkim żółwie pływają pod wodą, a więc nie widzą zbyt dobrze gwiazd na nocnym niebie. Nawet gdyby potrafiły je dostrzec, w wielu rejonach świata regularna obserwacja gwiazd jest bardzo utrudniona z powodu silnego zachmurzenia. W dodatku żółwie migrujące na półkuli południowej nie mogłyby się uciekać do pomocy Gwiazdy Polarnej, która na północnym niebie pozostaje zawsze w niemal tym samym miejscu. „Nawet gdyby żółwie miały świetny wzrok i mogły dostrzegać układy gwiazd, nadal nie wiedziałyby, w którym kierunku jest prawdziwa północ” – wyjaśnia Lohmann. Z kierowania się położeniem Słońca żółw nie ma wiele pożytku, kiedy jest ciemno albo kiedy płynie w głębi oceanu, gdzie nie dociera światło. Uczni mieli przeczucie, że żółwie uciekają się do innej metody. Jednak mimo że podejrzewano to od lat, dopiero na początku lat dziewięćdziesiątych XX wieku Lohmann udowodnił, że tak jest naprawdę.

Czego nauczył nas żółw

Zanim Lohmann rozpoczął badania nad żółwiami, wcześniej zajmował się tym, w jaki sposób kierunek odnajdują langusty i ślimaki morskie. Jego prace związane z żółwiami w zamyśle miały stanowić jedynie krótkotrwały projekt, jednak mimo upływu 25 lat nadal jest mocno zaangażowany w te badania. Bez wątplenia to człowiek, który lubi to, co robi. „Praca z żółwiami daje mi wielką frajdę – opowiada. – To charyzmatyczne zwierzęta. Małe żółwie, które ledwo się wykluły, są słodkie. Mają wielkie oczy i oczywiście bardzo dobrze się składa, że nie gryzą, zasadniczo są całkiem bezbronne”. Ale żółwie morskie nie zostają małe na zawsze: dorosła samica, składająca jaja,

może mieć ponad 1,20 metra długości i ważyć 110 kilogramów. „Są duże i mają trochę prehistoryczny wygląd. Masz wrażenie, jakbyś pracował z dinozaurami” – dodaje Lohmann.

Lohmann dokonał swoich epokowych odkryć, badając żółwie z gatunku karetta (*Caretta caretta*), które swoją angielską nazwę *loggerheads* otrzymały z powodu wielkiej głowy. Zwykle ten gatunek żółwi ma czerwonawobrązową skorupę zbudowaną z twardych płytek zwanych tarczkami. Ich skóra na pysku i górnej stronie płetw jest usiana brązowymi i żółtymi plamkami, podczas gdy podbrzusze jest bladożółte. Jednym z głównych obszarów wylęgania się tych zwierząt są plaże na wschodnim wybrzeżu Florydy, ponad 1000 kilometrów na południe od uniwersytetu, na którym pracuje Lohmann. Według jego szacunków w sezonie lęgowym na plaży o długości 40 kilometrów jest około 17 tysięcy gniazd żółwi, a w każdym z tych gniazd znajduje się 100 albo więcej jaj. Jednak wiele z tych jaj pada łupem szopów, lisów oraz krabów z gatunku tułacz hawajski (*Ocypode ceratophthalma*) i Lohmann ma rację, kiedy mówi, że świeżo wyklute żółwie, którym uda się przeżyć, są bezbronne. Mają zaledwie 5 centymetrów długości i muszą jakoś w drodze do morza uniknąć szponów morskich ptaków, gdy starają się nocą pełzać w stronę wody, odpychając się od piasku małutkimi płetwami jak wiosłami. Ale nawet jeśli dotrą do oceanu, wcale nie są bezpieczne – czekają na nie liczne ryby, które chętnie posilą się żółwim oseskiem. Zaledwie 1 na 4 tysiące świeżo wyklutych żółwi dożywa dorosłości.

„Najgorszym miejscem dla małego żółwia są przejrzyste, płytkie wody ponad rafą koralową, w pobliżu lądu: żyje tam mnóstwo drapieżnych ryb wypatrujących małych żółwi oraz mnóstwo morskich ptaków atakujących z góry” – mówi Lohmann. Małe żółwie nie mają jak się skryć. Są zbyt lekkie, aby zanurkować głębiej niż metr poniżej powierzchni morza, więc nie mogą

umknąć ptakom, a jednocześnie pływają o wiele za wolno, aby uciec przed rybami. Mają więc niewielkie szanse na przeżycie i żeby się uratować z tej masakry, świeżo wyklute żółwie co sił pędzą na oślep w stronę wody, po czym jak szalone starają się wypłynąć na pełne morze. Kiedy już znajdą się z dala od lądu, będą bezpieczne, wolne od zagrożenia ze strony ptaków i ryb, większość z nich bowiem żyje w odległości nie większej niż 50 kilometrów od brzegu.

Dla żółwi z gatunku kareta, które urodziły się na wschodnich wybrzeżach Florydy, idealnym miejscem na spędzenie młodości są ciepłe wody Atlantyku, w obrębie systemu prądów opływających Morze Sargassowe. Aby się tam dostać, małe żółwie z Florydy zmierzają na wschód, gdzie porywa je nurt Gofsztrumu (Prądu Zatokowego) i unosi na północ, wzdłuż południowo-wschodnich wybrzeży USA, a następnie w stronę wybrzeży Wielkiej Brytanii. Początkowo żółwie znajdują drogę, płynąc prosto w stronę morza, naprzeciw falom zbliżającym się do lądu. Kiedy znajdą się dalej od brzegu, muszą wybrać inną metodę, jeśli chcą utrzymać się na właściwym kursie (więcej na ten temat dowiemy się później). Wpływając w nurt Prądu Zatokowego, żółwie zdają się na łaskę wielkiego systemu prądów morskich północnego Atlantyku, w którego obrębie pozostają przez pierwszych 10 lat swojego życia, przybierając na wadze dzięki zjadany bezkręgowcom, takim jak ślimaki, ukwiały, rozgwiazdy i meduzy. Nie mają tam zbyt wielu wrogów, ptaków, które mogłyby je zaatakować, ani drapieżnych ryb, a poza tym zawsze mogą się skryć w morskich wodorostach unoszących się na falach.

Podczas tych wielkich wakacji wiele dorastających żółwi okrąży Atlantyk, pokonując trasę długości 15 tysięcy kilometrów. „Najpierw płyną i dryfują wokół Morza Sargassowego, docierają do wybrzeży Hiszpanii i Portugalii, żeglują dalej na południe, wzdłuż północnych wybrzeży Afryki,

by wreszcie południową trasą wrócić do Ameryki Północnej – wyjaśnia Lohmann. – W tym czasie mają już dobrze ponad pół metra długości i mogą bezpiecznie wrócić na płytsze wody, ponieważ niewiele drapieżników może je teraz zaatakować i zjeść”. Jedynie duży rekin ma dość ostre zęby, żeby zapolować na młodocianego albo dorosłego żółwia. Po tej transatlantyckiej wyprawie dobrze rozwinięty żółwi nastolatek wyrusza w rejony młodzieńczego żerowania u wybrzeży Ameryki Północnej, a czasem dociera na południe aż do Nikaragui.

Żółwie nie mogą jednak podczas swojej podróży dookoła Atlantyku tak po prostu płynąć z prądem. Muszą się pilnować, by nie stracić kontaktu z unoszącym je nurtem systemu prądów. Jeśli znajdą się za daleko na północy, mogą zamarznąć w chłodnych wodach Arktyki. Jeśli popłyną za daleko na południe, zostaną porwane przez prądy południowej półkuli i wylądują nie wiadomo gdzie. Problem polega na tym, że te prądy z roku na rok zmieniają swój przebieg. „Najszybszy sposób na to, żeby pokonać ocean, to trzymać się dokładnie w środku szerokiego nurtu Gólfstromu, ale to niełatwe, ponieważ żółw nie ma sposobu na to, aby się zorientować, gdzie ten środek w danym roku się znajduje – mówi Lohmann. – Przypuszczalnie za sprawą czystego szczęścia niektóre z nich lądują blisko centrum i są unoszone przez Atlantyk bardzo szybko, a inne zostają zepchnięte na Morze Sargassowe albo nieco bardziej na północ od systemu prądów i muszą płynąć z powrotem w stronę głównego nurtu”. Zdaniem Lohmanna nie ma dwu żółwi, które przepłynęłyby dokładnie tą samą trasą, co wyjaśnia, dlaczego jednym z nich zajmuje to 5 lat, a inne potrzebują około 10 lat, guzdrząc się po drodze. Skąd żółwie wiedzą, dokąd płynąć? Przecież nie mają żadnego kompasu... A może mają?

Ryszard żelazne serce?

Aby się dowiedzieć, czy żółwie potrafią wykrywać słabe pole magnetyczne Ziemi, Lohmann zbudował okrągłe akwarium o średnicy 2,1 metra, otoczone pętlami przewodów. Podłączając te przewody do prądu elektrycznego, mógł następnie odtworzyć pole magnetyczne o parametrach charakterystycznych dla dowolnego miejsca na kuli ziemskiej. „Wszystko, co mieliśmy do zrobienia, to wziąć małe, świeżo wyklute żółwie, które zaczynały migrować, i włożyć je do wody, ubrawszy je w płócienną uprząż, zasadniczo coś w rodzaju małego kostiumu kąpielowego – opowiada. – Jeśli wypuści się je do zbiornika z wodą, będą płynąć nieustannie”. Na zdjęciach ilustrujących artykuły Lohmanna poświęcone jego badaniom widać małego żółwia ubranego w swego rodzaju żółtozieloną kamizelkę przypominającą odblaskową koszulkę kolarską bez rękawów. Ostatnio jego zespół ubiera małe żółwie w kostiumy kąpielowe o barwie błękitu zwanego błękitem Karoliny – kolor ten to jedna z barw uniwersytetu Karoliny Północnej w Chapel Hill.

Kiedy Lohmann odtworzył w laboratorium pole magnetyczne istniejące na wschodnim wybrzeżu Florydy, żółwie płynęły na wschód, czyli w kierunku, jaki zapewniłby im porwanie przez wody Prądu Zatokowego, gdyby znalazły się na pełnym morzu, a nie w wielkiej sztucznej kałuży. Kiedy badacz zmienił zwrot linii pola magnetycznego otaczającego żółwie, większość z nich zawróciła i popłynęła w przeciwną stronę. „To był pierwszy dowód na to, że żółwie potrafią wykrywać pole magnetyczne” – wspomina.

W odróżnieniu od Słońca, gwiazd czy światła, wykorzystywanych w innych formach nawigacji, ziemskie pole magnetyczne jest obecne zarówno nocą, jak dniem mniej więcej we wszystkich punktach na Ziemi (choć skały magnetyczne mogą zakłócać sytuację). Nawigacja z użyciem

pole magnetyczne działa także na dnie rowów oceanicznych, gdzie w ogóle nie dociera światło, więc zwierzęta nie mogą dostrzec nieba, oraz wysoko w atmosferze, gdzie mogą wznieść się niektóre ptaki. W dodatku pole to ma określoną wartość niezależnie od pogody czy pory roku, choć zmienia się w miarę upływu lat – to zjawisko, jak się dowiemy później, pomogło Lohmannowi dowiedzieć się nieco więcej na temat sposobu nawigacji żółwi.

„Młode żółwie dziedziczą zbiór instrukcji, które mówią im, co mają zrobić, kiedy na otwartym oceanie napotkają pole magnetyczne o określonej wartości” – mówi Lohmann. Na przykład niedaleko północnych wybrzeży Portugalii to pole ma charakterystykę, która powoduje, że żółwie płyną w kierunku Afryki. „Możesz wziąć żółwie, które nigdy wcześniej nie były w oceanie, i w laboratorium wystawić je na działanie tego pola magnetycznego, a one zareagują i zaczną płynąć na południe” – wyjaśnia. U wybrzeży Afryki z kolei inne pole nakazuje żółwiom płynąć z powrotem na zachód, w stronę kontynentu ich narodzin.

Lohmann jest przekonany, że żółwie wykorzystują pole magnetyczne Ziemi na dwa sposoby. „Najprostszy polega na używaniu go jako kompasu, mniej więcej w taki sam sposób, jak my to robimy, posługując się kompasem trzymanym w dłoni – mówi. – Małe żółwie z pewnością to właśnie robią: potrafią odróżnić kierunek pola i określić, czy wędrują na przykład na północ czy na południe”. Ale sam kompas nie wystarczy. Zanim żółw ustali, w którym kierunku powinien płynąć, musi wiedzieć, gdzie jest. Na szczęście Ziemia oferuje mu nie tylko kompas, lecz także mapę. Lohmann wykazał, że żółwie wykrywają nie tylko kąt magnetycznej inklinacji pola, zmieniający się wraz z szerokością geograficzną, ale też siłę tego pola, która również podlega zmianom w skali globu. Wykrywając te dwie cechy pola magnetycznego, żółwie mogą posługiwać się polem magnetycznym Ziemi jako swego rodzaju

magnetyczną mapą – stanowi ona biologiczny odpowiednik systemu GPS (*Global Positioning System*), ale opartego na zjawisku magnetyzmu.

Podobnie jak mapa konturowa powierzchni Ziemi pokazuje linie łączące punkty o tej samej wysokości powyżej poziomu morza, mapa magnetyczna obejmuje linie łączące punkty o tym samym kącie inklinacji magnetycznej, znane jako izokliny (ang. *isoclinics*, ale nie ma to nic wspólnego z klinikami leczącymi pacjentów), oraz linie łączące punkty o tej samej sile pola magnetycznego, czyli izodyny. W większości miejsc na Ziemi izodyny i izokliny nie są równoległe, więc każdy region oceanu ma nieco inną charakterystykę pola magnetycznego – „magnetyczny podpis” stanowiący unikalne połączenie inklinacji i natężenia pola.

Świeżo wyklute żółwie i dorosłe osobniki używają magnetycznych map w nieco innych celach. Młodzież wykorzystuje magnetyczne podpisy różnych obszarów geograficznych jako serię znaków nawigacyjnych, z których każdy wskazuje żółwiowi, że obrał dobry kurs albo że powinien go zmienić. Dla nich najważniejsza jest podróż. Małe żółwie muszą opłynąć Atlantyk, trasą wiodącą po okręgu, i podczas tej podróży mają czas na to, aby urosnąć, zanim popłyną w stronę rodzinnych wybrzeży Ameryki. Nie myślą o dotarciu w określone miejsce: dla nich liczy się tylko utrzymanie się w obrębie systemu prądów. Dopiero po osiągnięciu dorosłości żółwie zaczynają myśleć o bardziej konkretnym celu i pragną wrócić dokładnie na tę samą plażę, na której przyszły na świat.

**Wszędzie dobrze, ale w domu
najlepiej**

Jakby nie dość było tej wieloletniej podróży, po pokonaniu 15 tysięcy kilometrów żółwie robią coś, co jest równie nieprawdopodobne, choć tym razem ze względu na swoją precyzję, a nie wchodzące w grę odległości. „W końcu, kiedy są już w pełni dorosłe i zdolne do rozmnażania się, czyli w wieku około lat dwudziestu, wędrują z powrotem w te same rejony wybrzeża, gdzie zaczęła się ich podróż” – mówi Lohmann. Dorosłe samice, między majem a sierpniem, co 2–3 lata, w zależności od tego, jak wiele pożywienia znajdują po drodze, płyną na północ, w stronę plaży, na której się wykluły. Tylnymi płetwami wydłubują w piasku dziurę, po czym składają w niej około 100 jaj i zasypują, a następnie powtarzają ten sam proces 15 dni później. Samce być może każdego roku podróżują, aby połączyć się z samicami, ale trudno coś o nich powiedzieć, ponieważ nie wychodzą na ląd.

Dlaczego jednak żółwie opływają cały basen Atlantyku, po czym wracają do miejsca swoich narodzin albo w jego pobliżu? Według jednej z teorii żółwica nie potrafi na pierwszy rzut swojego gadziego oka ocenić, czy warunki panujące na jakiejś plaży są odpowiednie do wydania na świat młodych, postanawia więc, całkiem rozsądnie, wrócić po prostu tam, gdzie się urodziła. W końcu sama jest żywym dowodem na to, że wybrane miejsce przynajmniej raz spełniło swoje zadanie, dlaczego więc miałyby narażać się na ryzyko, wybierając nieznaną plażę, która może okazać się zbyt stroma, skalista, błotnista, pełna drapieżników albo może na niej panować temperatura nieodpowiednia do wykluwania się z jaj? Nie wiemy jeszcze, jak dokładne są żółwie w swoich powrotach na to samo miejsce. „Żółwie składające jaja na południu Florydy genetycznie różnią się od żółwi, które wykluwają się na północy Florydy, i przypuszczalnie są w tych sprawach jeszcze bardziej precyzyjne” – mówi Lohmann.

W jaki sposób zatem żółwie odnajdują miejsce swojego urodzenia, płynąc z rejonów żerowania położonych setki kilometrów dalej, u wybrzeży

Ameryki Północnej albo Środkowej? Jeśli jesteś małym, świeżo wyklutym żółwiem, który opływa Atlantyck, wieża o tym, w jakim kierunku masz płynąć, gdy wyczuwasz magnetyczny podpis określonego rejonu oceanu, jest całkowicie wystarczająca. Dryfujesz i płyniesz wzdłuż szlaku swojej migracji, ale dopóki nie skończyłeś podróży, nie musisz trafić w żadne konkretne miejsce. A kiedy już ją skończyłeś, szukasz po prostu dobrego miejsca do żerowania na jednym z długich wybrzeży. Jednak dorosła samica wracająca na plażę, na której się urodziła, musi dotrzeć we właściwe miejsce w odpowiednim czasie. Musi więc wydoskonalić swoje narzędzia nawigacyjne.

Aby odkryć, w jaki sposób dorosłe żółwie wracają do domu, Lohmann wykorzystał zachodzące z roku na rok zmiany pola magnetycznego Ziemi, znane jako geomagnetyczny trend sekularny. Można sobie wyobrazić, że Ziemia kryje w swoim wnętrzu wielki magnes sztabkowy, którego bieguny są odchylone od jej osi obrotu o mniej więcej 10 stopni. Ta różnica ułożenia biegunów wyjaśnia, dlaczego magnetyczny biegun północny – miejsce, w którym inklinacja magnetycznego pola naszej planety wynosi 90 stopni – nie pokrywa się z geograficznym biegunem północnym. Magnetyczny biegun północny zmienia swoje położenie pod wpływem ruchu płynnych stopów metali znajdujących się w jądrze Ziemi: w ciągu minionych 180 lat magnetyczny biegun północny przesuwał się w kierunku północno-zachodnim. Jego położenie zmienia się też z różną prędkością. Na początku XX wieku biegun przesuwał się około 10 kilometrów rocznie, na początku XXI wieku ta zmiana następowała 4 razy szybciej. Co jakiś czas – po raz ostatni zdarzyło się to 78 tysięcy lat temu – pole całkowicie zmienia swoje upodobania i biegun północny rusza na południe. Dla nas bardziej interesujące są jednak zmiany świeższej daty.

W ciągu minionych 20 lat na wschodnim wybrzeżu Florydy izolinie –

linie łączące punkty pola o takim samym natężeniu albo takiej samej inklinacji – stopniowo przesunęły się na północ. W tym regionie zarówno izokliny, jak i izodyny leżą z grubsza w kierunku wschód – zachód, ponieważ pole magnetyczne Ziemi staje się silniejsze i kąt jego inklinacji rośnie, w miarę jak posuwamy się wzdłuż wybrzeża na północ. Izolinie nie przesunęły się ku północy w jednolity sposób: w niektórych miejscach przesunęły się bardziej niż w innych. Jeśli mamy fragment wybrzeża, w którym izolinia położona na południe od niego przesunęła się znacznie na północ, izolinia położona na północ od niego zmieniła zaś swoje położenie bardzo nieznacznie, wtedy fragment plaży położony między tymi izoliniami się skurczy. A zatem magnetyczne sygnatury, które przypadają na obszar między tymi izoliniami, będą ściśnięte do mniejszego fragmentu plaży. Z drugiej strony, jeśli izolinia położona na północ od jakiegoś punktu przesunęła się bardzo daleko, ale izolinia położona na południe od niego niemal nie drgnęła, obszar między tymi izoliniami będzie większy i magnetyczny podpis rejonu przez nie wyznaczanego obejmie większy fragment wybrzeża.

Szaleńczo wspaniałe

Kiedy Lohmann i jego koledzy przeanalizowali miejsca występowania gniazd żółwi wzdłuż wschodniego wybrzeża Florydy w latach 1993–2011, odkryli, że w rejonach, gdzie izokliny (linie o jednakowej inklinacji pola magnetycznego) przybliżyły się do siebie, gniazda żółwi znajdowały się w bliższym sąsiedztwie. Natomiast w rejonach, gdzie izokliny się od siebie oddaliły, odległość między gniazdami rosła. Tymczasem izodyny (linie reprezentujące taką samą siłę pola magnetycznego) na Florydzie jedynie

oddaliły się od siebie, przy czym gniazda były usytuowane tym bliżej sąsiednich, im bardziej oddaliły się izodyny. Według Lohmanna to dowodzi, że żółwie lokalizują plaże, na których się urodziły, za pomocą unikalnej sygnatury magnetycznej.

Żółwie po wykluciu się z jaj, zanim opuszczą rodzinną plażę, zapamiętują na zasadzie imprintingu siłę pola magnetycznego oraz jego inklinację, podobnie jak kurczęta zapamiętują pierwsze zwierzę, jakie zobaczą, jako swoją matkę. „Małe żółwie uczą się magnetycznego podpisu swojej rodzinnej plaży i zachowują tę informację, po czym wykorzystują ją jako dorosłe osobniki, aby przyплыć na to samo miejsce wiele lat później” – wyjaśnia Lohmann. Kiedy żółwie wracają na brzeg po 20 latach, część z nich trafia na prawdziwą złotą żyłę na rynku nieruchomości, gdy fragment plaży, który postrzegają jako dom rodzinny, powiększył się pod wpływem zmian pola magnetycznego Ziemi i jest na nim mnóstwo miejsca na nowe gniazda. Inne mają mniej szczęścia. Ich magnetyczna ojczyzna skurczyła się i muszą składać jaja niedaleko jedne od drugich. A zatem: magnetyczny imprinting, wdrukowanie przez świeżo wyklute z jaja żółwie danych miejsca urodzenia. C.b.d.o. Jeszcze raz Lohmann rozwiązał zagadkę, która intrygowała badaczy żółwi od lat.

Wszystko wygląda świetnie, jeśli znamy magnetyczną sygnaturę miejsca, w które pragniemy trafić, ale jak je odnaleźć? W pobliżu wybrzeży Florydy przebieg izoklin i izodyn pokrywa się z grubsza z szerokością geograficzną, więc trudno byłoby żółwiowi odnaleźć właściwą długość geograficzną (położenie na osi wschód – zachód). Ponieważ jednak to wybrzeże, podobnie jak wiele innych wybrzeży morskich idealnie nadających się do składania jaj przez żółwie, jak choćby zachodnie wybrzeże Afryki, biegnie z grubsza z północy na południe, wszystko jest w porządku. Kiedy żółwica odnalazła swoje wybrzeże, może płynąć wzdłuż brzegu, kierując się na północ albo na

południe, zgodnie ze wskazówkami, jakie dają jej kąt inklinacji pola magnetycznego oraz / lub jego siła, w tej swoistej zabawie w ciepło-zimno w poszukiwaniu dokładnego magnetycznego odpowiednika miejsca, w którym przyszła na świat.

Lohmann na razie nie rozwiązał zagadki, w jaki sposób żółwie odczytują wartości natężenia pola magnetycznego, jego siłę oraz inklinację. Wciąż pracuje nad tym. W tym świetle umiejętność wyczuwania pola magnetycznego, podobnie jak umiejętność wykrywania pól elektrycznych przez pszczoły, staje się czymś niezwykłym. Biologowie wiedzą, lepiej lub gorzej, w jaki sposób zwierzęta widzą, słyszą, odczuwają smaki, zapachy i wrażenia dotykowe. Jedna z koncepcji powiada, że żółwie morskie mają w mózgu, albo powiązane z układem nerwowym, małe kryształki magnetytu, tlenku żelaza. Ponieważ magnetyt układa się zgodnie z polem magnetycznym Ziemi, może naciskać na leżące obok receptory, wysyłając do mózgu sygnał mówiący, w którą stronę jest północ. Hipoteza ma sens, ale jest także haczyk – chociaż podczas badań z lat dziewięćdziesiątych XX wieku znaleziono w ciele żółwi morskich materiał magnetyczny, nadal nie ma wystarczającego dowodu. Lohmann poluje na kryształki magnetytu w ciele żółwi, posługując się rezonansem elektromagnetycznym, jednak na razie nic nie znalazł. „Jeśli one istnieją, są bardzo małe – wyjaśnia. – Jeśli masz niewielką cząstkę wytwarzającą mikroskopijne pole magnetyczne, może być za mała, żeby dało się ją wykryć rezonansem magnetycznym”.

Inny pomysł polega na przypuszczeniu, że żółwie w swojej nawigacji wyczuwają pola magnetyczne dzięki cząsteczkom pigmentu zwanego kryptochromem. Takie cząsteczki, wrażliwe na światło niebieskie, występują w siatkówce (z tyłu gałek ocznych) wielu zwierząt, w tym europejskiego rudzika, żółwia morskiego, a nawet u ludzi. Pole magnetyczne Ziemi może wpływać na reakcje chemiczne z udziałem tych pigmentów, co oznaczałoby,

że żółwie widzą mniej więcej to, co my widzimy, ale oprócz tego widziałyby także wzory rozkładu barw, uzależnione od tego, w którym kierunku zwierzę się zwraca. „Ptak zwrócony w stronę magnetycznej północy mógłby widzieć wielką kulę światła nałożoną na jego pole wrażeń wzrokowych, a kiedy zwraca się ku wschodowi, ta kula mogłaby się kurczyć albo dzielić na dwie części” – mówi Lohmann.

Żelazny człowiek?

A co z nami? Czy też wyczuwamy pola magnetyczne? W latach osiemdziesiątych XX wieku Robin Baker z uniwersytetu w Manchesterze, w Wielkiej Brytanii, zawiązywał oczy swoim studentom i wywoził ich na wieś. Kiedy następnie prosił ich o wskazanie, w którym kierunku znajduje się campus, badani radzili sobie zdumiewająco dobrze, o ile Baker nie przykładał im do skroni sztabki magnezu. W rezultacie Baker napisał książkę *Human Navigation and the Sixth Sense*, ale niemal nikomu nie udało się powtórzyć jego wyników. „Przez jakieś 10 lat, od 1980 do 1990 roku, pojawiały się kolejne artykuły na ten temat, w końcu wszyscy poczuli się zmęczeni tym sporem – mówi Lohmann. – O ile mi wiadomo, od tamtej pory nie pojawiło się nic nowego”.

Lohmann sądzi, że na razie nie ma żadnych przekonujących dowodów na to, że ludzie są obdarzeni zmysłem magnetycznym. „Niemniej Baker rzeczywiście wysunął interesującą tezę, że w naszym współczesnym życiu codziennym pole magnetyczne jest zwykle poważnie zaburzone – dodaje. – Mieszkamy w domach, które często mają w sobie stalowe pręty, wszystkie urządzenia elektryczne wytwarzają pole elektromagnetyczne. Możliwe, że jesteśmy obdarzeni zmysłem magnetycznym, ale ponieważ nie uczymy się

posługiwać nim od dziecka, być może przestaliśmy sobie zdawać sprawę z jego istnienia”.

Niewykluczone, że zaburzenia pola magnetycznego szkodzą także żółwiom morskim. Stalowa konstrukcja stojących przy plaży budowli, wieżowców albo hoteli może zniekształcać pole magnetyczne, podobnie jak biegnące wzdłuż brzegu linie wysokiego napięcia albo podwodne kable przesyłające prąd elektryczny z turbin wiatrowych. Nawet stalowe klatki służące do ochrony żółwich gniazd przed szopami mogą zaburzać pole magnetyczne, z którym stykają się świeżo wyklute żółwie, i w rezultacie trudniej będzie im zapamiętać drogę na tę samą plażę, kiedy dorosną.

Ludzie wpływają nie tylko na magnetyczny aspekt życia żółwi morskich. Hotele stojące przy plaży mogą zniechęcać samice do składania jaj; z kolei jasne światła tych budowli przykuwają uwagę małych żółwi, które biegną w ich stronę zamiast do oceanu: żółwicy omyłkowo biorą sztuczny blask za odbicie światła Księżyca i gwiazd w wodzie. Na dokładkę w oceanie jest mnóstwo śmieci z plastiku. Unosząca się w wodzie przezroczysta torebka z punktu widzenia żółwi wygląda jak meduza, jeden z ich ulubionych przysmaków. Ale żółw z żołądkiem pełnym niestrawnego plastiku to żółw, który umrze z głodu. To samo dotyczy baloników; pięknie wyglądają, kiedy się je wypuszcza w niebo przy okazji zbierania funduszy na różne szlachetne cele, jednak niewiele pomagają samym żółwiom. W dodatku u żółwi, jak u wielu innych gadów, liczba samców i samic, jakie wyklują się z jaj, zależy od temperatury otoczenia. W przypadku żółwi kareta przy temperaturze 28 stopni C wyklują się tylko samce; przy temperaturze 30 stopni C wśród małych żółwi będzie po połowie samic i samców; ale kiedy temperatura osiągnie 32 stopnie C, urodzą się wyłącznie samice. A to oznacza, że zmiany klimatyczne mogą doprowadzić do wymarcia samców gatunku kareta – i ostatecznie całego gatunku. W tym przypadku stojące przy plażach wysokie

hotele mogą przynajmniej w pewnym sensie okazać się pomocne, ponieważ rzucając cień na gniazda żółwi, zapewniają im niższą temperaturę.

Wiedza na temat umiejętności żółwi związanych z magnetyzmem może także okazać się przydatna w ochronie tych zwierząt. Do tej pory nikomu nie udało się namówić innych gatunków żółwi morskich, a nawet osobników tego samego gatunku, do składania jaj na plażach, na których dziś nie ma już żadnych gniazd. Najlepszym znanym przykładem są Bermudy. „W XVII wieku na tamtejszych plażach dosłownie roiło się od tysięcy zielonych żółwi morskich składających jaja – opowiada Lohmann. – Ponieważ jednak stanowiły łatwe źródło pożywienia, ludzie co roku zabijali je dla mięsa i w końcu cała populacja zginęła. Przez następnych kilkaset lat żaden zielony żółw nie złożył jaj w tym miejscu”. Przenoszenie małych osobników zielonego żółwia morskiego i jajek z Kostaryki nie spełniło pokładanych nadziei. Żółwie nie wróciły na Bermudy, aby się rozmnażać. „Nikt nie ma pojęcia dlaczego – mówi Lohmann – ale wydaje się prawdopodobne, że nie wprowadzono tych żółwi w taki sposób, by zapamiętały pole magnetyczne nowego obszaru na zasadzie imprintingu. W tym momencie to wszystko teoria. Może się jednak okazać pomocna”.

Spotkanie z mechaniką kwantową

Żółwie kareta mają wbudowany magnetyczny kompas, dzięki czemu po wielkiej podróży wokół Atlantyku wracają na rodzinną plażę. My, ludzie, na szczęście mamy coś jeszcze lepszego: satelitarne systemy nawigacyjne zainstalowane w samochodach wykorzystują sygnały wysyłane do atomowych zegarów umieszczonych na satelitach kosmicznych krążących wokół Ziemi. Nie ma szans na to, abyśmy podczas jazdy w stronę

Mottisfontu w Hampshire (zob. rozdział 4) zgubili drogę (chyba że zignorujemy głosowe instrukcje GPS-u). Jest wspaniały ciepły dzień, a my udaliśmy się na letni piknik autorów *Kudłatej nauki*. Wybrawszy zacienione miejsce na trawniku, skąd rozpościera się malowniczy widok na historyczną budowlę, rozłożyliśmy koc, wyjęliśmy kanapki z serem i otworzyliśmy wielką torbę chipsów (naprawdę mamy styl), nalaliśmy herbaty i rozpakowaliśmy tajną broń – pierożki domowej roboty; do tego bita śmietana i dżem truskawkowy. Po prostu raj.

Niestety, nie jesteśmy sami. Pojawiają się osy. Najpierw jedna. Potem druga. Potem trzecia. Latają wściekle wokół naszego koca w poszukiwaniu słodkich smakołyków. Staramy się odpędzić bestie. Na darmo. Przylatują kolejne. Jedna pełnie już po słoiku z dżemem, inna wylądowała w śmietance. Osy to prawdziwe (możecie tu wstawić własny przymiotnik) nieszczęście. Zrywamy się na nogi, wdeptując przy okazji w kanapkę, rozlewamy herbatę i zaczynamy wściekle machać rękami. Coraz więcej os brzęczy nam wokół głowy. Pora na plan B: wrzucamy wszystko z powrotem do koszyka z pokrywką i zwiewamy do samochodu.

Osy należą do najbardziej niepopularnych zwierząt na świecie. Mają niewielu wielbicieli i wielu wrogów. Ale okazuje się, że owady te (a przynajmniej niektóre z nich) są mistrzami elektryczności i ekspertami w dziedzinie mechaniki kwantowej. Zanim wyjaśnimy, w jaki sposób to się dzieje, parę słów na ich obronę. Po pierwsze, gdyby nie te stworzenia w żółto-czarne paski, pożarłyby nas mszyce i meszki. Jeśli uprawiacie swój ukochany ogródek, możecie podziękować miejscowym osobom za to, że łaskawie pożerają te owady i chronią waszą kapustę. Po drugie, wiele gatunków os to zwierzęta społeczne, które żyją w ogromnych koloniach i mają tylko jeden cel na oku: przynieść pożywienie do swojego gniazda. Atakują tylko wtedy, kiedy zostaną sprowokowane albo zobaczą jakiś nagły

ruch. Dlatego właśnie odganianie którejs z nich zrolowaną gazetą to bardzo zły pomysł. I tu porada: jeśli znajdziecie się niedaleko gniazda os, stójcie spokojnie. Robienie zamieszania tylko zachęca osy do tego, żeby wyjrzeć na zewnątrz i sprawdzić, co się dzieje. Prawdę mówiąc, osy są bardziej zainteresowane innymi, obcymi osami, które atakują ich kolonię. Jeśli coś takiego się wydarzy, mieszkanki gniazda szybko otaczają intruza, po czym rzucają się na niego, odgryzają mu skrzydła i zakłuwają żądłami na śmierć. Nie chodzi więc o was. Chodzi o nie, o tamte drugie.

Na świecie żyją dziesiątki tysięcy gatunków owadów z rodziny osowatych, natomiast nas interesuje szerszeń wschodni (*Vespa orientalis*). Ten owad, występujący w wielu regionach Azji Północno-Wschodniej, na Bliskim Wschodzie oraz w Azji Południowo-Wschodniej, jest zasadniczo jasnobrązowy, ale na odwłoku i na głowie ma po 2 żółte paski – niczym znaki ostrzegające drapieżniki, żeby trzymały się z dala. Poza tym jest naprawdę duży, ma 2 do 3 centymetrów długości. Jednak ta osa trafiła na strony *Kudłatej nauki* nie tylko dlatego, że zjada słodki nektar i wyszukuje owady, którymi się żywi, ale także dlatego, że wykorzystuje zjawiska należące do pewnej dziedziny fizyki, która powstała w wyniku badań nad elektrycznością i magnetyzmem. Mówimy teraz o mechanice kwantowej.

Kwantowa kraina czarów

W zwykłej mechanice (bez przymiotnika „kwantowa”) chodzi o duże obiekty spotykane w życiu codziennym, takie jak komar czy rawka błazen, które poznaliśmy w rozdziale 2, oraz o to, w jaki sposób się poruszają albo zmieniają pod działaniem sił. Tymczasem mechanika kwantowa opisuje świat na poziomie atomów i cząstek. A to jest dziwny świat. Teoria

mechaniki kwantowej stworzona na początku XX wieku przez najwybitniejszych fizyków, takich jak Niels Bohr, Paul Dirac, Albert Einstein, Werner Heisenberg i Erwin Schrödinger, dotyczy zjawisk leżących u podstaw działania wielu urządzeń elektronicznych – komputerów, laserów, smartfonów, by wymienić pierwsze z brzegu. Bez mechaniki kwantowej współczesne życie byłoby nic niewarte (spróbujcie przeżyć dzień bez komórki, a zobaczycie sami).

Świat kwantowy jest niezgodny z naszą intuicją. Elektron, na przykład, wiruje w wielu różnych kierunkach równocześnie. Ale jeśli spróbujecie zmierzyć, w którą stronę się obraca, odniesiecie wrażenie, że obraca się tylko w jednym kierunku. I tak jak nie można stanąć na drabinie w dowolnym jej punkcie, tylko na jednym ze szczebli, tak samo elektron nie może mieć energii o dowolnej wielkości, bo jest ograniczony do jej określonych wartości. Inna osobliwość tego świata polega na tym, że nie można w danym momencie w sposób precyzyjny zmierzyć pewnych jego fizycznych własności, takich jak położenie cząstki i jej pęd, niezależnie od tego, z jaką dokładnością będą działać urządzenia pomiarowe. Jeśli na przykład dokładnie zlokalizujemy jakiś elektron, nie będziemy mogli zupełnie nic powiedzieć o jego pędzie. Jeśli określimy jego pęd, nie będziemy mieli zielonego pojęcia, gdzie ten elektron się znajduje. Ta zasada, znana jako zasada nieoznaczoności Heisenberga, będąca jedną z podstawowych reguł mechaniki kwantowej, powołała także do życia bardzo dziwną bestię: zabawne żarty na temat fizyki. Złapali Heisenberga na przekroczeniu dozwolonej prędkości podczas jazdy samochodem. Policjant pyta go, czy wie, jak szybko jechał. „Nie – odpowiada wielki człowiek – ale przynajmniej wiem, gdzie jestem”. No dobra... może to nie jest takie śmieszne. Przyznajemy, że w przypadku dowcipów o fizykach poprzeczka jest ustawiona dość nisko. Dwa atomy wpadają na siebie. „Myślę, że straciłem

elektron” – mówi jeden. „Jesteś pewny?” – pyta drugi. „Tak, jestem pozytywny!”

Podczas gdy my nadal zmagamy się z osobliwościami mechaniki kwantowej, szerszeń wschodni już dawno załatwił tę sprawę. Wykorzystuje zasady kwantowe o wiele dłużej niż my. Aby dowiedzieć się jak i dlaczego, musimy przyjrzeć się organizacji domowego życia szerszeni. Te owady żyją w koloniach i każdą z nich rządzi królowa, która latem jest zapładniana przez jednego lub dwu samców i przez zimowe miesiące przechowuje ich nasienie. Kiedy na początku lata królowa budzi się z hibernacji, buduje gniazdo w kształcie plastra miodu, o ściankach cienkich jak papier, po czym składa w nim jaja, z których wykluwają się bezpłodne robotnice. To potomstwo posłusznie służy swojej królowej i wspólnymi siłami buduje wokół niej kolonię, dzięki czemu królowa ma miejsce na złożenie setek, a nawet tysięcy jaj. Robotnice poza tym poszukują pożywienia, pilnują gniazda i opiekują się potomstwem.

Nadchodzi późne lato, a wtedy królowa – mając na względzie swoje dziedzictwo – składa jaja, z których wyłaniają się płodne samce oraz samica. Samce wkrótce odlatują, aby sparzyć się z młodą samicą z innej kolonii. Samica staje się młodą królową, utrzymując przy życiu pszczelą dynastię. To zbiorowe osiągnięcie fascynowało uczonych już w IV wieku p.n.e., gdy grecki filozof Arystoteles zauważył, że szerszenie nie karmią się tylko nektarem. Zabijają także inne owady, po czym przeżuwają je i zamieniają w maź, którą żywią się larwy dorastające w gnieździe.

Co do szerszeni wschodnich dobra wiadomość jest taka, że te owady nie zagnieżdżą się w waszym domu. Nie znajdziecie ich także na okolicznych drzewach ani w zaroślach. Ten gatunek osowatych mieszka w rozgałęzionych podziemnych gniazdach wydrążonych przez armie robotnic, które wykopują ziemię swoimi żuwaczkami. Unosząc ją w ustach, robotnice ruszają w stronę

najbliższego wyjścia, po czym odlatują jakieś 10 metrów od domu. Po zrzuconiu ładunku w powietrzu (psotne małe robaczki) wracają z powrotem, by kopać dalej.

Większość gatunków szerszeni lata wczesnym rankiem, ograniczając czas swoich lotów, aby nie narażać się na przegrzanie i unikać potencjalnego uszkodzenia ciała pod wpływem nadmiernej dawki promieniowania ultrafioletowego, które najintensywniej występuje podczas najgorętszej pory dnia. Ale pewnego dnia 1967 roku Jacob Ishay z uniwersytetu w Tel Awiwie, w Izraelu, licząc, jak często szerszenie wschodnie wychodzą ze swojego gniazda, żeby pozbyć się wykopanej ziemi, zauważył, że te owady nie ograniczają swojej aktywności do wczesnych godzin rannych. Podobnie jak wściekłe psy i Anglicy^[12], wybierają właśnie południowy skwar i spiekotę prażącego słońca. A im więcej dociera do nich promieniowania ultrafioletowego, tym więcej ziemi wykopują i tym częściej wychodzą z gniazda. Okazało się, że te czcicielki słońca potrafią w południe być do 100 razy bardziej aktywne niż rankiem.

Ishay założył, że te szerszenie uwielbiają słońce, ponieważ w jakiś sposób wykorzystują światło słoneczne. Jednak przez wiele lat ten pomysł pozostawał jedynie spekulacją, a sam Ishay skupił uwagę na innej osobliwości szerszeni wschodnich: budując w gnieździe plastry, zaczynają zawsze od małego rdzenia, a następnie posuwają się ku dołowi. Aby zbadać dlaczego, w 1992 roku Ishay wysłał ponad 200 takich szerszeni na orbitę okołozemską na pokładzie promu kosmicznego NASA. Na promie ziemskie przyciąganie grawitacyjne jest niewielkie i Ishay pragnął się dowiedzieć, czy szerszenie będą zachowywały się w warunkach braku grawitacji inaczej niż na Ziemi. Miał nawet nadzieję, że jego badania pomogą wyjaśnić, czy astronauta źle się czują w przestrzeni kosmicznej, dlatego że brak grawitacji wprawia ich w dezorientację. Niestety, astronauta nie doczekali się

odpowiedzi, choć wiadomość jest dobra dla wszystkich wrogów os: podczas eksperymentu zawiódł system nawadniania i niemal wszystkie owady Ishaya straciły życie, zanim osiągnął jakieś znaczące rezultaty.

Myślenie powierzchniowe

Na razie dosyć jednak o szerszeniach w przestrzeni kosmicznej. Hipoteza Ishaya, że te owady wykorzystują światło słoneczne, w końcu ponownie zwróciła uwagę badaczy – choć niestety, dopiero po jego śmierci w 2009 roku. Właśnie wtedy Marian Plotkin, były student Ishaya, postanowił przyjrzeć się bliżej twardej zewnętrznej powłoce szerszenia wschodniego. Zamiast jednak posłużyć się zwykłym mikroskopem optycznym, za pomocą którego możemy oglądać detale tylko w pewnym zakresie, Plotkin wraz ze swoimi kolegami badał szerszenie, używając mikroskopu atomowego. W sercu takiego urządzenia znajduje się niewielka igła, która przesuwana się ponad powierzchnią badanego przedmiotu – trochę to przypomina odczytywanie znaków alfabetu Braille'a czubkami palców. Igła jest połączona ze sprężystą mikrodźwignią, która porusza się w zależności od wielkości sił działających między czubkiem igły a znajdującymi się poniżej atomami. Rejestrując wartości tej siły w wielu punktach powierzchni kutykuli szerszenia, Plotkin odkrył coś dziwnego.

Wcześniej wspominaliśmy, że zewnętrzny szkielet, czyli kutykula, szerszenia wschodniego składa się z dwu części: brązowej i żółtej. Plotkin odkrył, że te dwa obszary są bardzo różne. Otóż powierzchnia części brązowej, która jest zabarwiona w ten sposób, ponieważ zawiera pigmenty melaninowe, takie jakie znajdują się w naszej skórze, nie jest płaska, ale wygląda jak dach z blachy falistej albo karbowane frytki ziemniaczane.

Pagórkowatość tej powierzchni oznacza, że powłoka szerszenia z większym prawdopodobieństwem raczej chwyta światło słoneczne, niż je odbija. Poniżej zagłębień w kutykuli szerszenia znajduje się około 30 warstw zawierających pręciki o wielkości mniejszej niż 0,001 milimetra, które jeszcze skuteczniej chwytają światło. Według Plotkina dzięki tym zagłębieniom oraz warstwom znajdującym się poniżej szerszeń wschodni może w sumie zachomikować o 99 procent więcej światła, niż mógłby złapać, gdyby brązowa powierzchnia kutykuli była całkiem gładka.

Pod mikroskopem Plotkina okazało się, że powierzchnia żółtej części korpusu szerszenia azjatyckiego jest jeszcze bardziej pofalowana i znajdują się w niej połączone ze sobą owalne wypustki zaopatrzone w przynajmniej jeden mały otwór. Nie wiemy, do czego służą te wgłębienia, ale żółta część korpusu szerszenia równie skutecznie wychwytuje promienie słoneczne jak położona obok powierzchnia brązowa. Żółta barwa, jak odkrył Plotkin, pochodzi od warstwy leżącej poniżej powierzchni kutykuli, składającej się głównie z baryłkowatych granulek zawierających ksantopterynę, pigment obecny także w skrzydłach motyli i w ludzkim moczu. Ta cząsteczka jest prawdziwą mistrzynią absorbowania światła słonecznego i Plotkin zaczął się zastanawiać, czy szerszeń wschodni nie wykorzystuje jej do przetwarzania światła na elektryczność. Czyli, innymi słowy, czy to stworzenie może być żyjącym i oddychającym ogniwem słonecznym.

Aby zrozumieć, w jaki sposób cząsteczka może zamieniać światło w elektryczność, musimy wrócić do pewnej osobliwości świata kwantowego – chodzi o to, że elektrony mogą mieć tylko pewne określone poziomy energii. Jeśli przyrównamy tę energię do szczebli drabiny, elektron może siedzieć tylko na jednym szczeblu albo drugim, ale nie pomiędzy nimi. Elektron może jednak przeskoczyć z niższego szczebla na wyższy, jeśli zostanie popchnięty do tego przez foton światła, które ma dość energii, aby

pomóc tej cząstce pokonać różnicę energii dzielącą poziomy. Żeby takie przejście elektronu mogło nastąpić (choć nigdy nie jesteśmy pewni, który elektron wykonuje skok), cząsteczka ksantopteryny musiałaby absorbować światło ultrafioletowe o długości fali mniejszej niż 386 nanometrów. A jeśli wprawiamy elektrony w ruch, to znaczy, że jesteśmy na dobrej drodze do wytworzenia prądu elektrycznego.

Aby wykazać, że ksantopteryna może zamienić promienie słoneczne w elektryczność, Plotkin musiał jedynie podłączyć ten pigment do obwodu elektrycznego. Gdyby obdarzone dodatkową energią elektrony popłynęły następnie w stronę jakiejś elektrody, mielibyśmy prąd elektryczny. A gdyby ludzie dzięki tej ksantopterynie mogli wytwarzać prąd, to z całą pewnością szerszeń wschodni również. Wszystko, czego potrzebuje, to odpowiednia ilość ksantopteryny i dużo światła.

W 2010 roku Plotkin zbudował sztuczne ogniwo solarne, umieszczając warstwę ksantopteryny między dwiema szklanymi elektrodami, z których jedna była pokryta tlenkiem tytanu, półprzewodnikiem używanym także w farbach i kremach przeciwsłonecznych. Oświetlając lampą swoje urządzenie, odkrył, że mniej więcej trzy na każde tysiąc fotonów przesuwają elektron w ksantopterynie na wyższy poziom, dzięki czemu przechodzą one przez półprzewodnik do zwykłej szklanej elektrody. Zamiana 0,3 procent światła w elektryczność to nie jest żadne wielkie osiągnięcie – zasilające żarówki ogrodowe ogniwo słoneczne, którego głównym składnikiem jest silikon, zwykle zamienia około 10 procent fotonów w elektrony. Niemniej osiągnięcie Plotkina mimo to miało przełomowy charakter. „Nikt wcześniej nie przypuszczał, że można użyć ksantopteryny do zamiany światła słonecznego w elektryczność – mówi Plotkin. – Wiedzieliśmy od dziesięcioleci, że niektóre fotosyntetyzujące bakterie i algi potrafią zamieniać światło w energię chemiczną, aby czerpać stąd napęd. Teraz po raz pierwszy

pokazaliśmy, że zwierzęta także potrafią zamieniać światło w inne formy energii”.

Plotkin sądzi, że szerszeń wschodni potrafi używać także swojego brązowego pigmentu melaninowego jako ogniwa słonecznego, choć taki eksperyment trzeba będzie dopiero przeprowadzić. „Szerszenie przypuszczalnie łączy w tym procesie zamiany światła w energię własności melaniny i ksantopteryny, choć na razie nie wiemy w pełni, jak to działa” – przyznaje. Kwestia, dlaczego właściwie szerszeń wschodni ma wbudowaną taką baterię słoneczną, pozostaje zagadką. Być może prąd elektryczny daje szerszeniowi dodatkową porcję energii podczas lotu. Albo wykorzystuje on elektryczność do ochładzania się: owady nie mają gruczołów potowych i mogą się przegrzać.

Niemniej każdy, kto chciałby się tego dowiedzieć, musi zachować ostrożność. Prowadzenie eksperymentów z szerszeniami wschodnimi jest trudne i niebezpieczne: Plotkin został użądłony przez nie 4 razy. „To straszne – wspomina. – Mają naprawdę silny jad i za każdym razem dopiero po kilku dniach dochodziłem do siebie”. Co zaskakujące jednak, im częściej owady go kąsały, tym lepiej się czuł. „To nie jest żadne naukowe spostrzeżenie, ale w ciągu czterech czy pięciu lat pracy z szerszeniami azjatyckimi ani razu nie zachorowałem”.

Kiedy dwa stają się jednym

W tym rozdziale mieliśmy okazję się dowiedzieć, że zwierzęta wykorzystywały z korzyścią dla siebie różne zjawiska naturalne o wiele wcześniej niż ludzie. Węgorze elektryczne ogłuszają swoje ofiary, wysyłając serie impulsów o wysokim napięciu, przypominające w działaniu policyjny

paralizator typu Taser. Pszczoły zbierały ładunek elektryczny o wiele wcześniej, niż starożytni Grecy wpadli na ten pomysł, pocierając bursztyn kawałkiem futra. Żółwie z gatunku kareta używają podczas nawigacji własnego kompasu, który odbiera sygnały pola magnetycznego Ziemi. Na koniec odkryliśmy, że szerszeń wschodni ma wbudowane ogniwo, które wytwarza elektryczność z promieni słonecznych dzięki wykorzystaniu zjawisk zachodzących w dziwnym świecie mechaniki kwantowej.

A przy okazji dowiedzieliśmy się czegoś bardziej fundamentalnego. Jak odkryli na początku XIX stulecia wielcy uczeni Faraday, Ampère oraz inni badacze, elektryczność i magnetyzm są dwiema stronami tej samej monety. Jednak dopiero w latach sześćdziesiątych XIX wieku szkocki fizyk James Clerk Maxwell (1831–1879) połączył te 2 zjawiska ze sobą. Mówiąc w żargonie fizyków, zunifikował siłę elektryczną i magnetyczną i przedstawił je jako jedną siłę, elektromagnetyczną.

To zaś zgrabnie prowadzi nas do ostatniego wielkiego tematu *Kudłatej nauki*. Jak ze zdumieniem odkrył Maxwell, pola elektryczne i magnetyczne, wspólnie podróżując w przestrzeni, wytwarzają coś, bez czego życie na Ziemi nie mogłoby istnieć. Nie byłoby roślin. Nie byłoby azjatyckich szerszeni. Nie byłoby Toby’ego (ukochanego psa Maxwella, którego sylwetka towarzyszy posągowi uczonego na George Street w Edynburgu).

Tym czymś jest światło.

[6] Gra słów: *mussel* (omulek) wymawia się tak jak *muscle* (mięsień).

[7] Ang. *hummingbird* (koliber), *humm* (nucić).

[8] Karol Darwin, *O powstawaniu gatunków drogą doboru naturalnego czyli o utrzymaniu się doskonalszych ras w walce o byt*, przeł. S. Dickstein, J. Nusbaum, Warszawa 2001, s. 204.

[9] Aluzja do filmu *Star Trek*.

[10] Teleturniej BBC Two.

[11] Magnezja koło Sipylosu, starożytne miasto greckie w Lydii, w Azji Mniejszej. Współcześnie Manisa w Turcji.

[12] Aluzja do piosenki Noëla Cowarda *Mad Dogs and Englishmen*.

ROZDZIAŁ 6



ŚWIATŁO

KOŃCOWE FIZYCZNE FANDANGO

**Mrówki i pszczoły wykorzystują sztuczkę związaną ze światłem –
Jaskrawo upierzone kukulki – Ryba plująca zabójczo celnie –
Podwodne kameleony – Kałamarnica o wielkich oczach**

Biegamy jak mrówki

Wystarczy, że pójdziemy do supermarketu, a pierwszą rzeczą, jaka nas powita, nie licząc podejrzliwego ochroniarza, będzie powiew ciepłego powietrza o słodkim zapachu, jak gdyby napływało z wewnętrznej piekarni. Szefowie supermarketu pragną nas w ten sposób zwabić w rejony półek pełnych migdałowych croissantów, chrupiących bochnów chleba i ogromnych ciastek; innymi słowy, skusić nas, żebyśmy pod wpływem impulsu coś tam kupili, przechodząc w stronę innych towarów. Jeśli nie liczyć pieniędzy i posługiwania się kartami lojalnościowymi, nie różnimy się pod tym względem od wielu gatunków mrówek, które „wywączują” jedzenie swoimi czułkami. Z tą różnicą, że mrówki, pokonując drogę od gniazda do źródła pożywienia i z powrotem, podążają śladem feromonów – substancji chemicznych pozostawianych przez inne mrówki.

Sprawa wygląda jednak zupełnie inaczej na pustyniach Afryki Północnej. Pożywienia jest niewiele, a feromonowe sygnały szybko słabną w upalnym słońcu. O ile mrówki w ogóle pozostawiają jakiś ślad: niektóre gatunki, na przykład żyjące na pustyni osobniki z rodzaju *Cataglyphis*, nawet tego nie próbują. W poszukiwaniu martwych insektów albo pajaków biegają to tu, to tam. I gdyby odtworzyć ich trasę, okazałoby się, że jest bardzo nieefektywna – przypomina rysunek przedstawiający rozwleczony kłębek nici. Niektóre osobniki w swojej chaotycznej wędrówce oddalają się ponad 100 metrów od gniazda. Jednak te niewielkie owady o czarnym korpusie, ważące zaledwie 10 miligramów i mające 6 milimetrów długości, wcale nie są tak roztrzepane, jak mogłoby się wydawać. Kiedy już znajdą pożywienie, natychmiast przestają się snuć pozornie bez celu. Tym razem ich trasa jest

zdumiewająco prosta – maszerują do domu jak po sznurku. Kiedy wyprawiają się z gniazda w świat, w jakiś sposób rejestrują to, jak daleko i w jakim kierunku zawędrowały. Zupełnie jak gdyby miały wbudowaną taśmę do mierzenia oraz kompas, dzięki którym mogą wyliczyć, jak najszybciej wrócić do domu.

Odkrycie, w jaki sposób mrówki dokonują tego niezwykłego wyczynu, zajęło badaczom sporo czasu i wymagało pokonania okrężnej drogi z Tunezji do Niemiec, potem do Austrii, Wielkiej Brytanii i z powrotem do Niemiec. Naukowcy mogliby rozwiązać ten problem znacznie szybciej, gdyby pierwszy specjalista, który się nim zajmował, miał odpowiednie wyposażenie. A tak potrzeba było ponad 80 lat i pomocy innego owada: pszczoły. W tym przypadku droga od A do B oznaczała przejście od mrówki do pszczoły i z powrotem do mrówki, ale stało się to nie wcześniej, nim pszczoły nauczyły nas swojego wesołego tańca.

Doktor od mrówek

Pierwsze badania nad tą niezwykłą umiejętnością mrówek żyjących na pustyni prowadził szalenie utalentowany lekarz Felix Santschi (1872–1940). Santschi miał złote ręce i potrafił usuwać kataraktę z oczu pacjentów, posługując się miedzianym nożem, ale ponieważ nie miał dyplomu szkoły wyższej, nie mógł praktykować w rodzinnej Szwajcarii. W 1902 roku przeniósł się więc do Kairuanu, starożytnego miasta na terenie dzisiejszej Tunezji. Tam rano i wieczorami leczył ludzi, a po południu prowadził prace badawcze. W sumie opublikował ponad 200 naukowych artykułów, w których opisał prawie 2 tysiące różnych gatunków, podgatunków, odmian i pododmian mrówek. Ponieważ jednak działał z dala od większości

ośrodków naukowych i zamieścił większość swoich wyników w mało znanych czasopismach w języku francuskim, jego osiągnięcia zwróciły uwagę innych badaczy dopiero wiele lat po jego śmierci. A szkoda, ponieważ dzięki jego odkryciom moglibyśmy znacznie szybciej zrozumieć sekrety życia mrówek.

Na fotografii, którą można oglądać w witrynie internetowej AntWiki, Santschi stoi, trzymając rękę na metalowym pierścieniu pełniącym funkcję klamki jakichś starożytnych drzwi ozdobionych metalowymi guzami. Jest ubrany w ciemną marynarkę i rozpiętą pod szyją białą koszulę z wykładanym kołnierzykiem i ma, jak przystało na prawdziwego doktora, wieczne pióro wystające z górnej kieszonki marynarki. Jego bródka jest przetykana siwizną, a jego oczy wyglądają, jak gdyby zbyt wiele razy je mrużył, przyglądając się niewielkim owadom. Po latach badań Santschi doszedł do wniosku, że mrówki żyjące na pustyni wcale nie wykorzystują śladów chemicznych. Gdyby tak było, czemu poruszałyby się tak okrężną trasą, kiedy idą na poszukiwanie pożywienia, ale prostą, kiedy wracają do domu? Badacz doszedł do wniosku, że mrówki muszą wykorzystywać jakieś inne sygnały z otaczającego świata. Nie chodzi jednak o obiekty fizyczne, takie jak liść, kamień czy ślad okruszków chleba niczym w bajce o Jasiu i Małgosi; takie sygnały mogłyby zostać porwane przez wiatr, zniszczone albo zjedzone. Santschi podejrzewał, że mrówki wykorzystują jedyną rzecz, której na pustyni jest pod dostatkiem – słońce.

W 1911 roku Santschi postanowił zweryfikować swoje pomysły i niedaleko Kairuanu pokazywał mrówkom słońce odbite w lustrze w taki sposób, że pozornie znajdowało się w niewłaściwym miejscu na niebie. W przypadku wielu gatunków okazywało się, że zdezorientowane mrówki szybko zmieniały trasę. Te, które właśnie wracały do gniazda, nagle ruszały w drugą stronę. Mrówki najwyraźniej posługiwały się słońcem jako

przewodnikiem. Nieliczni badacze, którzy zainteresowali się odkryciem Santschiego, uznali je za kontrowersyjne. Słońce przesuwają się po niebie, czemu więc mrówki miałyby polegać na nim zamiast na miejscowych znakach orientacyjnych? Z pewnością nie muszą się bawić w astronomów, jeśli chcą znaleźć drogę do domu.

Co dziwniejsze, niektóre gatunki, zwłaszcza mrówka saharyjska (*Cataglyphis bicolor*), nie zmieniły trasy, gdy Santschi „poruszał” słońcem, ale dalej podążały prosto do gniazda. Te mrówki nie używały słońca jako znaku orientacyjnego i wykorzystywały jego światło w jakiś inny sposób. Nawet kiedy asystent Santschiego ograniczał ich pole widzenia do wycinka nieba biegnącego po okręgu, w ten sposób, że poruszał nad nimi, kiedy znajdowały się w ruchu, kartonowy cylinder o średnicy około 50 centymetrów i wysokości 25, mrówki mimo to nawigowały prawidłowo. I chociaż nie widziały bezpośrednio odbitego słońca, docierały do celu.

W artykule z 1923 roku Santschi postawił więc pytanie: „Co takiego znajduje się w tym niewielkim wycinku niebieskiego nieba, że prowadzi mrówki z powrotem do domu?”. Szwajcarski lekarz doszedł do wniosku, że mrówki znajdują właściwy kierunek, wykorzystując zmiany w intensywności światła Słońca, przypuszczalnie częstotliwości światła ultrafioletowego (UV), których ludzkie oko nie widzi. Hipoteza była elegancka, ale miała jedną wadę – była błędna. Santschi mógłby poddać próbie swoje pomysły, gdyby wystawił mrówki na działanie światła ultrafioletowego, emitowanego przez lampę rtęciową, ale w głębi Tunezji niewiele sklepów oferowało wówczas taki towar, toteż na tym wyczerpał się wkład Santschiego do badań nad sposobem przestrzennej orientacji mrówek. W chwili śmierci badacza, w 1940 roku, niewielu uczonych zdawało sobie sprawę z tego, że wykazał, iż mrówki wykorzystują światło słoneczne, oraz położenie gwiazd, do znajdowania drogi do domu. Niemniej mieszkańcy Kairuanu podziwiali

Santschiego i w uznaniu dla jego wysiłków w dziedzinie medycyny i zoologii nadali mu przydomek *Tabib-en-Neml*, doktor od mrówek.

Od mrówek do pszczół

Prowadząc swoje eksperymenty na tunezyjskiej pustyni, Santschi ekscytująco zbliżył się do odkrycia, w jaki sposób mrówki odnajdują kierunek. Jednak odpowiedź przyniosły dopiero prace innego badacza zajmującego się studiowaniem życia innych owadów. Urodzony w Austrii Karl von Frisch (1886–1982) z pewnością kochał zwierzęta. Na jednej z fotografii siedzi w garniturze, pod krawatem, a obok niego widać psa o zwisających uszach, który wskakuje mu na kolana, szukając czułości. Na innych zdjęciach von Frisch wygląda mniej oficjalnie – jest ubrany w białą koszulę i spodnie z wyszywanymi szelkami, stanowiące element tradycyjnego austriackiego stroju ludowego. Von Frisch, który przez większość życia pracował na uniwersytecie w Monachium, w Niemczech, odkrył, że europejska pszczoła miodna (*Apis mellifera*) wykonuje swoisty taniec, aby przekazać swoim siostrzom z ula, gdzie można znaleźć pyłek i nektar. W tym tańcu kryła się tajemnica nawigacji pszczół – a jak się okazało, także mrówek. Pszczoły, jak odkryli badacze, zbierają informacje na temat kierunku dokładnie tak samo jak mrówki.

Von Frisch ustalił, że jeśli robotnica znajdzie pożywienie w odległości do 50 metrów od ula, po powrocie do domu wykonuje na powierzchni plastra określone ruchy, zataczając kilka razy małe kręgi, po czym zmienia kierunek ruchu. Pszczoła wykonuje ten „okrężny taniec” w przód i w tył, niczym wielka wskazówka oszalałego zegarka, przez kilka minut. Inne pszczoły uważnie śledzą jej ruchy, zanim odlecą na poszukiwanie nektaru. Ten taniec

mówi: „Niedaleko naszego ula jest pożywienie i ono pachnie jak pożywienie, które przylgnęło do mnie, ale nie mówię wam, w którym kierunku się znajduje. Po prostu lećcie same i zobaczcie”.

Pszczoła, która przekazuje wiadomość, że pożywienie znajduje się dalej, w odległości do 15 kilometrów od domu, wykonuje bardziej skomplikowany taniec. Tym razem pszczoła porusza się najpierw po linii prostej, po czym zatacza półokrąg do punktu wyjścia i znowu pełźnie po linii prostej, po czym zatacza drugi półokrąg, tym razem w drugą stronę. Jej ruchy przypominają dwie duże litery D stykające się plecami. Pokonując prosty odcinek ruchu, pszczoła kołysze swoim ciałem z boku na bok, w tańcu przypominającym merdanie ogonem. Aby powiedzieć innym pszczołom, jak daleko znajduje się pożywienie, tańcząca pszczoła dostosowuje długość i szybkość, z jaką wykonuje każdy cykl tego tańca. Kod jest prosty: im dalej od ula znajduje się smakołyk, tym mniej pełnych cykli tańca z kołysaniem się. Jeśli obiekt znajduje się, powiedzmy, 100 metrów od ula, robotnica robi 10 krótkich okrążeń w ciągu 15 sekund, ale jeśli pożywienie jest 3 kilometry dalej, zatacza w tym czasie 3 znacznie dłuższe kręgi. Inne pszczoły obserwują ją uważnie; czasami przyglądają się kilku różnym tancerkom i wyciągają średnią odległości dzielącej je od pokarmu. To swego rodzaju postać pszczelego crowdsourcingu. Jak odkrył von Frisch, ta zależność między odległością a liczbą rozkołysanych cykli tańca jest tak dokładna, że mógł mierzyć długość tańca stoperem, aby zorientować się, jak daleko znajduje się pożywienie. To jest prawdziwy przykład kudłatej nauki.

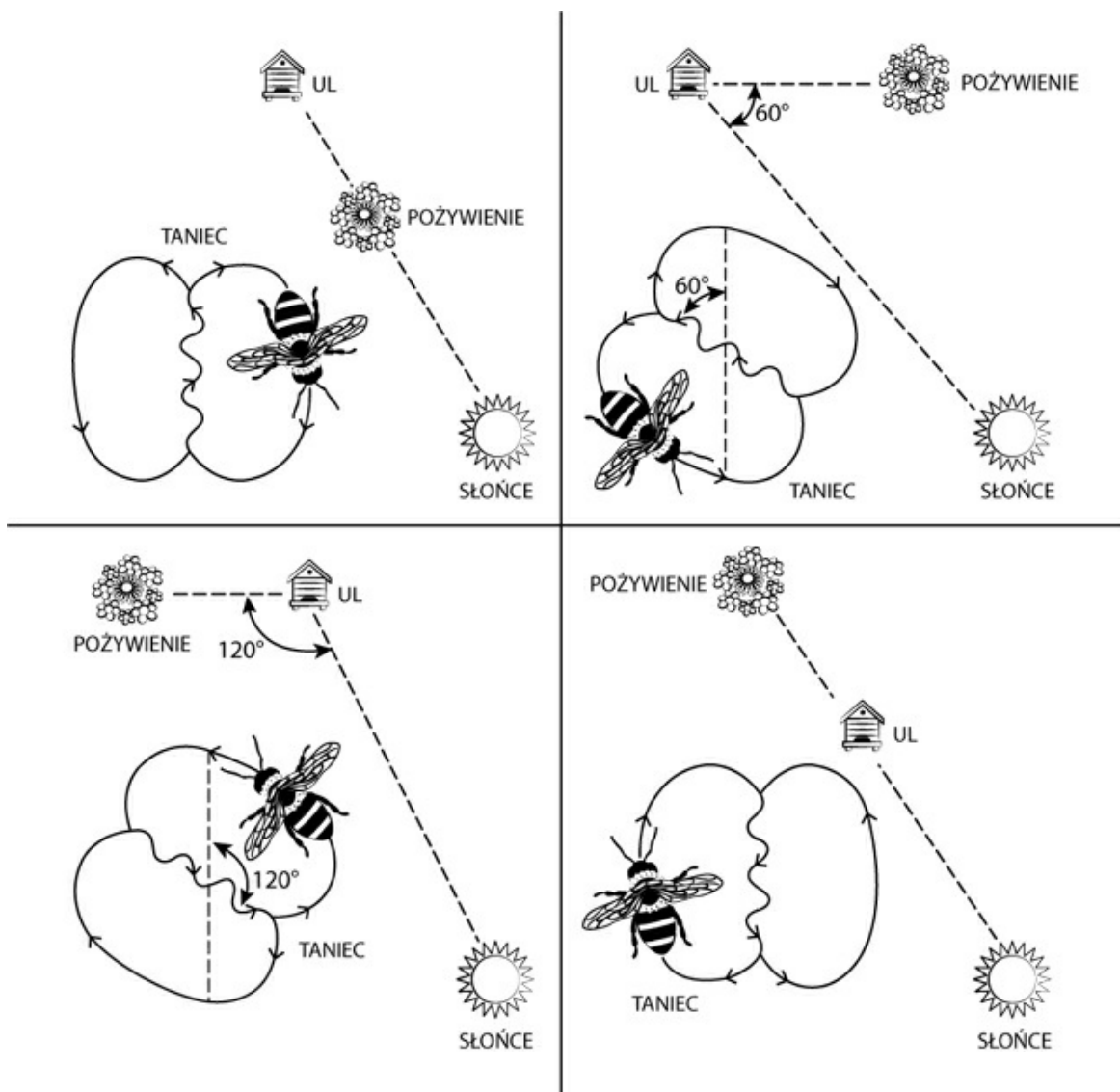
Żeby zorientować się, jak daleko poleciała w poszukiwaniu pożywienia, tańcząca pszczoła sprawdza, jak wiele energii spaliła podczas lotu, posługując się swego rodzaju licznikiem paliwa. Jednak podanie innym pszczołom odległości do pożywienia nie miałoby większego sensu, gdyby pszczeli taniec nie potrafił także wyjaśnić, w którą stronę mają polecieć. Jeśli

poprosisz przyjaciela idącego do ciebie z wizytą, aby po drodze kupił bochenek chleba w piekarni położonej kilometr od ciebie, i na tym poprzestaniesz, twój kumpel zapewne będzie się błąkał po ulicach z pustymi rękami, dopóki mu nie podasz kierunku, w którym leży sklep. Zatem w jaki sposób pszczoła wskazuje kierunek? Wielkie umysły von Frischa i Santschiego zajmowały się szukaniem odpowiedzi na to samo pytanie, chociaż von Frisch dowiedział się o pracach Santschiego dopiero w 1948 roku, kilka lat po śmierci Szwajcara.

Po drugiej wojnie światowej von Frisch przeniósł się z powrotem do Austrii, ponieważ monachijski Instytut Zoologiczny uległ zniszczeniu w następstwie wojennych bombardowań. Swoje obserwacje pszczół tańczących na plastrach miodu, zbudowanych z wosku heksagonalnych komórek, w których te owady przechowują miód i składają jaja, prowadził dalej na uniwersytecie w Grazu. Von Frisch odkrył, że pszczoła nie tylko ma tajemny kod, za pomocą którego mówi innym mieszkankom ula, jak daleko znajduje się pożywienie, ale potrafi także przekazać informacje na temat kierunku, w jakim należy polecieć. Ul składa się zwykle z wielu plastrów miodu umieszczonych pionowo. Von Frisch odkrył, że kąt w stosunku do pionu, pod jakim pszczoła wykonuje elementy swojego rozkołysanego tańca, wskazuje na kąt między położeniem pożywienia, ula i słońca. Jeśli pożywienie, ul i słońce leżą w linii prostej, pszczoła wykonuje taniec pionowo ku górze. Ale jeśli droga od pożywienia do ula znajduje się pod kątem, powiedzmy, 60 stopni w lewo, w stosunku do linii łączącej ul ze Słońcem, prosty odcinek tańca pszczoły będzie biegł pod kątem 60 stopni w lewo od pionu. Innymi słowy, pszczoła używa pionu, który wykrywa, odczuwając działające na jej ciało przyciąganie grawitacyjne, jako linii symbolizującej położenie Słońca. Odnajdując i przekazując informacje na temat kierunku, odnosi także położenie pożywienia do tego pionu, a tym

samym do słońca. Dzięki jej tańcowi kolonia pszczoł miodnych może zebrać pożywienie z nowego źródła, nie marnując czasu na indywidualne poszukiwania.

Jeśli umieścimy plaster miodu poziomo w ciemnym, pozbawionym otworów ulu, pszczoły będą zdezorientowane. Ponieważ nie będą już mogły wykorzystywać pionu jako odniesienia, we wzorach ich tańca zapanuje chaos. Jednak jeśli oświetlimy ul silnym światłem elektrycznym, pszczoły ponownie wrócą do roboty: prosty odcinek ich tańca będzie znajdował się w stosunku do lampy pod tym samym kątem co droga od ula do źródła jedzenia w stosunku do słońca. Innymi słowy, pszczoły użyją lampy jako punktu odniesienia. I tu pojawia się problem: czy pszczoły potrzebują samego słońca, czy też, jak mrówkom Santschiego, wystarczy im fragment nieba, na którym nie widać samego słońca? Czy jeśli jest pochmurno albo słońce znajduje się za górą lub za drzewem, pszczoły mimo to potrafią zorientować się, dokąd mają lecieć, aby znaleźć pożywienie? Latem 1948 roku von Frisch znalazł odpowiedź, pokazując znajdującym się na horyzontalnie umieszczonym plastrze miodu pszczołom jedynie niewielki fragment błękitnego nieba przez okienko, jakie zrobił w ulu (tak jak Santschi w Tunezji, w latach dwudziestych, używał tekturowego cylindra, aby umożliwić mrówkom postrzeganie fragmentu nieba, na którym nie widać słońca). Nawet jeśli pszczoła po powrocie do ula może widzieć z jego wnętrza jedynie wycinek nieba o szerokości 10 stopni kątowych (90 stopni to kąt między pionem a płaszczyzną horyzontu), jej rozkołysany taniec nadal będzie informował inne pszczoły o kierunku, w jakim należy polecieć po żywność.



Rysunek 6.1 *Specjalna droga. Pszczoły miodne mówią swoim siostrze z ula, gdzie znajduje się pożywienie, za pomocą rozkołysanego tańca, przy czym kąt między prostym odcinkiem tego tańca a pionem jest powiązany z kątem między słońcem i ulem a miejscem, gdzie znajduje się pożywienie.*

Bujanie w błękitcie

Na niebie musi być coś więcej, niż ludzie potrafią dostrzec. Zobaczmy, co to takiego. Na początek: dlaczego niebo jest błękitne? Na szczęście to akurat

jest łatwe. Znajdujące się w powietrzu cząsteczki i drobiny, takie jak pył albo dym, bardziej rozpraszają światło słoneczne o wysokiej częstotliwości niż światło o niskiej częstotliwości. O wiele bardziej: ilość rozproszonego światła rośnie wraz z jego częstotliwością, w postępie do czwartej potęgi. A zatem powietrze rozprasza światło niebieskie (o krótkiej długości fali, ale wysokiej częstotliwości) jakieś 10 razy silniej niż światło czerwone. Z tego samego powodu delikatny dym i mgła przybierają barwę niebieską. A w dodatku to rozproszone światło jest spolaryzowane.

Ale zaraz. Spolaryzowane? Co to takiego? Pora sięgnąć po obraz kolejnej nici. Jednak tym razem nie chodzi o rozwleczony kłębek nici obrazujący szlaki mrówczych wędrówek, ale o kawałek liny, którą 2 osoby wymachują w taki sposób, że wprawiają ją w ruch falisty. Najpierw jednak musimy wrócić do XIX stulecia, gdy szkocki fizyk James Clerk Maxwell wyliczył z pewnym zdumieniem, że pole magnetyczne i elektryczne poruszają się z prędkością światła. Maxwell uświadomił sobie, że możemy sobie wyobrazić światło jako zbiór fal tworzonych przez pole elektryczne i magnetyczne – czyli fale elektromagnetyczne. Fizycy tak bardzo uwielbiają równania Maxwella, że zajęły one *ex aequo* pierwsze miejsce w ankiecie pisma „Physics World” na ulubione równanie wszech czasów, o której wspominaliśmy w rozdziale 2. Przy okazji dowiedzieliśmy się, że równanie $F = m \cdot a$ (drugie prawo Newtona) zajęło miejsce trzecie. A więc punkt dla Maxwella, któremu zresztą należy się dodatkowa premia. A to dlatego że gdy fizyczny geniusz Albert Einstein usłyszał pochwałę: „Dokonał pan wielkich rzeczy, ale stał pan na barkach Newtona” – odparł: „Nie, stałem na barkach Maxwella”. Skądinąd to powracający motyw wśród fizyków. Kilkaset lat wcześniej sam Newton z kolei w liście do swojego rywala Roberta Hooke’a tak scharakteryzował swoje dzieło na temat optyki: „Jeśli widziałem dalej, to dlatego że stałem na barkach gigantów”.

Ale dość już tej fizycznej akrobatyki. Wartości natężeń pól elektrycznego i magnetycznego fali świetlnej zmieniają się, malejąc i rosnąc, wzdłuż osi położonych względem siebie pod kątem prostym. Jeśli wyobrazimy sobie pole elektryczne jako wspomnianą wcześniej linię, którą wymachujemy w lewo i w prawo, to pole magnetyczne będzie inną linią, którą wymachujemy w górę i w dół. W przypadku światła nie spolaryzowanego pole elektryczne nieustannie się zmienia niczym lina, która wije się najpierw horyzontalnie, po czym pod pewnym kątem do płaszczyzny horyzontu, a potem pod jeszcze innym, i tak dalej, zmieniając kierunek oscylacji setki milionów milionów razy na sekundę. Podobnie zachowuje się pole magnetyczne, oscylujące dokładnie pod kątem prostym do pola elektrycznego. Natomiast w przypadku światła spolaryzowanego pole elektryczne oscyluje przez cały czas w tym samym kierunku. Jeśli przedstawimy pole elektryczne jako linię falującą pionowo, w górę i w dół, światło nazwiemy spolaryzowanym pionowo; a jeśli faluje horyzontalnie, jest spolaryzowane poziomo.

Za pomocą światła

Światło Słońca dociera do górnych warstw atmosfery ziemskiej w postaci niespolaryzowanej. Podczas jego dalszej wędrówki cząsteczki znajdujące się w powietrzu rozpraszają światło, polaryzując je w różnym stopniu i w różnych kierunkach, w zależności od kąta, pod jakim je rozpraszają, dzięki czemu niebo zyskuje w różnych miejscach odrębny wzorec polaryzacji. Chociaż posługując się wzrokiem, niemal nigdy nie potrafimy odróżnić światła spolaryzowanego od niespolaryzowanego, mamy kamery, które mogą nam pokazać dla każdego punktu na niebie, jak bardzo światło

jest spolaryzowane i w jakim kierunku. Jeśli słońce znajduje się bezpośrednio nad naszą głową, jak na równiku w południe, na kierunek polaryzacji wskazuje seria koncentrycznych pierścieni wokół słońca. W każdym punkcie takiego pierścienia kierunek polaryzacji jest styczny do obwodu. Jeśli obejdziemy cały taki okrąg, kierunek polaryzacji będzie się stale zmieniał, aż w końcu wrócimy do punktu wyjścia. Kiedy słońce chowa się za horyzontem na zachodzie, powstaje pasmo bardzo silnej polaryzacji biegnące od północy, przez najwyższy punkt na niebie, po czym w dół, na południe.

Dowiedziawszy się od swojego kolegi fizyka Hansa Benndorfa (1870–1953) o zjawisku polaryzacji, von Frisch zaczął się zastanawiać, czy to nie dzięki niemu pszczoły miodne mogą uprawiać swój taniec na plastrze umieszczonym horyzontalnie w ulu, z którego widać jedynie niewielki skrawek nieba. Innymi słowy, czy kiedy nie mogą zobaczyć samego słońca, orientują się, wykorzystując wzorzec polaryzacji nieba? Aby się o tym przekonać, von Frisch umieszczał w oknie swojego ula, nad pszczołą tańczącą na horyzontalnie umieszczonym plastrze, płaski kawałek polaroidu. Polaroid to polimer, podobnie jak polietylen czy polistyren, o długim łańcuch cząsteczek, jak spaghetti, które wszystkie układają się w tym samym kierunku. To tworzywo sztuczne, wynalezione w latach trzydziestych XX wieku przez współtwórcę Polaroid Corporation Edwina Landa, absorbuje światło, które jest spolaryzowane w takim kierunku, w jakim układają się jego cząsteczki, ale przepuszcza światło spolaryzowane w innych kierunkach. W rezultacie polaroid działa jako polaryzator. Kiedy von Frisch obracał płaszczyznę polaroidu, by zmienić kierunek polaryzacji światła docierającego do plastra, pszczoły zmieniały kierunek swojego rozkołysanego tańca. *Quod erat demonstrandum*. Cześć.

Krążą opowieści, że wikingowie, jeszcze przed wynalezieniem kompasu, także wykorzystywali polaryzację światła do nawigacji swoich długich łodzi.

W tym celu patrzyli w niebo przez kawałek kryształu, który podwójnie załamywał światło – padający na kryształ promień światła niespolaryzowanego rozdzielał się na 2 promienie (obydwa spolaryzowane), dzięki czemu powstawały 2 odrębne obrazy. Jednak przypuszczalnie to tylko kolejna legenda, taka sama jak przekonanie, że wikingowie nosili hełmy z rogami (czego nie robili). O pszczołach ciągle musimy się wiele dowiedzieć. Przede wszystkim nie wiemy dokładnie, w jaki sposób wykrywają polaryzację światła. Jak ujął to von Frisch w swojej książce z 1950 roku *Bees. Their Vision, Chemical Senses and Language*, „życie pszczoły jest jak magiczna studnia: im więcej z niego czerpiesz, tym bardziej napęnia się wodą”.

Powrót do podstaw

Odkrycie przez von Frischa, że pszczoły wykorzystują do poruszania się w przestrzeni zjawisko polaryzacji światła, zachęciło Davida Vowlesa z uniwersytetu w Oxfordzie, w Wielkiej Brytanii, do kontynuowania badań Santschiego nad mrówkami. Pewnego letniego wieczoru w 1950 roku Vowles wybrał się na płaskie łąki nad rzeką Cherwell, żeby trochę poobserwować te owady. Ograniczając pole widzenia mrówek za pomocą tuby, pokazał, że osobniki z gatunku *Myrmica laevinodis*, żyjące w dolinie Tamizy, potrafią odnaleźć drogę do domu, wykorzystując jedynie pasek nieba, na którym nie widać słońca; tym samym uzyskał potwierdzenie wyników badań Santschiego nad mrówkami z Tunezji. Na tym jednak nie koniec. Vowles zrobił bowiem też coś, co rozstrzygnęło sprawę. Po powrocie do laboratorium skierował przez szklaną szybkę promień nie spolaryzowanego światła na mrówkę z gatunku *Myrmica ruginodis*

(wścieklica podobna), znajdującą się na horyzontalnej powierzchni. Mrówka wędrowała, rzadko posuwając się w jednym kierunku dalej niż 4 centymetry. Kiedy jednak Vowles przepuścił światło przez warstwę polaroidu, mrówka zaczęła śmiało podążać po linii prostej, pokonując czasem 20 centymetrów. Natomiast jeśli po pokonaniu przez nią 5 centymetrów Vowles obracał płaszczyznę polaroidu zgodnie z ruchem wskazówek zegara o 30 stopni wobec osi pionowej, mrówka skręcała o 30 stopni zgodnie z kierunkiem wskazówek zegara w stosunku do pierwotnej trasy. Badacz uzyskał podobne rezultaty dla innych obrotów. Okazało się, że mrówki, podobnie jak pszczoły, wykorzystują spolaryzowane światło do orientacji w przestrzeni. I tak po upływie mniej więcej 30 lat od badań Santschiego udało się wreszcie rozwiązać zagadkę nawigacji mrówek. Przyszła pora na ostatni etap naszej podróży.

Mrówki na szczydach

Schemat polaryzacji światła słonecznego informuje mrówki jedynie o tym, w którym kierunku się poruszają: na północ, na południe, na wschód czy na zachód. Aby ustalić najkrótszą drogę do domu, mrówka musi także wiedzieć, na jaką odległość oddaliła się od gniazda, poruszając się w poszczególnych kierunkach. Zagadkę, w jaki sposób mrówki potrafią tego dokonać, udało się rozwiązać dopiero w 2006 roku, a więc ponad 60 lat po śmierci Santschiego i 50 lat po eksperymentach Vowlesa. Właśnie wtedy Matthias Wittlinger i Harald Wolf z Uniwersytetu w Ulm, w Niemczech, oraz Rüdiger Wehner z Uniwersytetu w Zurychu, w Szwajcarii, przeprowadzili kilka eksperymentów, które pomogły rozszyfrować ostatni element tej łamigłówki.

Aby odtworzyć warunki panujące na pustyni, Wittlinger i jego koledzy

zbudowali dziesięciometrowy metalowy tunel, pomalowali jego wnętrze na szaro, po czym wysypali w środku warstwę drobnego szarego piasku. Na jednym krańcu tunelu umieścili gniazdo mrówek *Cataglyphis fortis*, na drugim zbiorniczek zawierający okruchy herbatników. Gdy tylko mrówki odkryły jedzenie, badacze błyskawicznie zebrali owady i przenieśli je – razem z okruchami herbatników w żuwaczkach – na koniec drugiego tunelu, położonego równoległe do pierwszego. Wyglądał on dokładnie tak samo jak pierwszy, z tą różnicą, że był o 20 metrów dłuższy, a u jego wylotu nie było gniazda. Niczego nie świadome mrówki ruszyły z powrotem do gniazda wzdłuż fałszywego tunelu. Po przejściu mniej więcej 10 metrów zaczęły się kręcić tam i z powrotem, szukając wejścia do gniazda w miejscu, gdzie, jak sądziły, powinno się znajdować. Skądś wiedziały, jak daleko muszą zawędrować, by znaleźć się w domu, mimo że naukowcy wyprowadzili je w pole.

Mrówki mogą to osiągnąć na dwa sposoby – rozumowali Wittlinger i jego koledzy. Albo mają wbudowany wewnętrzny zegar, który im mówi, jak długo trzeba iść, aby pokonać trasę od gniazda do pożywienia – jeśli w drodze powrotnej posuwają się w tym samym tempie, muszą jedynie poświęcić na powrót tyle samo czasu. Albo w drodze z gniazda do pożywienia liczą swoje kroki oraz oceniają ich długość, a następnie obliczają, ile kroków o określonej długości powinny zrobić w drodze powrotnej. Żeby dowiedzieć się, czy sekret kryje się w liczeniu czasu czy kroków, badacze postanowili mrówkom, które dotarły do okruchów herbatników, przykleić do każdej nogi włoski ze świnińskiej szczeciny. Chodziło o to, że dzięki „szczudłom” z włosia, wydłużającym każdą nogę o milimetr, mrówki miały teraz dłuższe odnóża. Jeśli mrówki liczą kroki, to mając dłuższe nogi, przecenią dystans dzielący je od gniazda. „Najtrudniejsza część eksperymentu polegała nie tylko na tym, żeby przykleić im te szczudła, ale

także żeby zadbać o ich dobry humor i namówić je, żeby w ogóle miały ochotę zbierać okruchy po fazie przygotowań ze szczudłami – opowiada Wittlinger. – Tylko mrówki, które niosą kawałek jedzenia, można było poddać testom, ponieważ tylko wtedy mogliśmy mieć pewność, że mają odpowiednią motywację”.

Kiedy mrówki na szczudłach znalazły się w drugim, dłuższym tunelu, zgodnie z tym, czego się spodziewano, minęły niewidzialne wejście do swojego hipotetycznego gniazda o nieco ponad 5 metrów. To dowiodło, że aby zmierzyć odległość, oceniają długość swoich kroków, jednak tym razem nie wzięły pod uwagę, że mają teraz dłuższy krok. Aby zweryfikować wynik, członkowie zespołu na kilka dni umieścili mrówki z powrotem w gnieździe, by miały okazję wielokrotnie pokonać trasę do pożywienia i z powrotem wzdłuż pierwszego tunelu. Kiedy nagle przerywano im obiad i ponownie przerzucano je do drugiego tunelu, mrówki szukały swojego gniazda w odległości 10,5 metra. Zapamiętały, jak wielu kroków potrzebują, mając teraz odnóża o nowej długości. Odległość nie była idealna – gniazdo znajdowało się 10,2 metra od okruchów, a nie 10,5; różnicę członkowie zespołu przypisywali temu, że mrówki na szczudłach poruszały się z nieco inną prędkością. Wittlinger uświadomił sobie, że mrówki nie mogą polegać wyłącznie na liczeniu kroków. Życie jest skomplikowane i muszą brać pod uwagę także długość kroków. „Długość kroków zmienia się wraz ze zmianą prędkości marszu – zauważa Wittlinger. – Prędkość poruszania się w stronę żywności i z powrotem zwykle się różni, więc liczba kroków jest inna”.

Niemniej ostateczny wniosek był jasny. Mrówki nie mają wbudowanego wewnętrznego zegara, natomiast dysponują krokomierzem. Jego odczyt łączą z umiejętnością wykrywania polaryzacji światła i dzięki temu potrafią obliczyć, jak daleko i w jakim kierunku zawędrowały w poszukiwaniu jedzenia. A potem w jakiś sposób wyliczają najkrótszą powrotną drogę do

domu. To był jedynie mały, choć nieco większy niż zwykle krok mrówek i wielki skok ludzkości w rozumieniu sposobu, w jaki zwierzęta orientują się w przestrzeni. W ten sposób zatoczyliśmy pełne koło i dotarliśmy z powrotem do zabaw Santschiego na tunezyjskiej pustyni. Gdyby tylko szwajcarski badacz miał lampę rtęciową, być może uczeni mogliby pójść mniej okrężną drogą w poszukiwaniu rozwiązania zagadki nawigacji mrówek. A tak musieli szukać odpowiedzi po omacku, podobnie jak owady szukające pożywienia w drodze z gniazda.

Mrówki i pszczoły jedynie zapoczątkowały znacznie dłuższą podróż. Dziś wiemy, że muchy, pająki i chrząszcze także potrafią wykrywać światło spolaryzowane, podobnie jak wiele innych zwierząt żyjących w wodzie, od ośmiornicy i mątwy po rawkę błazna. Zwierzęta być może używają światła spolaryzowanego w bardzo wielu sytuacjach, od poruszania się w świetle i wykrywania drapieżników po kamuflaż i komunikowanie się. Nie wiemy jednak na pewno, w jaki sposób wiele zwierząt potrafi postrzegać światło spolaryzowane – ani dlaczego tego nie potrafi. Shelby Temple z uniwersytetu w Bristolu, w Wielkiej Brytanii, uczony, z którym wkrótce się spotkamy, ujął to tak: „W próbach zrozumienia widzenia światła spolaryzowanego przypominamy dzieci z przedszkola, które usiłują się nauczyć starożytnej greki”.

Barwna plamka

Nawet jeśli jesteśmy jak dzieci we mgle w odkrywaniu tajemnic widzenia światła spolaryzowanego, mamy za sobą znacznie dłuższą historię badań nad kolorem. W swojej *Opticks* z 1704 roku Newton (tym razem nie zamierzamy przypominać, że się mylił, ani sugerować, że Einstein wyżej cenił Maxwella)

zastanawiał się, czy barwy pawiego ogona powstają pod wpływem sposobu, w jaki światło odbija się od piór, czy też w następstwie absorpcji światła przez pigmenty. To powiedziawszy, musimy przyznać, że fizycy dopiero pod koniec XX wieku zaczęli badać to zjawisko.

Zwierzęta wykorzystują barwy do znajdowania pokarmu, zwracania na siebie uwagi partnerów seksualnych, ukrywania się albo odstraszenia drapieżników lub do komunikowania swojego stanu zdrowia bądź, jak w przypadku niektórych naczelnych o jaskrawych pośladkach, płodności i wielu innych spraw. W kategoriach fizycznych barwa to długość fali pulsujących pól elektrycznych i magnetycznych, które składają się na falę świetlną. Przywołując wcześniejszą analogię z liną, można powiedzieć, że to odległość, jakiej potrzebuje lina, aby wykonać pełny ruch do góry i na dół oraz ponownie do góry. Człowiek postrzega światło o długości fali od 400 nanometrów (fiolet) do 700 (czerwień). Jak odkrył Newton, przepuszczając wiązkę światła przez pryzmat, można rozdzielić ją na 7 barw składowych – czerwony, pomarańczowy, żółty, zielony, niebieski, indygo i fiolet – ponieważ szkło załamuje każdą długość fali o nieco inną wartość. Wcześniej ludzie sądzili, że kolor nie jest własnością samego światła, ale że w jakiś sposób jest wytwarzany przez szkło albo inny przedmiot, na który patrzyli. Newton tak bardzo się poświęcał, prowadząc swoje badania nad fenomenem widzenia, że wtykał sobie do oka różne przedmioty, żeby zobaczyć, jak ściskanie gałki ocznej zmienia jego widzenie. W ten sposób powstawały barwy, **ALE NIE PRÓBUJCIE TEGO SAMI W DOMU.** W odróżnieniu od klasycznego dzieła Newtona, *Principia Mathematica* z 1687 roku, *Opticks* zostało opublikowane po angielsku. Wydaje się łatwiejsze w lekturze, a w każdym razie, o ile nam wiadomo, nikt nie zaproponował nagrody za to, że ktoś potrafi je zrozumieć.

A skoro mówimy o nagrodach: Maxwell nie dość, że pobił Newtona

w konkursie na ulubione równanie fizyków, to jeszcze był autorem pierwszej fotografii barwnej. W 1861 roku ten szkocki ziemianin zrobił 3 odrębne czarno-białe fotografie tartanowej wstążki oświetlonej na przemian światłem niebieskim, czerwonym i zielonym. Następnie nałożył na siebie obraz wszystkich trzech zdjęć, używając w każdym przypadku światła innej barwy. W rezultacie uzyskał obraz wstążki w pięknych kolorach. I to właśnie Maxwell uświadomił sobie, że istnieje więcej długości fali promieniowania elektromagnetycznego niż te, które potrafimy dostrzec – w swoich 4 równaniach z 1868 roku przewidział istnienie fal radiowych, promieni rentgenowskich i innych. Poza granicami widzialnego promieniowania elektromagnetycznego, które nazywamy światłem, znajduje się mnóstwo innych rodzajów promieni. Jeśli zwiększymy długość fali światła widzialnego, natrafimy, jak pamiętamy z rozdziału 1, na promieniowanie podczerwone; następnie na mikrofałe, które mają długość około 1 milimetra do 1 metra, oraz fale radiowe o długości do 100 kilometrów. Wszystkie te fale rozchodzą się w próżni z taką samą prędkością o wartości $c = 300\,000$ km/s, toteż jeśli zwiększamy długość fali, maleje częstotliwość ich pulsowania. Jeśli zwiększymy częstotliwość, posuwając się w dół skali długości, poza światło widzialne, napotkamy ultrafiolet (UV), następnie promienie rentgenowskie (o długości od 0,1 do 10 nanometrów) i wreszcie promieniowanie gamma (o długości fali mniejszej niż 0,1 nanometra) emitowane przez niektóre substancje radioaktywne. W rozdziale 1 mówiliśmy o zwierzętach, które wykrywają ciepło w postaci promieniowania podczerwonego, przy czym chrząszcz ogniolubny lokował się na szczycie listy stworzeń wyposażonych w najbardziej czułe receptory. Nasze oczy mówią nam, że potrafimy postrzegać światło widzialne (o ile nie wystarczy komuś wskazówka zawarta w samej nazwie), ale niektóre zwierzęta widzą światło wykraczające poza spektrum światła widzialnego – ultrafiolet.

Z lotu ptaka

Wymizerowana i wyczerpana, z jasnobrązowymi piórkami w nieładzie, skoro nie ma czasu, żeby sama coś zjeść, nie mówiąc już, żeby się oporządzić, samica płochacza pokrzywnicy (*Prunella modularis*) wraca do swojego gniazda zbudowanego z gałązek i mchu. W dziobie niesie małego chrząszcza. Na tego ptaszka wielkości wróbla czeka w gnieździe 5 głodnych piskląt z szeroko rozwartymi dzióbkami, odsłaniając jasnopomarańczowo-czerwony przełyk. Które wybrać? To trudna decyzja. Pisklęta, które dostaną najwięcej jedzenia, będą rozwijać się zdrowo. Muszą jednak rywalizować ze swoim rodzeństwem o ograniczone dostawy. Jedno z piskląt rozdziawia dzióbek nieco szerzej, jego gardło wydaje się bardziej jaskrawe niż innych. Matka wybiera właśnie to pisklę i wtyka mu do dzióbka przyniesionego żuka, aby mogło go szybko połknąć. To mądry wybór, ponieważ jasna barwa gardzieli może sygnalizować, że pisklak jest zdrowy – to uczciwy wskaźnik, bo pisklak musiał wydatkować pewną energię na wytworzenie jasnego pigmentu, co pokazuje, że jest na tyle zdrowy, by móc wydatkować więcej energii. Nie ma tu miejsca na oszustwo: nie da się wytworzyć silnych barw za darmo. Jednak jasnoczerwona barwa rozdziawionego dzioba może też oznaczać, że pisklak jest głodny. Dobrze odżywione młode potrzebuje mnóstwo krwi w mięśniach żołądka, aby strawić pokarm, ale ptak z pustym żołądkiem może odesłać tę krew do swojego gardła. A zatem jaskrawe zabarwienie przełyku może także stanowić uczciwy sygnał, że pisklę potrzebuje jedzenia.

W pobliżu inna pokrzywnica ma w gnieździe tylko jedno pisklę. Jest ogromne i jego szeroko rozdziawiony dziób ma znacznie silniejszą jaskrawoczerwoną barwę niż zwykle. Z jakiegoś powodu samica karmi swoje nedorzecznie duże pisklę tak często, jak tylko potrafi. Zdarza się nawet, że

wkłada w znalezienie pokarmu dla swojego dziecka więcej wysiłku niż jej sąsiadka, która ma w gnieździe pięcioro. Po pewnym czasie to wiecznie głodne młode zaczyna przerastać swoich rodziców i osiąga długość prawie 30 centymetrów. Jest o wiele za duże jak na swoje gniazdo – głowa i ogon wystają na zewnątrz. Jak się pewnie domyślacie, to ogromne pisklę to nie płochacz pokrzywnica: to kukułka zwyczajna (*Cuculus canorus*).

Jajko w gnieździe

Kukułka nie jest odosobniona w swojej taktyce podrzucania dzieci innym na wychowanie. W podobny sposób zachowuje się mniej więcej 1 procent ptaków – to przypadek tak zwanego bezwarunkowego pasożytnictwa lęgowego. Jeśli złożysz jaja w gnieździe innego ptaka, masz dostęp do najlepszego żłobka na świecie: całodobowa opieka przez 7 dni w tygodniu, a do tego żadnych list oczekujących i nigdy nie musisz płacić rachunku. W naszych warunkach byłby to odpowiednik wyrzucenia czyjegoś dziecka z fotelika niemowlęcego i zainstalowania w nim własnego potomka. A potem można spokojnie iść do pubu. Na zawsze. Samica kukułki zwyczajnej wyrzuca jedno jajko z wybranego przez siebie gniazda gospodarza, po czym składa w jego miejsce własne. Jeśli mała kukułka wykluje się pierwsza, wypycha z gniazda jajka rywali. Teraz może liczyć na zasłużoną nagrodę, czyli pełną uwagę przybranych rodziców. A jeśli kukułka wykluje się po pisklętach gospodarzy, wypycha z gniazda przyrodnych braci i siostry. To jakby opowieść o Kopciuszku, tyle że w tej wersji zła siostra wygrywa i nie ma żadnej dobrej wróżki.

Ale nawet jeśli pisklę kukułki pozbyło się konkurencji, na tym nie kończą się jego kłopoty. Potrzebuje bowiem więcej jedzenia, niż spodziewają się

przybrani rodzice, którzy nadal sądzą, że mają w gnieździe małą pokrzywnicę. Biolodzy przypuszczają, że bardziej jaskrawa barwa szerzej rozdziawionego dzioba kukułki intruza stanowi tak zwany bodziec supernormalny, czyli bodziec, który ma skłonić przybranych rodziców do przynoszenia pisklęciu więcej pożywienia, jakiego potrzebuje, jeśli ma wyrosnąć na trzydziestocentymetrową dorosłą kukułkę, a nie na pokrzywnicę płochacza wielkości wróbelka.

Bodźce supernormalne można spotkać wszędzie – na przykład samica ostrygojada zwyczajnego (*Haematopus ostralegus*) woli składać nienormalnie wielkie jajka, wielu osobników zaś płci męskiej naszego gatunku (*Homo sapiens*) odczuwa nieodparty pociąg do powiększonych chirurgicznie, nedorzecznie ogromnych kobiecych piersi. To samo dzieje się w reklamach: wszystko wydaje się większe niż w rzeczywistości, bardziej jaskrawe i głośniejsze, tylko po to, żeby skusić nas do kupowania więcej. Termin „bodźce supernormalne” odnosi się do nadmiernie silnych, nadmiernie jaskrawych, nadmiernie głośnych bodźców, które mają skłonić inne zwierzę do przesadnych reakcji. Aby jakiś bodziec spełnił warunki bodźca supernormalnego, musi być silniejszy niż zwykły bodziec oraz wywoływać wzmożone reakcje. Superman nie byłby taki super, gdyby siedział schowany w sypialni. Czy szeroko rozdziawiony dziób pisklęcia kukułki spełnia oba warunki?

Biolodzy podczas badań nad kukułkami wielokrotnie malowali na czerwono gardła piskląt należących do gatunków, którym kukułki podrzucają swoje jaja, takich jak płochacz pokrzywnica, trzcinniczek zwyczajny czy rudzik zwyczajny. A jednak pisklęta o zmodyfikowanej barwie, mimo że ich rozdziawione dzioby były bardziej czerwone niż zwykle, nie dostawały więcej jedzenia niż pozostałe pisklaki. Ich pomalowane gardła nie spełniały warunków bodźca supernormalnego, ponieważ nie wywoływały zwiększonej

reakcji. Dlaczego więc pisklęta kukułki wydatkują energię na to, aby pigment w ich gardłach był jaśniejszy, jeśli nie zapewnia to dodatkowego obiadu? Odpowiedzi poszukajmy u Martina Stevensa z uniwersytetu w Exeter, w Wielkiej Brytanii, który rozpoczął badania nad sposobem widzenia ptaków pod wpływem swojej fascynacji metodami kamuflażu i sygnałami ostrzegawczymi, jakimi się posługują ćmy i gąsienice. Ponieważ te bezkręgowce zwykle ukrywają się przed ptakami albo starają się je odstraszyć, musiał przede wszystkim dowiedzieć się, co widzą ptaki. Stevens miał swoje przypuszczenia na temat malowania gardeł. „Te manipulacje ze zmianą koloru gardeł nie opierają się na tym, jak ptaki widzą świat, ale na tym, jak widzą go ludzie – mówi Stevens o uczonych malujących ptasie gardziółka. – Dlatego trudno o jakieś konkluzje na temat tego, co to by miało znaczyć”. Aby zweryfikować pomysły Stevensa, niezbędna okazała się ptasia zabawa w chowanego na zboczach gór w dalekiej Japonii.

Ptasie mózdzki

Badaczom zajmującym się tym, jak działa zmysł wzroku, trudno sobie wyobrazić, co widzą ptaki. Oko ptaka nie działa tak jak nasze. Wiele ptaków potrafi postrzegać światło ultrafioletowe, które ma długość fali mniejszą niż 400 nanometrów. Według Stevensa udało się to przekonująco wykazać w latach siedemdziesiątych XX wieku. Wiele innych zwierząt, w tym niektóre gatunki owadów, gadów, płazów i ryb, także widzi światło ultrafioletowe. O tym, że mrówki potrafią wykrywać światło ultrafioletowe, wiemy od czasu badań prowadzonych w latach dziewięćdziesiątych XIX wieku przez bankiera, uczonego i liberalnego polityka Johna Lubbocka (1834–1913). Z racji niezwyklego połączenia swoich zainteresowań Lubbock

zasłużył sobie na karykaturę w piśmie „Punch” z 1882 roku, w którym przedstawiono go jako latającego owada. „Jakże ta pracowita pszczołka wzbogaca swoje błogie godziny, badając podczas świąt państwowych dziwne owady i dzikie kwiatki!” Jak widzieliśmy na przykładzie Santschiego, świat mrówek przyciąga entuzjastów, którzy na co dzień w pracy zawodowej nie zajmują się mrówkami. Lubbock był sąsiadem Karola Darwina; najwyraźniej okolice Downe w hrabstwie Kent nie były najlepszym miejscem do życia, jeśli było się małym zwierzęciem – ryzyko, że zostaniesz złapany przez jakiegoś przyrodnika, było tam większe niż gdzie indziej.

Niemniej przyrodnicy, podobnie jak inni ludzie, mają 3 rodzaje czopków, czyli fotoreceptorów, w siatkówce, wrażliwej na światło części gałek ocznych. W każdym czopku znajduje się pigment najbardziej czuły na światło czerwone (duże długości fal), zielone (średnie długości) albo światło niebieskie (małe długości fal). Jednak ptaki mają o jeden rodzaj więcej. Mają czopki czerwone, zielone i niebieskie, ale mają także, w zależności od gatunku, rodzaj czopków, które reagują na światło fioletowe i odrobinę ultrafioletu albo na ultrafiolet. Ptaki są więc tetrachromatyczne, podczas gdy my jesteśmy trichromatyczni. Niewykluczone, że niektórych ludzi także cechuje tetrachromatyzm i potrafią widzieć więcej barw niż pozostali, nie jest jednak jasne, w jaki sposób u tych szczęśliwych jednostek dodatkowe czopki są połączone z resztą. Ogólnie rzecz biorąc, ludzkie czopki wykrywają odrobinę ultrafioletu, lecz nie są bardzo czułe w tym zakresie. W dodatku soczewka naszego oka blokuje większość światła ultrafioletowego, nie dopuszczając go do siatkówki. A zatem nie widzimy barwnych wzorów wielu kwiatów ani ubarwienia zwierząt, które po prostu są poza naszym zasięgiem.

Błędne przekonanie, że ptaki widzą tak samo jak ludzie, w efekcie blokowało nasze poznanie ich biologii. Uczni zajmujący się badaniem postrzegania wzrokowego, jeśli chcą uzyskać pełny obraz, zamiast liczyć na

własne zmysły, muszą więc odwoływać się do pomocy techniki. „To jest duża część świata [ptaków], którego sami nie dostrzegamy – mówi Stevens. – Potrzeba mnóstwa specjalistycznego sprzętu, aby zrozumieć, jaki rodzaj informacji wizualnej dociera do ptaka. Dzięki temu badania stają się bardziej interesujące i towarzyszą im większe wyzwania”.

Uwaga, ptaszek

Wracamy do wyjściowego pytania: czy pisklęta kukułki używają bodźców supernormalnych? Aby się o tym przekonać, Stevens wyruszył na zbocza góry Fudzi w Japonii, żeby wziąć udział w poszukiwaniach kukułek z gatunku kukułka kreskowana (*Cuculus fugax*), prowadzonych przez Keitę Tanakę z japońskiego laboratorium RIKEN oraz Uniwersytetu Rikkyo. Podobnie jak kukułka zwyczajna, która stanowi główny obiekt zainteresowań Stevensa, azjatycka kukułka kreskowana usuwa wszystkich rywali z gniazda bądź jako jajka, bądź jako pisklęta. Jej dziób, kiedy go otworzy szeroko, ma, przynajmniej dla ludzkiego oka, barwę intensywnie żółtą (pisklęta ptaków gospodarzy mają żółtopomarańczowe gardziołka). Jednak ta kukułka nie poprzestaje na odpowiednim odpicowaniu swojego gardziołka. Pisklęta kukułki kreskowanej mają także żółte pasma na skórze, umiejscowione od spodu każdego ze skrzydeł. Dzięki tej sztuczce przywodzą przybranych rodziców do przekonania, że gąb do wykarmienia jest więcej; kiedy Tanaka pomalował żółte pasma u spodu skrzydeł pisklaka na czarno, przybrani rodzice przynosili mniej jedzenia. Czasami rodzice zastępczy tak bardzo dają się zwieść widokiem tego żółtego pasma, że choć kształtem nie przypomina ono rozwartego dzioba, usiłują wtykać jedzenie w to miejsce. „Gniazda ptaków gospodarzy zwykle znajdują się w półmroku – opowiada Stevens. –

Lubią dziury [w ziemi] u spodu gęstwiny powojów, więc przypuszczalnie nie trzeba naśladować kształtu rozwartego dzioba. [Pasma na skórze] to zasadniczo żółta plama”.

Taki wzór ubarwienia skrzydeł prawdopodobnie występuje tylko u kukułki kreskowanej. Czy to jest bodziec supernormalny? Tanaka stanął wobec poważnego wyzwania: musiał zorientować się, co widzą przybrani rodzice kukułki kreskowanej. Razem z kolegami przywołali więc na pomoc fizykę. Najpierw światło odbite od żółtych pasm u podstawy skrzydeł oraz rozwartego dzioba (jego „widmo refleksyjności”) zmierzili spektrofotometrem – wąską sondą, która analizuje, jakie długości światła są obecne w próbce. Tanaka trzymał czujnik niedaleko otwartego dzioba pisklaka albo obok pasm u spodu skrzydeł i rejestrował, jakie długości fali światła odbija. Jednak łatwiej powiedzieć, niż zrobić. Obserwowanie ptaków w miejscu, które jest jedną z najbardziej ikonicznych atrakcji turystycznych Japonii, wydaje się idylliczne jako sposób na spędzanie wakacji, ale te ptaki naprawdę trudno wytropić, jak wyjaśnia Stevens. „Żyją w miejscach, gdzie trudno się pracuje, wysoko w górach, a do tego liczba osobników tego gatunku jest niewielka: zdarza się, że w całym sezonie badań terenowych znajdziesz jedynie kilka”. Kiedy w 2010 roku Stevens odwiedził główny rejon badań prowadzonych przez Tanakę, na zboczach góry Fudzi na wysokości ponad 2000 metrów n.p.m., przez 3 tygodnie zespół badaczy znalazł zaledwie 2 pisklęta kukułki kreskowanej i to mimo wieloletniego doświadczenia japońskiego badacza.

Aby wytropić rzadkiego ptaka, który żyje w lasach i składa jaja w jamach ukrytych w zaroślach, trzeba wiedzieć, gdzie takie gniazda mogą występować w zależności od rodzaju roślinności. „Potem zaczynasz szukać w tych miejscach – wyjaśnia Stevens. – Najpierw starasz się znaleźć jak najwięcej gniazd ptaków gospodarzy, a potem masz nadzieję, że przynajmniej

w niektórych z nich znajdziesz kukułki”. Można także wypatrywać ptaków wracających do gniazd i wylatujących z nich. „Musisz postarać się przeszukać wszystkie te gniazda” – dodaje badacz.

Kiedy jego zespół natrafił na takie gniazdo, Tanaka wyjmował pisklęta, jedno po drugim, i dokonywał pomiarów odbitego światła; w tym czasie Stevens rejestrował obraz kamerą cyfrową wrażliwą na ultrafiolet. Pisklęta kukułki kreskowanej ważą do 90 gramów, kiedy opuszczają gniazdo, podczas gdy pisklaki modraczka zwyczajnego (*Tarsiger cyanurus*), który zwykle gości lęgowego pasożyta, ważą 17 gramów. W sumie Tanaka dokonał pomiarów u 10 piskląt modraczka zwyczajnego, z 5 lęgów, oraz 6 piskląt kukułki kreskowanej – 5 z gniazd modraczka zwyczajnego i jednego z gniazda tajgówki japońskiej (*Cyanoptila cyanomelana*). Dokonanie pomiarów dotyczących piskląt ptaków gospodarzy zajęło badaczom rok, znalezienie 6 piskląt kukułki kreskowanej 3 lata.

Wszystko szeroko rozdziawione

Pomiary terenowe pokazały, jakie długości fal trafiają do oczu ptasich rodziców zastępczych, ale to nie był pełen obraz tego, co widzą te ptaki. Aby spełnić pierwsze kryterium testu na bodziec supernormalny, szeroko rozwarty dziób pisklęcia kukułki i jasne pasma na spodzie jego skrzydeł musiałyby silniej pobudzać oczy rodziców zastępczych niż gardziołka ich własnych pisklaków. To, co ptak dostrzega, zależy od wrażliwości jego czopków i pręcików (te ostatnie dobrze działają przy słabym oświetleniu, ale nie widzą barw) na różne długości fal świetlnych. W ten sam sposób człowiek obdarzony pełną zdolnością widzenia barw potrafi dostrzec liczbę złożoną z czerwonych kropek, ukrytą w morzu kropek zielonych, ale ktoś, kto nie

potrafi rozróżniać barwy czerwonej i zielonej, nie zobaczy tej liczby, choć do oczu jednego i drugiego docierają fale tej samej długości.

Badacze musieli więc spojrzeć na długości fal zarejestrowane przez swój spektrofotometr, by tak rzec, z lotu ptaka. Za poradą Stevensa Tanaka zbudował matematyczny model ptasiego widzenia. Wiedząc, jakie długości fal docierają do siatkówki w ptasim oku, jakie ma rodzaje czopków i jaka jest ich wrażliwość na różne barwy, uczeni mogli zbudować model pokazujący, jakie obrazy odbiera ptak, i domyślić się, jak wygląda dla niego świat (a raczej rozdziawiony dziób pisklaka albo plama na spodzie jego skrzydła).

Czy jesteś (super)normalny?

Stevens założył, że wrażliwość ptaków gospodarzy na różne długości fal jest taka sama jak u ich bliskiego kuzyna szpaka zwyczajnego (*Sturnus vulgaris*), wykorzystując wcześniejsze pomiary innych badaczy, którzy rzutowali wąskie wiązki światła na wizualne pigmenty w czopkach szpaka i monitorowali, jak wiele z tego światła się odbija. „Na podstawie tych pomiarów, oraz innych związanych z nimi informacji, można obliczyć, jak wiele światła, w kategoriach długości fali, absorbuje każdy rodzaj fotoreceptorów” – wyjaśnia Stevens. Przy określaniu wrażliwości czopków można wykorzystać także współczesne metody badań genetycznych pozwalające ustalić, jakie proteiny różnych pigmentów się w nich znajdują.

Pomiary dokonane przez Tanakę spektrofotometrem wykazały, że rozwarty dziób pisklęcia kukułki i plama na spodzie jego skrzydeł wyglądają inaczej niż gardziołko pisklęcia modraczka zwyczajnego. Odbijają mniej światła o dużej długości fali, dzięki czemu dla ludzkiego oka wydają się superzółte, znacznie zaś więcej światła ultrafioletowego, dzięki czemu być

może rozwarty dziób i plamy na spodzie skrzydeł kukułki są bardziej jaskrawe w mrocznych miejscach, gdzie zwykle znajdują się gniazda modraczków. Wstawienie danych z pomiarów do modeli ptasiego widzenia wykazało, że rozwarty dziób pisklęcia kukułki kreskowanej jest bardziej widoczny dla przybranych rodziców z gatunku modraczka i pobudza ich czopki silniej niż rozwarcie dzioba własnych piskląt. To samo odnosi się do plam na spodzie skrzydeł, tylko w jeszcze większym stopniu. Pisklak pasożyt bije w tej kategorii na głowę swoich rywali z rodziny modraczków.

„[Gardziółko pisklęcia kukułki] jest jaśniejsze i bardziej intensywne niż normalnie rozwarty dziób pisklęcia o żółtym gardle – wyjaśnia Stevens. – To jeden z dwu warunków niezbędnych, aby uznać bodziec za supernormalny. Po pierwsze, musi wystąpić przesadzona wersja zwykłego bodźca, w tym przypadku rozwarcia dzioba, a po drugie, musi zachęcać gospodarzy, aby z tego powodu przynosili więcej jedzenia”.

Pasmo na spodzie skrzydła rzeczywiście skłania rodziców do intensywniejszego przynoszenia żywności, jak wykazał Tanaka, zamalowując je na ciemno. Żeby w pełni potwierdzić supernormalny status tych bodźców, badacze musieliby jednak sprawdzić, w jaki sposób rodzice zastępczy kukułki reagują na bodźce przesadnie silne, a nie bodźce zredukowane. Nie wiadomo także, jaką rolę odgrywa światło ultrafioletowe. Choć mamy jeszcze inną wskazówkę, tym razem z dziedziny biologii, a nie fizyki, że coś jest na rzeczy. Aby pisklę kukułki mogło pokazywać pasmo na skrzydle, spód jego skrzydeł nie jest porośnięty piórami, co sprawia, że pisklęciu trudniej zachować ciepło. W dodatku pisklę, kiedy chce pokazać to pasmo jasnej barwy, wykonuje krótkie, pochłaniające kalorie machnięcie skrzydłem. Wytwarzanie jaskrawych barw – czy to na skrzydle, czy wewnątrz gardła – wymaga wydatkowania jeszcze więcej energii, tym razem niezbędnej do wyprodukowania silnego pigmentu z pożywienia, którą można by

spożytkować do odżywienia innej części ciała. Można zatem z pewnym prawdopodobieństwem powiedzieć, że niezależnie od tego, czy są to bodźce supernormalne czy nie, superjasna barwa rozdziawionego dzioba i pasmo jasnej barwy na spodzie skrzydła dają piskletom kukułki przynajmniej pewną przewagę. Inaczej cała rzecz nie byłaby warta zachodu.

Pomiary Tanaki oraz badania nad mechanizmem widzenia prowadzone wspólnie ze Stevenssem dowiodły, że bodźce wysyłane przez kukułkę kreskowaną przynajmniej w połowie spełniają kryteria bodźców supernormalnych. Jak dla nas to i tak wystarczy. Tylko dzięki odkryciu tego, jak bardzo różni się świat oglądany okiem ptaka, który postrzega fale ultrafioletowe, od naszego, badacze mogli rozwikłać zagadkę, w jaki sposób te podstępne darmozjady manipulują swoimi opiekunami. Wyniki dotyczące kukułki kreskowanej wskazują, że jaskrawa barwa rozdziawionego dzioba piskląt kukułki zwyczajnej, choć na razie nie mamy w tej sprawie rozstrzygających dowodów, także może działać jako bodziec supernormalny. Odpowiedź może kryć się tuż przed (ptasimi) oczami.

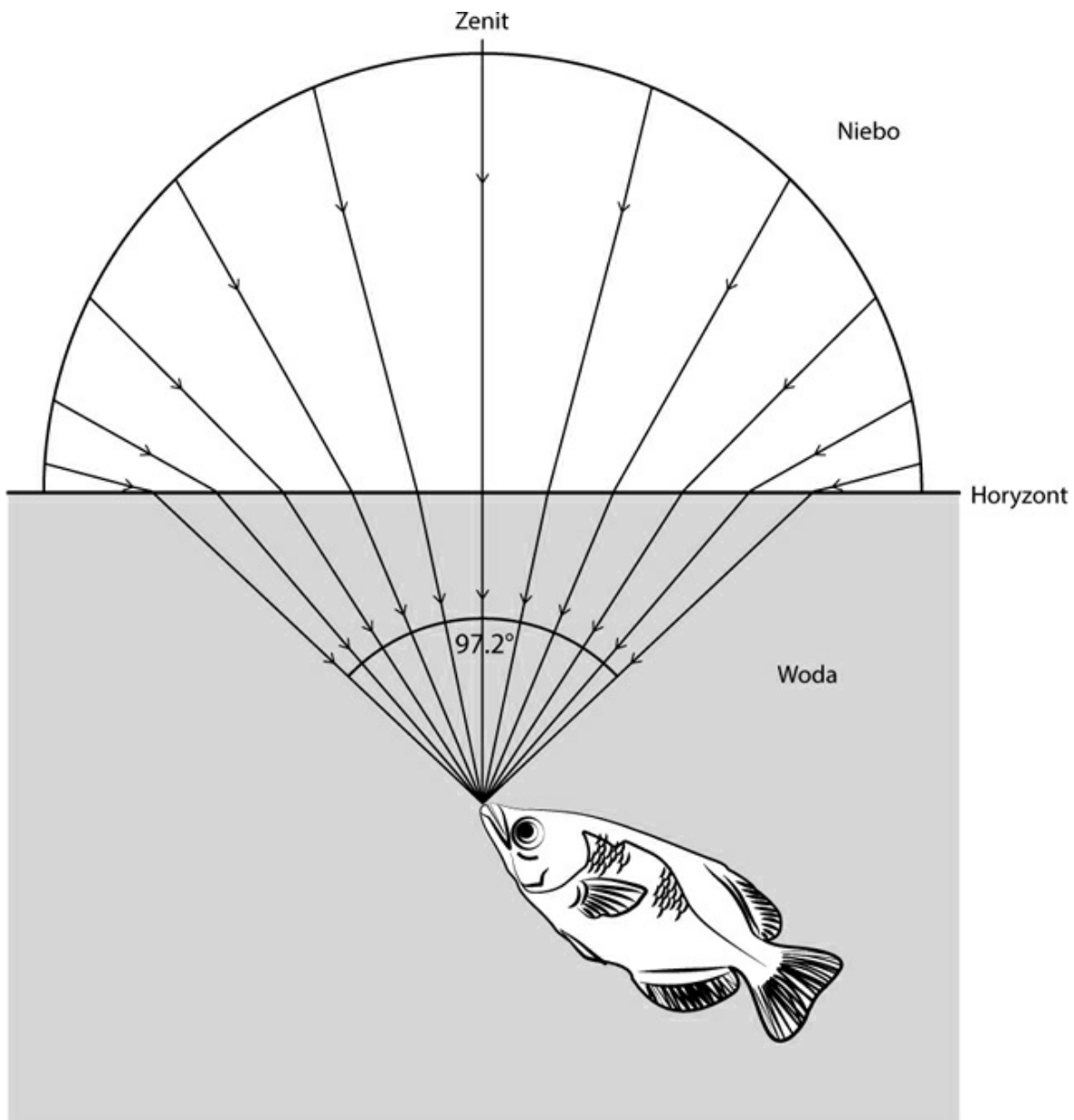
Na pierwszy rzut oka kukułki, mrówki i pszczoły – zwierzęta, którymi zajmowaliśmy się dotąd ze względu na to, jak postrzegają światło – nie mają ze sobą wiele wspólnego. Natomiast jeśli chodzi o widzenie, z całą pewnością jest inaczej. Wszystkie wspomniane stworzenia postrzegają światło ultrafioletowe, choć bardziej podstawowy fakt polega na tym, że wszystkie widzą światło rozchodzące się w powietrzu. Podobnie jak my, o ile nie zaczniemy pływać. Wtedy wszystko staje się mniej jasne – światło pod wodą nie zachowuje się bowiem w taki sam sposób jak w powietrzu, podobnie jak dźwięk.

Refleksy na wodzie

Oślepiające światło słońca i łąka usiana kwiatami; na brzegu jeziora rozlega się śpiew ptaków. Ale nie usłyszycie tego śpiewu, nie poczujecie zapachu kwiatów ani ciepła słońca na twarzy, jeśli jesteście pod wodą – w swoim własnym świecie. Złapaliście bakcyła nurkowania. Jeżeli chcecie podziwiać słońce, musicie spoglądać w górę. Na spokojnej powierzchni wody ujrzycie całe niebo ściśnięte w jasny krąg otoczony przez ciemności. Zupełnie jakbyście patrzyli w głąb mrocznej katedry rozświetlonej przez promienie słońca. Ujmując rzecz bardziej naukowo, cała hemisfera świata znajdującego się ponad powierzchnią wody zostaje ściśnięta w stożek światła rozpięty pod kątem 97,5 stopnia (48,6 stopnia po każdej stronie pionu). Ten jasny okrąg na powierzchni wody nazwano oknem Snella na cześć Willebrorda Snella (1580–1626), holenderskiego astronoma i matematyka, który sformułował prawo opisujące, w jaki sposób światło załamuje się – albo mówiąc inaczej, ulega refrakcji – kiedy wpada do wody.

Snell nie był pierwszym badaczem, który starał się zrozumieć zjawisko załamania się promienia słonecznego. Ten zaszczyt przypada grecko-egipskiemu uczonemu Ptolemeuszowi, który w 150 roku n.e. sformułował zasadę łączącą kąt, pod jakim światło pada na powierzchnię wody, z kątem, pod jakim kontynuuje ono wędrówkę w głębi cieczy. Ilekroć światło przechodzi z jednego ośrodka do drugiego, zmienia swoją szybkość, ulegając załamaniu, chyba że pada na granicę między ośrodkami pod kątem prostym. Światło w powietrzu pędzi z prędkością około 300 milionów m/s. Żaden obiekt nie porusza się szybciej – to jedno z wielkich odkryć Einsteina. Ale w wodzie światło zwalnia do zaledwie 225 milionów m/s. Jeśli promień światła pada na granicę między powietrzem a wodą pod pewnym kątem różnym od zera, to zwolnienie prędkości załamuje tor promienia w kierunku

linii prostopadłej do powierzchni wody, innymi słowy, światło wędruje w dół pod bardziej ostrym kątem.



Rysunek 6.2 Wielki obraz. Światło ugina się, albo inaczej ulega refrakcji, w chwili przejścia z powietrza do wody. Powstaje wtedy tak zwane okno Snella, dzięki któremu nurkowie i zwierzęta żyjące pod wodą widzą całą półkulę nieba ściśniętą w jasny krąg ponad nimi.

Żeby zrozumieć, dlaczego tak się dzieje, można sobie wyobrazić promień

światła jako szereg zombi pędzących przed siebie w taki sposób, że każdy z nich trzyma rękę, identycznej długości, na ramieniu zombi pędzącego przed nim. Zasady tego fikcyjnego świata powiadają, że każdy zombi musi – podobnie jak górki i dołki fali świetlnej – zachować tę samą dzielącą go od innych odległość. Wszystko toczy się bez przeszkód do chwili, gdy zombi – jęcząc i zrywając bandażę – zbliżą się pod pewnym kątem do linii narysowanej na podłodze. Gdy pierwszy zombi przekracza tę linię, musi zwolnić z powodów związanych z biologią zombi, zbyt skomplikowanych, aby teraz się wdawać w szczegóły. Pozostali zombi, nie napotykając jeszcze tej biologicznej przeszkody, pędzą dalej z dotychczasową prędkością, aż do momentu, w którym sami nie dotrą do wspomnianej linii. Aby utrzymać szybciej poruszających się zombi nadal za sobą na wyciągnięcie ręki i nie dopuścić do powstania sterty zombi wpadających na siebie, pierwszy zombi musi zmienić kierunek ruchu w stosunku do pierwotnej trasy. Gdy następny zombi przekracza linię, on także musi zwolnić i skręcić. Kolumna zombi, jeden po drugim, zmienia więc kierunek ruchu w chwili przekraczania linii. Jeśli jednak zombi maszerują pod kątem prostym do tej linii, zombi, którzy właśnie ją przekroczyli, nie muszą uciekać z drogi i maszerują dalej w tym samym kierunku.

Być może dlatego że Ptolemeusz nigdy nie spotkał zombi, zaproponowana przez niego formuła – łącząca kąt, pod jakim światło pada na powierzchnię wody, z kątem, pod jakim kontynuuje swój ruch w cieczy – była błędna. Zasługa poprawnego sformułowania tej zasady powinna przypadać perskiemu geniuszowi z X wieku, który nazywał się Ibn Sahl. Ale tak się nie stało. Zamiast tego prawo znane jest jako prawo Snella, nazwane tak na cześć człowieka, który udzielił tej samej odpowiedzi kilkaset lat później. Prawo Snella mówi, że sinus kąta, pod jakim światło wpada do wody, w stosunku do linii pionowej, jest 1,33 razy większy od sinusa kąta,

pod jakim światło biegnie dalej w wodzie (także w stosunku do linii pionowej). Sinus kąta przyjmuje wartości od 0, dla kąta 0 stopni, do 1, dla kąta 90 stopni, a zatem zgodnie z prawem Snella, a także z prawami światła zombi, promień światła wpadający do wody pod kątem prostym nie ulega załamaniu.

Co to wszystko znaczy w odniesieniu do naszego jeziora? Po wykonaniu obliczeń przekonacie się, że światło padające na powierzchnię wody pod kątem 30 stopni w stosunku do pionu wędruje w wodzie dalej pod kątem 22 stopni w stosunku do pionu. Jeśli wpada do wody pod kątem 60 stopni, porusza się następnie pod kątem 41 stopni. Kiedy porusza się niemal horyzontalnie, załamuje się w wodzie pod kątem 48,6 stopnia. Dlatego właśnie stożek światła pod wodą rozciąga się o 48,6 stopnia po każdej stronie waszej głowy, a mimo to obejmuje całe światło docierające z góry.

Zagnij to jak Snell

Zjawisko refrakcji przydaje się, kiedy człowiek nosi okulary albo szkła kontaktowe, ponieważ soczewki w taki sposób zakrzywiają światło wpadające do oka, aby tworzyło ostry obraz na siatkówce. Refrakcja rodzi jednak problemy w życiu stworzeń żyjących na granicy żywiołów, tam gdzie stykają się światy wodny i powietrzny. Możecie sami się o tym przekonać, jeśli spróbujecie wyciągnąć spodniki kąpielowe z dna basenu albo złapać na żyłkę ciernika pływającego w słoiku po dżemie, albo pogłaskać pstrąga w podbrzusze: wasza zdobycz zawsze będzie głębiej, niż wam się wydaje. Nasze oczy i mózg nie uwzględniają bowiem załamania: zakładają, że światło odbite od spodenek kąpielowych, albo ryby, nie zmienia kierunku

i większy kąt, pod jakim teraz biegnie ku nam w powietrzu, to kąt, pod jakim pokonało całą swoją drogę.

Tymczasem strzelczyk indyjski, 7 gatunków rybek z rodzaju *Toxotes*, żyjących w rzekach, wodach przybrzeżnych i jeziorach Azji Południowo-Wschodniej i Australii, potrafi strącać owady siedzące na liściach i gałęziach zwisających nad wodą, mimo że jego oczy znajdują się pod jej powierzchnią. Te kremowobiałe ryby z brązowawoczarnymi kropkami albo pionowymi pręgami na bokach mają 10 do 15 centymetrów długości i potrafią błyskawicznie wypluć z pyska strumień wody, który z niezwykłą precyzją trafia w ofiarę. Niezależnie od zjawiska załamania światła strzelczyk indyjski trafia do celu niemal za każdym razem; trafiony owad spada do wody i zostaje szybko pożarty żywcem. Strzelczyki to prawdziwi mistrzowie w pluciu na odległość. Potrafią wystrzelić kroplę wody na odległość 10 razy większą od długości własnego ciała. Aby mu dorównać, musielibyśmy, przy zachowaniu proporcji, celnie pluć na odległość 20 metrów. W chwili gdy piszemy te słowa, rekord świata wśród ludzi w pluciu na odległość, zapisany w *Księdze rekordów Guinnessa*, wynosi 33,62 metra. Dzierży go Brian „Młoda Strzelba” Krause z Michigan, w USA, kilkakrotny zwycięzca międzynarodowych mistrzostw w pluciu pestką czereśni na odległość.

Jednak w naszej książce miano mistrza w pluciu bezapelacyjnie otrzymuje strzelczyk indyjski, ponieważ o wiele trudniej strącić owada siedzącego na patyku, kiedy się pluje spod wody, niż wystrzelić pestkę czereśni przed siebie – po prostu byle dalej. W dodatku ryba ma trudniej – właśnie z powodu refrakcji, która sprawia, że cel wydaje się usytuowany wyżej, niż jest w rzeczywistości (o ile smaczny kąsek nie znajduje się bezpośrednio nad głową strzelca). Mamy tu odwrócenie sytuacji, w jakiej sami się znajdujemy, usiłując złapać rybę pływającą w słoiku, ponieważ wtedy wydaje się, że nasz cel znajduje się bliżej, niż jest w rzeczywistości.

Jeśli światło odbite od owada uderza w powierzchnię wody pod kątem 25 stopni względem pionu, wchodzi do wody pod kątem zaledwie 10 stopni w stosunku do pionu. Różnica nie wydaje się duża, ale gdyby ryba miała odtworzyć ścieżkę promienia światła wpadającego pod kątem bardziej ostrym niż ten, pod jakim dociera ono do oka owada, cel będzie wydawał się wyżej. Owad znajdujący się metr nad powierzchnią wody będzie sprawiał wrażenie, że znajduje się 35 centymetrów wyżej, niż jest w rzeczywistości.

Snellowizja

Dlaczego strzelczyk indyjski nie pluje po prostu w stronę owadów znajdujących się bezpośrednio nad swoją głową? Wtedy nie ma refrakcji i łup znajduje się dokładnie tam, gdzie ryba go widzi. Strzelczyki czasami tak robią, ale na ogół wolą postępować inaczej. Nie dlatego, żeby się martwiły, że owad spadnie im na głowę. Rzecz w tym, że strzelczyk, który chciałby wystrzelić strumień wody prosto do góry, musiałby całe ciało ustawić pionowo. To ryzykowna pozycja – jeśli dostrzeże go jakiś ptak kołujący nad wodą (albo inna ryba znajdująca się pod wodą), strzelczyk nie ma jak uciec. Przyjmując pozycję bardziej horyzontalną, może szybciej rzucić się do ucieczki. Kiedy nic mu nie przeszkadza, strzelczyk indyjski pluje zwykle pod kątem od 45 do 110 stopni. Ale najbardziej lubi kąt 75 stopni w stosunku do poziomu. Plucie pod kątem ma także inne zalety, ponieważ dzięki temu ryba może strącać owady siedzące na szczycie gałązek biegnących horyzontalnie.

Niezależnie jednak od kąta plucia strzelczyki trafiają w cel z niezwykle skuteczną skutecznością. Niemal zawsze strącają swoją ofiarę za pierwszym razem; u jednego z gatunków strzelczyka współczynnik skuteczności wynosi ponad 94 procent. Najpierw chybić, a potem poprawka przy następnym strzale? To

nie w stylu strzelczyka. Dlaczego tak dobrze im idzie? Czy strzelczyk indyjski rodzi się z umiejętnością uwzględniania refrakcji światła oraz zdolnością do uwzględniania grawitacji, która zakrzywia ku dołowi tor strumienia wypływającej przez rybę wody, czy musi się tego nauczyć? Aby poznać odpowiedź, posłuchajmy Shelby'ego Temple'a z uniwersytetu w Bristolu.

Wypluwanie rozwiązania

Jako ośmiolatek Temple, mieszkający w latach osiemdziesiątych w Kanadzie, oglądał telewizyjny film dokumentalny o strzelczykach z udziałem najwybitniejszego brytyjskiego twórcy filmów przyrodniczych Davida Attenborougha. „To się działo gdzieś na Borneo i natychmiast chciałem zobaczyć takie strzelczyki na żywo – wspomina Temple. – Dopiero kiedy miałem 12 lat, uświadomiłem sobie, że można je kupić w miejscowym sklepie zoologicznym”. Na szczęście to odkrycie nie osłabiło zainteresowań Temple'a i jego pragnienie, by rozpracować sekrety strzelczyka, ostatecznie zawiadło go z Kanady do Australii.

Na uniwersytecie stanu Queensland, w Brisbane, Temple i jego koledzy odkryli, że strzelczyk z gatunku *Toxotes chatareus* swoje niezwykle umiejętności łowieckie zawdzięcza budowie siatkówki, która jest przystosowana do życia w pobliżu styku wody i powietrza. W dolnej części jego siatkówki znajduje się do 50 tysięcy fotoreceptorów czułych na promienie świetlne, stłoczonych na powierzchni 1 milimetra kwadratowego, a więc o gęstości 10 razy większej niż w pozostałej części oka. W trakcie ewolucji oko strzelczyka ukształtowało się w taki sposób, że całe światło dochodzące znad powierzchni wody, ściśnięte w oknie Snella, ląduje na tym

superczułym fragmencie siatkówki. Kiedy strzelczyk indyjski dostrzeże smacznego owada, zatrzymuje w tym obszarze siatkówki obraz swojego łupu, starając się nie ruszać okiem, a jednocześnie obraca całe ciało w taki sposób, aby precyzyjnie namierzyć kierunek plucia. Ta część siatkówki odbiera także światło czerwone, zielone i niebieskie, a więc dobrze nadaje się do wykrywania owadów siedzących na powierzchni liści. Reszta siatkówki z kolei zapewnia strzelczykowi bezpieczeństwo, chroniąc go przed atakiem drapieżnika. Niewielka ryba, pływając blisko powierzchni wody, naraża się na duże ryzyko, ponieważ łatwo ją dostrzec z powietrza, a jednocześnie jest jasno oświetlona, a więc dobrze widoczna dla drapieżników czających się poniżej. Środkowa część siatkówki strzelczyka bardzo dobrze odbiera światło niebieskie i czerwone, co pozwala mu wykrywać sylwetki ptaków na tle błękitnego nieba. Natomiast obszar na szczycie siatkówki wykazuje największą czułość na światło zielone i żółte, dzięki czemu strzelczyk może zauważyć jasne albo ciemne obiekty, takie jak drapieżne ryby, w mrocznych wodach poniżej.

W Australii Temple uświadomił sobie, że jedyny sposób, aby się dowiedzieć, czy strzelczyki rodzą się z umiejętnością celnego plucia, czy też muszą się wszystkiego nauczyć, to obserwowanie ich, gdy plują po raz pierwszy. Jeśli za pierwszym razem strzelczyki trafią w cel, ich talenty muszą być wrodzone, podobnie jak umiejętności świeżo wyklutych żółwi z rozdziału 5, które pędzą prosto do oceanu, albo gąsienicy robiącej kokon czy ptaka budującego gniazdo. Jeśli małe strzelczyki potrzebują jednak kilku podejść, to znaczy, że uczą się metodą prób i błędów.

Łowienie rezultatów

Skąd wziąć świeżo urodzone strzelczyki? Temple postanowił wyruszyć ze swego laboratorium, położonego mniej więcej w połowie australijskiego wschodniego wybrzeża, w południowo-wschodnim stanie Queensland, w stronę rzeki o nazwie Laura, leżącej na północy. Tam z pomocą miejscowego hodowcy ryb schwytał kilka egzemplarzy *Toxotes chatareus*, po czym wysłał ryby do domu i czekał, aż złożą jaja. W sumie uzyskał 35 świeżo urodzonych osobników, ale ponieważ większą część narybku obiecał zaprzyjaźnionemu hodowcy, musiał zadowolić się zaledwie 9 rybkami, które umieścił w osobnych akwariach. Jak na badania, to niewiele osobników, więc z ogromnym napięciem czekał na rezultaty. Strzelczyki potrafią polować, plując, dopiero gdy mają około 2 tygodni i 2 centymetry długości. Aby jego maluchy nie zaczęły pluć przedwcześnie, Temple przykrył każdy zbiornik warstwą folii pęcherzykowej. Kiedy nadeszła właściwa pora, ustawivszy w gotowości kamerę wideo, ściągnął folię z jednego akwarium, po czym jakieś 10 centymetrów nad wodą umieścił na liściu muszkę owocową. To był moment pełen napięcia. Czy strzelczyk pierwszym splunięciem trafi w cel, w sytuacji gdy nigdy wcześniej tego nie robił?

Wyniki nie były zachwycające. Żaden wspinały strumień wody, jedynie niewielkie strzyknięcie. „To splunięcie sięgnęło zaledwie 1 centymetra powyżej powierzchni – opowiada Temple. – Ale i tak to była najśłodsza rzecz, jaką widziałem”. Czyżby się okazało, że strzelczyki indyjskie u zarania życia plują marnie i dopiero potem się poprawiają? Zaraz, zaraz, nie tak szybko! Temple zapomniał, że większość ryb rośnie jedynie o tyle, o ile pozwala im na to środowisko. Zbiorniki były małe, ryba była więc, jak na standardy strzelczyków, oseskiem i cały rezultat nie miał większego znaczenia. Temple potrzebował dorosłego strzelczyka, żeby mieć pewność. I tu pojawił się kłopot. Z 9 ryb, z którymi zaczynał eksperyment, 8 albo wyskakiwało na powierzchnię folii, albo postanawiało raczej skoczyć, a nie

plunąć, żeby złapać ofiarę. Pozostawała więc tylko jedna. Naprawdę wiele od niej zależało. Temple nie nadał jej imienia, ale my nazwiemy ją Archie.

Temple przeniósł Archiego do większego zbiornika i poczekał jeszcze kilka miesięcy. Kiedy nadszedł wreszcie wielki dzień, ściągnął plastikową folię i... Archie trafił w cel za pierwszym razem. Ta ostatnia z rybek Temple'a została celebrytą: Archie wystąpił w dwu australijskich programach telewizyjnych. Czy strzelczyk indyjski potrafi pluć bardzo celnie, uwzględniając załamanie, za pierwszym razem? Niestety, nie możemy udzielić ostatecznej odpowiedzi. W nauce nie wyciąga się wniosków z jednego przykładu, a Temple nie miał więcej ryb ani pieniędzy z grantów. „Sprawa jest otwarta, ale przeczucie mówi mi, że strzelczyki ewolucyjnie ukształtowały się w taki sposób, aby pluć bezbłędnie – mówi. – To nie jest coś, czego muszą się nauczyć”. Nadal nie wiemy dokładnie, w jaki sposób ryba uwzględnia zjawisko załamania. To wszystko jest ciągle bardzo śliskie.

W czerwona dal

Większość zwierząt żyjących w wodzie spędza życie znacznie głębiej niż strzelczyk i nie musi martwić się o refrakcję światła, które przenika do wody z powietrza. Mają inne problemy.

Niewielka ośmiornica z gatunku *Japetella heathi* unosi się w wypełnionym wodą naczyniu, które umieszczono w półmroku laboratorium na pokładzie statku dryfującego u zachodnich wybrzeży Ameryki Południowej. To stworzenie o długości 5 centymetrów, ze swoimi ogromnymi oczami, jak gdyby przyklejonymi do owalnego ciała, i licznymi kończynami wijącymi się jak zmierzwione włosy, przypomina zabawkę z zestawu Mister Potato Head. Nagle pojawia się rozbłysk niebieskiego

światła i ośmiornica robi się cała czerwona niczym nastolatka oblewająca się rumieńcem na dyskotecę.

W tej zmianie barwy przez ośmiornicę nie ma nic niezwykłego; biolodzy znają to zjawisko od lat. Ośmiornica jest mistrzynią kamuflażu: ma mnóstwo nóg, na których chętnie staje, jeśli uzna, że powinna zmienić wygląd. Wściekła ośmiornica, jak wyjaśnia ekspert od widzenia zwierząt żyjących w głębi morza Sonke Johnsen z Duke University w USA, dostaje białej gorączki i blednie na całym ciele, jeśli nie liczyć ciemnych kręgów wokół oczu jak u ducha. „Wygląda naprawdę złowrogo” – mówi Johnsen. Atakująca ośmiornica tuż przed uderzeniem zmienia barwę z brązowej na czarną. Samiec mątwy – bliskiej kuzynki ośmiornicy – kiedy stara się o względy samicy, idzie na całość i prezentuje wybrance serię barw szybko następujących po sobie. Co jeszcze bardziej imponujące, ten kameleon morskich głębin potrafi wykazać się prawdziwie jednostronnym podejściem do spraw męskiej urody, stosując kamuflaż w tej części ciała, która jest odwrócona od potencjalnej partnerki seksualnej. Sygnały towarzyszące zalotom są jak chodzenie po cienkiej linii rozpiętej między kuszeniem partnera a zwracaniem na siebie uwagi innego zwierzęcia, które chętnie cię pożre. Nie będzie być może niespodzianką, jeśli powiemy, że mątwy i inne głowonogi (inaczej cefalopody, od greckich słów oznaczających głowę i stopy), takie jak ośmiornice, należą zdecydowanie do najinteligentniejszych bezkręgowców. Co prawda, jeśli do konkursu stają ślimaki w skorupkach, albo bez nich, oraz kleszcze, osiągnięcie może wydawać się niezbyt imponujące. Niemniej, jeśli umieścimy za mątwą przedmiot, któremu brakuje pewnych elementów, jak zrobiła Sarah Zylinski, była koleżanka Johnsen, obecnie pracująca na uniwersytecie w Leeds, zwierzę będzie starało się dostosować wyglądem do otoczenia i swoim ubarwieniem wypełni brakujące miejsca.

„Praca z ośmiornicami jest zabawna – mówi Johnsen. – Łatwo zauważyć, co ośmiornice myślą, ponieważ widać to na ich skórze. My oblewamy się rumieńcem, robimy miny i tak dalej. One dają na swoich ciałach całe przedstawienie, które mówi nam, co się dzieje w ich głowach. Są fascynujące”. Ośmiornice zmieniają barwę, skurczając albo rozluźniając mięśnie woreczków czernidłowych, inaczej chromatoforów. Pod wpływem skurczu mięśni powstają kropki danej barwy, a kiedy mięśnie są rozluźnione, na skórze pojawiają się znacznie większe plamy. To tak, jakbyście mieli piegi, które mogą się pojawić na życzenie i zlewać się ze sobą.

Doskonałe umiejętności komunikacyjne ośmiornic przynoszą korzyść nie tylko im; także badanie ich zmysłu wzroku staje się łatwiejsze. „Nam, biologom, bardzo trudno się dowiedzieć, co się dzieje w umyśle innych zwierząt – opowiada Johnsen. – Ośmiornica (...) pokaże na powierzchni swojego ciała wzory, które powiedzą ci, co one widzą”. Jak wspomnieliśmy, są inteligentne. Choć nikt nie wie dlaczego, oktopody (oficjalna zbiorcza nazwa, pochodzi od greckich słów oznaczających osiem i stopę) są także bystre. „Inteligentne zwierzęta prawie zawsze należą do gatunków społecznych – wyjaśnia Johnsen. – Inteligencja rozwinęła się ewolucyjnie, aby umożliwić zwierzętom radzenie sobie ze skomplikowanymi sytuacjami społecznymi, w których trzeba pamiętać poszczególne osobniki, to, jak nas traktowały, i kto jest ważny, a kto nie. Słowem, to wszystko, co robimy na co dzień”. Jednak ośmiornice są całkowicie aspołeczne, a mątwy żyją wprawdzie w ławicach, jednak nie wydaje się, aby miały skomplikowaną hierarchię społeczną. Ta niezwykła inteligencja zwierzęcia żyjącego samotnie intryguje Johnseną.

Na miejsca, gotowi, start!

Skoro ośmiornica jest bystra, musi mieć jakiś powód do oblewania się rumieńcem, kiedy światło zmienia się na niebieskie. Odpowiedź, jak twierdzi Johnsen, kryje się w tym, co się dzieje pod wodą ze światłem. Jeśli jesteś nurkiem, znasz zjawisko okna Snella i problemy, z jakimi na co dzień zmagają się strzelcyk indyjski. Jeśli twój partner w nurkowaniu jest błądy, wydaje ci się, że jego twarz przybiera barwę zieloną, a jego usta czernieją, w miarę jak zanurzacie się coraz niżej. I tak jak świat dźwięków zmienia się pod wodą (zob. rozdział 4), podobnie dzieje się ze światłem. Woda ma większą gęstość niż powietrze, a co za tym idzie, silniej absorbuje i rozprasza światło. Barwy w wodzie ulegają zmianie, ponieważ ciecz intensywniej absorbuje światło o większych długościach fal, a więc takie, które ma dość energii, aby przekazać dodatkowego „kopa” wibracjom i rotacjom cząsteczek wody. W takiej cząsteczce energia fali świetlnej zamienia się w energię wewnętrzną. A zatem światło o większej długości fal – czerwone, pomarańczowe i żółte – dociera bliżej niż światło o mniejszej długości: fioletowe, niebieskie i zielone. Dlatego gdy nurkujemy głębiej, twarze różowe albo o żółtym odcieniu stają się zielone, podczas gdy czerwone usta albo krew wyglądają, jak gdyby były czarne. Z tego samego powodu rośliny jednokomórkowe, takie jak algi i fitoplankton, które potrzebują czerwonego światła do fotosyntezy, mogą przeżyć tylko w górnej warstwie oceanu do głębokości 200 metrów.

Jeśli jesteś rybą żyjącą w otwartych wodach, gdzie jest wystarczająco dużo światła, nie masz się gdzie ukryć. Wiele ryb, aby uniknąć potencjalnego niebezpieczeństwa, staje się transparentne (przezroczyste), dzięki czemu są niewidzialne dla spoglądających z głębiny drapieżników, które oczywiście w przeciwnym razie zobaczyłyby ciemny zarys na tle światła przenikającego

od góry. Inne ryby żyjące w głębinach stosują potrójną ochronę, aby z każdej strony zabezpieczyć się przed drapieżnikami: po pierwsze, od spodu ciała mają rozmieszczone fotofory – narządy emitujące światło – dzięki czemu nie rzucają cienia widocznego dla drapieżników z dołu; po drugie, mają czarny grzbiet, dzięki czemu nie wyróżniają się na tle mętnych wód, kiedy patrzą na nie stworzenia pływające nad nimi; i wreszcie po trzecie, mają srebrne boki odbijające światło, co sprawia, że są niewidoczne dla zwierząt znajdujących się po bokach.

Z lekkością światła

W miarę zanurzania się w wody oceanu nawet światło niebieskie staje się tak słabe, że na głębokości około 600 metrów poniżej powierzchni morza nurkowie nie są w stanie prawie niczego dostrzec. Poniżej 850 metrów nie widzą w ogóle nic, nawet jeśli woda jest czysta, a dzień słoneczny. Z tego samego powodu także zwierzęta nie potrafią niczego dostrzec poniżej 1000 metrów. A skoro w morzu jest zasadniczo ciemno, przejrzystość staje się problemem: możesz teraz stać się bardziej widzialny. A to dlatego że tam, w dole, żyją stworzenia, takie jak choćby latarenkowiec duży (*Anomalops katoptron*), ryby z rodziny świetlikowatych (*Myctophidae*) czy ryby z rodziny węzorowatych (*Stomiidae*), które wypracowały własne rozwiązania problemu ciemności. I przynajmniej większe gatunki z tej ostatniej rodziny – węzorowatych – żywią się właśnie ośmiornicami *Japetella heathi*. Albowiem te głębinowe ryby posiadają specjalne latarki, czyli położone w pobliżu oczu organy bioluminescencyjne, w których zachodzi reakcja chemiczna utleniania pigmentu o nazwie lucyferyna – procesowi temu zwykle towarzyszy emisja światła niebiesko-zielonego.

Przejrzyste tkanki zwierzęcego ciała, nawet jeśli są niedostrzegalne, kiedy wokół nich jest dużo światła, ponieważ przepuszczają niemal całe światło, jakie do nich dociera, różnią się nieco pod względem współczynnika załamania. Współczynnik załamania jakiegoś ośrodka jest równy prędkości światła w próżni (która z naszego punktu widzenia jest wystarczająco bliska szybkości światła w powietrzu) podzielonej przez szybkość, z jaką światło rozchodzi się w tym ośrodku. Dla wody współczynnik załamania wynosi 1,33 – wielkość, jaką posługiwaliśmy się w związku z prawem Snella w podrozdziale poświęconym strzelcykowi indyjskiemu, aby wyliczyć kąt, pod jakim światło załamuje się, kiedy przechodzi z powietrza do wody. Ten współczynnik mówi nam także, że światło zwalnia w stosunku 1 do 1,33, czyli do 75 procent w stosunku do swojej prędkości w powietrzu. Co jednak najważniejsze dla przejrzystych stworzeń żyjących w morzu, gdy światło trafia na granicę między dwiema tkankami o różnym współczynniku załamania, niewielka część tego światła się odbija.

„Zwierzęta wykorzystujące w ciemnościach swoje latarki, fotofory, mogą wychwycić obecność stworzeń o przejrzystych tkankach – mówi Johnsen. – Potrafią je dostrzec, ponieważ odrobina światła się od nich odbija, bardziej niż odbija się od samej wody”. To tak, jakbyśmy nocą zaświecili latarką w stronę okna – za dnia szkło jest przejrzyste, ale w ciemnościach zdradza swoją obecność, odbijając światło latarki.

W górnych warstwach oceanu jest zbyt jasno, aby można było zauważyć niewielką ilość światła, jaką odbijają tkanki przejrzystych zwierząt; przypominałoby to polowanie na odbite światło latarki podczas letniego dnia, w pełnym słońcu. Jeśli stworzenie żyjące w głębinach oceanu chce pozostać niewidoczne dla światła fotoforów, musi absorbować całe światło, jakie do niego z nich dociera, zamiast starać się, aby całe światło przez nie przeszło. W głębinach morza lepiej być czerwonym albo czarnym niż przejrzystym.

„Większość fotoforów emituje światło niebieskie – mówi Johnsen. – Jeśli jesteś czerwony, absorbujesz całe światło, jakie do ciebie dociera”. Czerwone zwierzę wydaje się czerwone, ponieważ odbija tylko długości fali światła czerwonego, absorbując wszystkie pozostałe barwy. Czarne zwierzęta absorbują całe światło, we wszystkich kolorach. Zwierzę czerwone albo czarne, żyjące w głębi morza, nie będzie odbijało promieni świetlnych wysyłanych przez reflektory ryb, które szukają pożywienia. Ryba wyposażona w taką „latarkę” będzie myślała, że jej promień po prostu rozpląnął się w mroku i że nic tam nie ma; nie nabierze podejrzeń, że przeoczyła jakieś ciało.

Jeśli jesteś morskim stworzeniem o barwie czerwonej lub czarnej i trzymasz się wyższych warstw oceanu, gdzie jest więcej światła, twój kształt będzie stanowił na tle nieba ciemny zarys łatwo dostrzegalny z dołu. Aby rzecz jeszcze bardziej skomplikować, trzeba powiedzieć, że głębokość, do jakiej dociera światło dzienne, zależy od wielu czynników: pory dnia, zachmurzenia, przejrzystości wody oraz tego, czy niedawno na morzu był sztorm, i wielu innych. Atrybuty, dzięki którym zwierzę staje się niewidoczne, zmieniają się, w miarę jak porusza się ono w górę i w dół oceanu oraz w zależności od zmian zachodzących w samym oceanie. Te zależności wzbudziły ciekawość Johnsen. Skoro wiele głowonogów stosuje kamuflaż, by się ukryć i upodobnić do otoczenia, zaczął się zastanawiać, czy to możliwe, żeby zrobiły krok dalej i zmieniały swój wygląd w odpowiedzi na barwę docierającego do nich światła. Czy ośmiornice są naprawdę aż tak zaawansowane?

Poławianie rezultatów

Aby się tego dowiedzieć, Johnsen i jego zespół wyruszyli w morze. Pewnej wrześnieowej nocy w 2010 roku, podczas rejsu powyżej Rowu Peruwiańsko-Chilijskiego, koleżanka Johnseny Sarah Zylinski wyłowiła z głębokości od 100 do 500 metrów kilka młodych egzemplarzy ośmiornicy *Japetella heathi*. Korpus tych ośmiornic – inaczej płaszcz – ma około 8 centymetrów długości. Zmieniające się warunki oświetlenia mogą być szczególnie interesujące dla *Japetella heathi*, ponieważ te ośmiornice w młodości, za dnia, żyją zwykle w górnej warstwie wód, od 400 do 700 metrów, ale z wiekiem przenoszą się głębiej, poniżej 800 metrów. Eksperymentatorka umieściła złowione głowonogi w okrętowym laboratorium, po czym przyciemniła światło i wybrała światło niebieskie o długości fali około 450 nanometrów, emitowane przez diodę (LED, jaką można znaleźć w niektórych żarówkach energooszczędnych) zaopatrzoną w filtr. Skierowała promień swojej sztucznej bioluminescencyjnej latarki w stronę ośmiornicy i uruchomiła kamerę, żeby zarejestrować reakcje.

Oczywiście w ciągu sekundy od wyemitowania niebieskiego promienia badaczce zrobiło się czerwono przed oczami – nie dlatego że jej eksperyment się nie udał i krew ją zalała, ale dlatego że ośmiornica, do tego momentu radośnie przejrzysta, nagle zmieniła kolor – tak jak to opisywaliśmy wcześniej. Ośmiornice nie reagowały na światło czerwone; wykazały zdecydowaną preferencję dla światła niebieskiego. Sarah Zylinski uzyskała te same rezultaty w przypadku kilku młodych osobników innego głowonoga średniej wielkości, znanego jako zwykła kałamarnica (*Onychoteuthis banksii*). Kałamarnice także oblewały się rumieńcem, kiedy poczuły, że pada na nie światło niebieskie, oraz ignorowały światło czerwone. Johnsen uświadomił sobie, że to może być sztuczka związana z kamuflażem.

Kopiąc głębiej

Niemniej ośmiornica albo kałamarnica przypuszczalnie zachowuje się w laboratorium inaczej niż wtedy, gdy żyje w morskich głębinach. „Takie eksperymenty byłoby niezwykle trudno przeprowadzić w głębi morza – wyjaśnia Johnsen. – Nawet gdybyśmy popłynęli łodzią podwodną, samo nasze przybycie, z tymi wszystkimi światłami i hałasem, całkowicie zaburzyłoby normalne zachowania”. Według Johnseny ten sam problem dotyczy wszystkich badań nad biologią mieszkańców morskich głębin. „Nie wiemy tak na pewno, co robią zwierzęta, które tam żyją – mówi. – Zwłaszcza zwierzęta, które mogą się poruszać, i to stosunkowo szybko. W chwili, w której byśmy się tam znaleźli, zaburzylibyśmy ich zachowania”. Aby rozwiązać ten problem, biologowie zastanawiają się nad umieszczeniem na dnie morza kamer na podczerwień, choć będą musieli długo czekać na rezultaty. „W głębi morza jest stosunkowo pusto, dlatego może się zdarzyć, że sfilmujesz dużo kompletnej pustki” – dodaje Johnsen.

Żeby lepiej odtworzyć promień światła, jaki emituje ryba używająca fotoforów, oraz warunki panujące w głębi morza, badacze zmniejszyli natężenie światła emitowanego przez diodę oraz przyciemnili jeszcze bardziej światła laboratorium. Ośmiornice zachowywały się tak samo, ale było teraz zbyt ciemno, aby to zarejestrować kamerą. „Bardzo chcielibyśmy się dowiedzieć, czy właśnie coś takiego dzieje się w głębinach – mówi Johnsen. – Lepiej byłoby posłużyć się niewielkim promieniem światła zamiast całej latarki [LED]. Trudno oddzielić to światło od innych rodzajów światła, jakie tam dociera bądź stamtąd wypada. Ośmiornice muszą zadać sobie pytanie, czy niebo pojaśniało, ponieważ właśnie przesunęła się po nim chmura i odsłoniła słońce, czy dlatego że w ich stronę ktoś skierował niewielki promień bioluminescencyjnego światła”.

Sarah Zylinski, nie tracąc ciekawości, jak przystało na dobrego badacza, podczas rejsu w lipcu 2011 roku w Zatoce Kalifornijskiej zbadała 4 ośmiornice *Japetella heathi* wyłowione w ciągu dnia z głębokości około 1000 metrów. Kiedy dotykała tępą igłą jednego z ramion zwierzęcia, aby je podrażnić, głowonogi zmieniały barwę na czerwoną, odbijając z grubsza o połowę więcej niebieskiego światła w porównaniu ze stanem, gdy były przejrzyste. Chociaż czerwone ośmiornice przepuszczały więcej światła czerwonego niż niebieskiego, nadal było to mniej niż ilość czerwonego światła, jakie odbijały, kiedy były przejrzyste. Jeśli chodzi o całą skalę długości fal świetlnych, obszar położony tuż przed jelimem czerwonej ośmiornicy odbijał mniej niż jedną piątą światła, które do niego docierało, jak potwierdziła Sarah Zylinski, i od jednej dziesiątej do jednej dwunastej światła niebiesko-zielonego.

Wygląda na to, że ta ośmiornica jest wystarczająco bystra, by zmienić barwę na czerwoną i nie odbijać światła, kiedy napotka promień wysłany przez fotofory ryby bioluminescencyjnej. Przynajmniej raz oblewanie się rumieńcem ma jakieś pożyteczny cel. O ile twoim przeciwnikiem nie jest ryba z rodziny węzorowatych. To rodzaj stworzeń, jakich można by się spodziewać w szklanej gablocie jakiegoś wiktoriańskiego muzeum – z budzącą przerażenie szeroko otwartą paszczą i zadartą wysoko górną szczęką odsłaniającą przepastną gardziel naszpikowaną ostrymi zębami. Węzorowate bardzo sprytnie posługują się w swoich fotoforach światłem zarówno niebieskim, jak i czerwonym. Chociaż 3 gatunki z tej rodziny, które opanowały tę sztuczkę, są przypuszczalnie za małe, aby zjadać ośmiornice. „W morskiej głębinie tak naprawdę nie ma znaczenia, czy jesteś czerwony czy czarny, jeśli ktoś nie zaświeci w twoją stronę fotoforem o odmiennej barwie” – wyjaśnia Johnsen. To jednak zupełnie inna historia...

Wchodzą kałamarnice

A skoro już mówimy o opowieściach, jak podoba się wam ta o życiu w morskich głębinach:

„Przed oczami mymi poruszał się okropny potwór godzien figurować w legendach teratologicznych. Była to ogromnej wielkości kałamarnica, długości ośmiu metrów. Posuwała się tyłem niezmiernie szybko w kierunku »Nautilusa«. Jej 8 ramion, a raczej nóg wyrastających z głowy, które zjednały tym zwierzętom nazwę głowonogich, było 2 razy większych od ciała i kręciło się jak włosy na głowie furii”^[13]. To słowa fikcyjnej postaci, francuskiego biologa badającego życie mórz, profesora Pierre’a Aronnax z powieści Jules’a Verne’a *20 000 mil podmorskiej żeglugi* (1870). Ale uwaga – przejdźcie szybko do następnego akapitu, jeśli nie zdarzyło wam się jeszcze przeczytać tej klasycznej powieści, choć wydano ją po raz pierwszy prawie 150 lat temu. Aronnax, zaangażowany przez władze, ma za zadanie odnaleźć morskie stworzenie niszczące statki. Po drodze odkrywa łódź podwodną Nautilus, należącą do kapitana Nemo, który porywa biologa i trzyma go jako jeńca na pokładzie swojej jednostki. Tym razem nie będzie nagrody za odgadnięcie, jakim stworzeniem okazuje się morski potwór. Chwilę później grupa głowonogów atakuje Nautilusa. Kwestia, o jakim dokładnie gatunku głowonogów mówi Aronnax, jest przedmiotem sporów. W przekładach na angielski mamy wielkie kałamarnice albo mątwy, podczas gdy w oryginale Verne’a występuje francuskie słowo oznaczające ośmiornicę (o ile nam wiadomo, ani wielkie kałamarnice, ani ośmiornice nie polują zespołowo, ale to fascynująca opowieść, nawet jeśli fakty z zakresu biologii nie całkiem się zgadzają). Niezależnie od tego, o jaki rodzaj zwierząt chodzi, wiele głowonogów ginie z ręki Neda Landa, kanadyjskiego wielorybnika, który wbija harpun w ich potężne ciała.

Opowieść o pojedynku łodzi podwodnej z kałamarnicą, o której Johnsen czytał w dzieciństwie, zainspirowała go do zajmowania się biologią morza, choć najpierw skończył studia, uzyskując dyplom w zakresie sztuki i matematyki, przy czym twierdzi, że większość energii poświęcił na zajmowanie się sztuką. „Sztuki wizualne są dla mnie bardzo ważne – opowiada. – Kiedy zająłem się biologią, zawsze wiedziałem, że będę pracował nad rzeczami, które mają związek ze światłem i z barwą”. I rzeczywiście tak się stało, dziś Johnsen specjalizuje się w badaniach nad wzrokowym postrzeganiem u zwierząt.

„Podobnie jak większości ludzi, kałamarnice zawsze kojarzą mi się z wielkimi potworami – mówi Johnsen. – Trudno nie zainteresować się oczami kałamarnic: są znacznie większe niż oczy jakichkolwiek innych stworzeń, nawet stworzeń, które są większe od nich”.

Zgodnie z opisem Verne’a kałamarnica olbrzymia (z gatunku *Architeuthis*) to potężny przeciwnik. Oprócz 8 długich ramion ma 2 jeszcze dłuższe macki, które wyrastają z jej ciała. Na wszystkich 10 kończynach znajdują się przyssawki, a otwór gębowy jest zaopatrzony w ostry dziób służący do zabijania i rozrywania ofiar. Kałamarnica wygląda jak skrzyżowanie kremowobiałej mięsistej meduzy ze sflaczałą ośmiornicą. Tylko na ogromną skalę. Kałamarnica olbrzymia okazuje się godna swojego imienia – może mieć do 13 metrów długości (około 5 metrów do końca ramion, macki uzupełniają resztę), co czyni ją drugim co do wielkości bezkręgowcem na świecie. Samice, które są większe niż samce, mogą ważyć do 300 kilogramów, czyli więcej niż samiec lwa albo wielki pterozaur.

Kałamarnice olbrzymie, oraz mniej więcej metr dłuższe kałamarnice kolosalne (*Mesonychoteuthis hamiltoni*) o nieco bardziej różowym odcieniu, są największymi bezkręgowcami na świecie i mają oczy wielkie jak talerze. A to oznacza, że oczy te mają średnicę 3 razy większą niż oczy jakichkolwiek

innych zwierząt. Zarówno kałamarnica olbrzymia, jak kałamarnica kolosalna (badacze nadający nazwy kałamarnicom nie grzeszą pomysłowością) stanowią przykład tendencji do gigantyzmu, widocznej wśród zwierząt żyjących w głębinach oceanu. Z jakiegoś powodu, znanego tylko im samym, te stworzenia rosną większe niż ich krewni z płytszych wód. W konkurencji na największe oczy w świecie zwierząt następna pozycja przypada stworzeniu, które ma oczy o średnicy zaledwie 9 centymetrów, a więc wielkości samej źrenicy oka kałamarnicy. Tę drugą pozycję zajmują wspólnie płetwal błękitny (*Balaenoptera musculus*), który jako stworzenie o długości 30 metrów jest największym zwierzęciem na świecie, oraz mający około 3 metrów włócznik (inaczej miecznik) (*Xiphias gladius*), który żyje na głębokości do 550 metrów. Nasze oczy mają zaledwie 2,4 centymetra średnicy. Największe oczy wśród zwierząt żyjących na lądzie ma struś. Średnica jego gałek ocznych wynosi 5 centymetrów.

Duże oczy to brzmi świetnie, jednak biologicznie to rzecz kosztowna. „Potrzebujesz mnóstwo krwi napływającej do oczu, aby podtrzymać działanie czopków i pręcików – wyjaśnia Johnsen. – Poza tym, jeśli masz duże oczy, to znaczy, że spora część twojego mózgu musi być pochłonięta przetwarzaniem obrazu. Za każdym razem kiedy spotykamy duże oczy, należy się zastanowić, do czego służą, ponieważ płaci się za nie ogromną cenę”. Johnsen oraz współpracujący z nim Eric Warrant i Dan-Eric Nilsson z uniwersytetu w Lundzie, w Szwecji, mieli przeczucie, że kałamarnica olbrzymia dostaje swoją nagrodę za te nieprawdopodobnie wielkie gały.

Duże oczy wpuszczają więcej światła. Mogą także zawierać więcej fotoreceptorów, a zatem są bardziej czułe na światło i lepiej wychwytyują detale. Ale pod wodą, nawet jeśli masz duże oczy, po przekroczeniu pewnej wielkości zyski wyraźnie maleją, ponieważ woda w znacznej mierze pochłania i rozprasza światło. Co zatem sprawia, że kałamarnice są takie

wyjątkowe? Odpowiedź kryje się w taktyce, która uratowała niegdyś życie pewnego pilota myśliwca (następnie został on astronautą).

Ale ty masz wielkie oczy, babciu

Do czasu zakończenia badań Johnsen, Warranta i Nilssona w 2011 roku ogromne oczy kałamarnic olbrzymich i kałamarnic kolosalnych stanowiły zagadkę. Podobnie jak, pod wieloma względami, życie tych bezkręgowców. Te zwierzęta żyją tak głęboko w oceanie, przypuszczalnie między 500 a 1000 metrów, że niemal nie zdarza nam się oglądać ich w naturalnym środowisku. Wiemy, że kałamarnica kolosalna jest bardziej mięsistą oraz dłuższą kuzynką kałamarnicy olbrzymiej. Samice ważą do 500 kilogramów. W wersji kolosalnej kałamarnica ma na swoich mackach haczyki oraz przyssawki i żyje głównie w Oceanie Południowym, w paśmie wód wokół Antarktydy sięgającym na północ do południowego czubka Afryki Południowej. Kałamarnicę olbrzymią można znaleźć na świecie wszędzie, ale upodobała sobie zwłaszcza wody u wybrzeży Nowej Zelandii. Mówimy, że można znaleźć, jednak takie odkrycie zdarza się rzadko – czasami natrafiamy na ich ciała wyrzucone na plażę albo wyciągamy je z sieci rybackich lub lin bądź natykamy się na ich szczątki w żołądkach kaszalotów spermacetowych (*Physeter macrocephalus*).

Według Johnsen, jeśli badania nad ośmiornicami stanowiły wyzwanie, badanie życia kałamarnic było jeszcze trudniejsze. „Nawet ktoś taki jak ja, doświadczony biolog, który regularnie wypływa w rejsy badawcze, przypuszczalnie nigdy nie będzie miał okazji zobaczyć tego zwierzęcia na żywo, a co za tym idzie, badania biologiczne stają się czymś bardzo trudnym – mówi. – Inne zwierzęta przynajmniej można wciągnąć na statek

i przeprowadzić eksperymenty. Gdyby nawet udało się kiedykolwiek wciągnąć na pokład [kałamarnicę olbrzymią albo kolosalną], byłaby za duża, aby robić z nią jakiegokolwiek doświadczenia”. W porównaniu z nimi praca z wielorybami jest łatwa, jak mówi Johnsen – jest ich znacznie więcej i łatwiej je znaleźć, ponieważ muszą wypływać na powierzchnię, aby zaczerpnąć oddechu, więc można je oznakować i śledzić ich ruchy. „Co do kałamarnicy olbrzymiej był [tylko] jeden albo dwa przypadki, w których ludziom udało się zrobić jakiegokolwiek nagrania wideo, nie mówiąc już o tym, aby można było te zwierzęta badać w naturze”.

A skoro nie mamy łatwego dostępu do żyjących kałamarnic, olbrzymich czy kolosalnych, badacze sięgnęli po zdjęcia i zamrożone gałki oczne. W 2012 roku Warrant i Nilsson zbadali fotografie oka kałamarnicy olbrzymiej znalezionej niedaleko Hawajów w 1981 roku. Przywieźli zdjęcie, wraz z oryginalnymi pomiarami martwego zwierzęcia, do Johnsen. Ta kałamarnica miała gałkę oczną o średnicy co najmniej 27 centymetrów i źrenicę o średnicy 9 centymetrów, czyli szerokości dużej dłoni. Johnsen miał także szczęście, że udało mu się zdobyć rozmrożone oko największej kałamarnicy kolosalnej, jaką kiedykolwiek znaleziono, wyciągniętej z wody przez nowozelandzką łódź rybacką. Jej oko miało podobne rozmiary, między 27 a 28 centymetrów średnicy, czyli około 5 centymetrów więcej niż piłka futbolowa.

„To był klasyczny przypadek medycyny sądowej w badaniach biologicznych, ponieważ nie mieliśmy nawet żywego zwierzęcia – opowiada Johnsen. – Mieliśmy tylko rozmiary jego oka. Mogliśmy zmierzyć, jak duża była soczewka, jaka była źrenica... Zbudowaliśmy model matematyczny przedstawiający, w jaki sposób działa widzenie pod wodą, i użyliśmy go, żeby się dowiedzieć, jakie korzyści mogą płynąć z posiadania wielkich oczu”.

Jak widzieliśmy w przypadku ośmiornicy, woda absorbuje światło znacznie silniej niż powietrze, zwłaszcza większe długości fal. W dodatku cząsteczki wody powodują absorpcję, rozpraszanie i ponowną emisję przede wszystkim światła niebieskiego, wysyłając je we wszystkich kierunkach i zmieniając jego pierwotny tor. W rejonie płytszych wód zooplankton – pływające drobne zwierzęta ledwo widoczne gołym okiem – odbija fale wszystkich długości, dzięki czemu wydaje się biały. Fitoplankton (unoszące się w wodzie rośliny, często zbyt małe dla naszego wzroku) oraz rozpuszczone w wodzie substancje i inne drobne cząsteczki także odbijają światło wszystkich kolorów, działając mniej więcej tak samo jak krople deszczu we mgle, które zamazują kontury przedmiotów. Próba, żeby coś w wodzie zobaczyć, przypomina przebijanie wzrokiem mgły. Badacze przyzwyczajeni do oglądania rzeczy w powietrzu muszą uruchomić całą swoją wiedzę i wyobraźnię, jeśli chcą zrozumieć, jak działa zmysł wzroku zwierząt żyjących pod wodą.

„Kiedy jesteś na łądzie i twój przyjaciel się od ciebie oddala, jego sylwetka zapewne skurczy się do punktu na horyzoncie albo zniknie za rogiem, zanim kompletnie rozplynie się we mgle – wyjaśnia Johnsen. – W oceanie jest na odwrót. Zwierzęta niemal zawsze znikają z pola widzenia, zanim ich sylwetka zmaleje i skurczy się do niewielkiej kropki”. To jedna z bardziej kłopotliwych rzeczy w badaniach podwodnych, mówi Johnsen: coś może mieć rozmiary jumbo jeta i znajdować się zaledwie 3 metry od ciebie, a mimo to nie sposób tego dostrzec. „Pod wodą tak się dzieje przez cały czas – dodaje badacz. – Nawet jeśli wydaje się całkiem czysta, nigdy nie sięgniesz wzrokiem dalej niż 100 metrów. I nie ma znaczenia, ile światła ze sobą weźmiesz. W jednostkach podwodnych mamy niezwykle silne reflektory, ale ostatecznie coraz więcej tego światła do ciebie wraca [z powodu odbijania się światła rozproszonego]. W idealnych warunkach

zwykle widzimy najwyżej na 20 do 40 metrów”.

Każde podwodne stworzenie w zasadzie żyje w swojej bańce: widzi na określony dystans, po czym przedmioty stają się dla niego nieodróżnialne od mętnego tła. To, jak daleko zwierzę musi widzieć, zależy od jego rozmiarów. Jeśli jesteś małą rybką, która musi jedynie znaleźć pożywienie mniejsze niż ona sama, uniknąć nieco większych drapieżników i znaleźć inną małą rybkę, aby spłodzić z nią potomstwo, zdolność widzenia na 10 metrów to aż nadmiar luksusu. „Nie musisz dostrzegać innej małej rybki płynącej 100 metrów dalej, skoro nie ma żadnego wpływu na twoje życie” – wyjaśnia Johnsen. Na przykład sfera zainteresowania widłonogów, niewielkich skorupiaków, sięga zaledwie 1 metra. Dlatego właśnie małe stworzenia żyjące w wodzie nie potrzebują dużych oczu, które wpuszczałyby więcej światła i pozwalały widzieć dalej. „Umiejętność widzenia na większą odległość ma sens jedynie wtedy, gdy zależy ci na dostrzeganiu rzeczy, które wciąż są całkiem spore [mimo dużej odległości]” – wyjaśnia Johnsen.

Mnóstwo czasu

A zatem kałamarnice, ogromne albo kolosalne, swoimi rekordowo wielkimi oczami muszą wypatrywać jakichś dużych zwierząt, czających się w mroku, w dużej odległości od nich. Jakich zwierząt? Odkładając na bok opowieści o łodzi podwodnej kapitana Nemo, niemal jedyną istotą, jakiej żyjąca w głębi morza kałamarnica musi się obawiać, jest kaszalot spermacetowy, który lubi sobie przekąsić kałamarnicę na kolację. Kałamarnice wszelkich rozmiarów, nie tylko olbrzymie czy kolosalne, stanowią cztery piąte pożywienia kaszalota, resztę uzupełnia rybami. Niektóre kaszaloty noszą na skórze blizny pozostawione przez przyssawki kałamarnic, a w ich żołądkach gromadzi się

używana przez nas do produkcji perfum ambra – przypuszczalnie stanowi ona reakcję organizmu kaszalota na zniszczenia wywołane przez ostre dzioby zjedzonych kałamarnic. Nie licząc dziobów kałamarnic i przyssawek, w przeszłości kaszaloty musiały obawiać się głównie wytwórców świec i lamp, którzy zgłaszali stałe zapotrzebowanie na olej spermacetowy, czyli płynny wosk znajdujący się w ogromnej, płasko zakończonej głowie kaszalota. Współcześnie ten gatunek jest pod ochroną. Na ogół.

W poszukiwaniu ryb i kałamarnic kaszaloty zanurzają się na głębokość przekraczającą 2 kilometry, dzięki czemu zajmują drugie miejsce na liście ssaków nurkujących najgłębiej, po zyfii gęsiogłowej (inaczej: walu Cuviera, *Ziphius cavirostris*). Dorosły kaszalot ma około 16 metrów długości – jest więc odrobinę dłuższy od kałamarnicy – i jest setki razy cięższy: waży 40 tysięcy kilogramów. Jak dla nas, to kościsty jegomość. Kałamarnica, jako bezkręgowiec, w ogóle nie ma kości. Ciało kaszalota jest też bardziej masywne. „Większość ciała kałamarnicy olbrzymiej stanowią jej długie ramiona i macki. Kaszalot to prawdziwa góra mięsa” – mówi Johnsen. Ale nawet jeśli kaszalot jest odrobinę dłuższy i znacznie cięższy, w konkursie na największe oczy to kałamarnica, ogromna albo kolosalna, wygrywa spokojnie – by tak rzec – z założonymi płetwami. Oko kaszalota ma marne 5,5 centymetra średnicy. Nie wiemy, jak daleko widzi kaszalot spermacetowy ani czy w ogóle coś widzi do przodu – jego ogromna głowa może stać temu na przeszkodzie.

Niemniej nawet jeśli kaszalot nie widzi zbyt daleko w mętnych wodach oceanicznej głębi, ma w zanadrzu zupełnie inną broń. Wydaje bowiem dźwięki o poziomie natężenia 230 decybeli, jedne z najgłośniejszych fal dźwiękowych generowanych przez zwierzęta, po czym nasłuchuje – tak jak nietoperz na łądzie – odbitego echa, aby wytropić swoją ofiarę. Kaszaloty muszą krzyczeć tak głośno, ponieważ miękkie ciała kałamarnic nie odbijają

dźwięków zbyt dobrze. Mimo to kaszalot może wykryć dwudziestocentymetrową kałamarnicę *Loligo* (z rodziny kalmarowatych) z odległości 325 metrów, a muskularną kałamarnicę Humboldta (*Dosidicus gigas*) o długości 1,5 metra z odległości kilometra. Kałamarnice olbrzymie i kolosalne są też bardziej miękkie, toteż trudniej mu je namierzyć sonarem. Ale to, że kaszalot może wychwycić obecność kałamarnicy z odległości większej niż 100 metrów, powoduje, że obszar zainteresowania kałamarnicy – bańka, w której żyje – ma co najmniej takie same rozmiary. Kałamarnica nie słyszy dźwięków emitowanych przez sonar kaszalota – główne składowe tych dźwięków mają częstotliwość 15 tysięcy Hz i lokują się powyżej zakresu słyszalności kałamarnic. A ponieważ kałamarnice nie mają własnego systemu sonarowego, muszą znaleźć inną drogę, jeśli chcą uniknąć roli dania dnia. Wszystko, co im pozostaje, to polegać na własnych oczach, choć dostrzeżenie czegoś z odległości większej niż 100 metrów pod wodą to wyczyn graniczący z niemożliwością.

A skoro już mówimy o zwycięskiej walce z przeciwnościami losu: pewnej nocy Jim Lowell, amerykański pilot marynarki wojennej, wracał z lotu zwiadowczego nad powierzchnią morza na swój macierzysty lotniskowiec. Wszystko szło, jak należy, aż do chwili, gdy zawiódł system nawigacyjny i Lowell nie mógł odnaleźć drogi na statek. Zachowując zimną krew, co tak dobrze przysłuży mu się później, gdy jako astronauta znajdzie się na pokładzie Apolla 13, przypomniał sobie lekcje z biologii morza. Wyłączył światła w kabinie samolotu i zaczął wpatrywać się w ciemność. W oddali dostrzegł delikatną niebieskozieloną poświatę. Niewielkie organizmy bioluminescencyjne, takie jak bakterie, glony i bruzdnice, pod wpływem ruchu statku wysyłały impulsy światła i właśnie te impulsy bezpiecznie doprowadziły pilota do domu. Z tego samego powodu można czasem dostrzec migoczący „pył” pojawiający się w ślad za delfinem

ślizgającym się wśród fal. Jak pokazują badania Johnsen, Warranta i Nilssona, właśnie do tego zjawiska odwołują się kałamarnice, olbrzymie i kolosalne, by chronić się przed polującymi w oddali kaszalotami. Ponieważ do tej głębokości oceanu niemal nie dociera światło słoneczne, szanse kałamarnicy na to, by dostrzec sylwetkę kaszalota na tle światła docierającego z góry, są znikome. Jednak poruszający się kaszalot pozostawia za sobą niewielkie punkciki światła bioluminescencyjnego niczym odległe migotanie gwiazd. Jest tylko jeden problem: te kropki są małe i leżą daleko. Kałamarnica usiłująca dostrzec te drobinki światła przypomina kogoś, kto chciałby wyłowić zarys postaci wśród migotania obrazu czarno-białego telewizora w dużym pokoju pełnym mgły. Czy potężne oko kałamarnicy, olbrzymiej bądź kolosalnej, widzi na tyle ostro, aby zauważyć te niewielkie iskierki wywołane ruchami kaszalota?

Lekki deszcz

To niezwykle zadanie. Kiedy próbujecie wypatrzeć w mroku delikatną poświatę, wszystko sprowadza się do statystyki. „Zbierasz światło napływające od przedmiotu i zbierasz światło z tła – wyjaśnia Johnsen. – Ostatecznie masz dwie liczby. Musisz wiedzieć, że te dwie wartości się od siebie różnią, aby zasadnie powiedzieć, że tam coś jest”. Na lądzie łatwo wyróżnić coś z otaczającego tła, jeśli nie ma mgły albo nie jest zbyt ciemno. Potem to już bardziej przypomina czytanie książki w ciemnościach. Wprawdzie widzisz książkę, lecz przypuszczalnie nie potrafisz dostrzec wystarczającego kontrastu między bielą kartki a czernią tekstu, aby wychwycić słowa. „Kiedy robi się jeszcze ciemniej, staje się coraz bardziej oczywiste, że światło wcale nie płynie niczym gładki strumień rzeki, ale

pojawia się w kropelkach, które nazywamy fotonami” – mówi Johnsen.

Jak wspominaliśmy w rozdziale 1, fotony to najmniejsza możliwa ilość światła; w pewnych warunkach światło nie zachowuje się już jak fala, ale jak seria niewielkich pakietów lub cząstek, i to zjawisko jest znane jako dualizm korpuskularno-falowy. Uczeni przez ponad 100 lat spierali się, czy światło jest falą, czy składa się z cząstek (Newton w tym sporze stał po stronie cząstek), zanim uświadomili sobie, że jest i tak, i tak. Idealny kompromis.

„Światło dociera do oka tak: bip, bip, bip [filmowy dźwięk monitora rytmu serca, gdy akcja dzieje się szpitalu], jedno małe bip po drugim, i to jest losowe – opowiada Johnsen. – Wyobraź sobie teraz, że zatoczyłeś kredą koło na chodniku, zaczęło padać i przypadkiem na to koło napadało nieco więcej kropli niż wokół niego. Przypuśćmy, że spadły tam tylko 4 krople. Czy byłbyś w stanie powiedzieć, że tam jest jakieś koło? Zapewne nie”. Nawet gdyby spadło 100 kropli, z których większość wylądowałaby raczej wewnątrz koła niż na zewnątrz, przypuszczalnie nie bylibyśmy w stanie zobaczyć jego kształtu. „A teraz wyobraź sobie, że spada tysiące kropli i powierzchnia koła jest o wiele bardziej mokra niż obszar wokół niego. Wtedy możesz dostrzec to koło całkiem dobrze – mówi uczonego. – Na tym polega sztuczka. Zwierzęta muszą zebrać wystarczająco wiele światła, jeśli chcą rozwiązać problem statystyczny związany z wiedzą, czy tam coś jest”.

Najlepszy sposób na to, aby zebrać wystarczającą ilość światła, to mieć duże oczy. Kałamarnice mają proste oczy, mniej więcej takie same jak my, budową przypominającą kamerę: pojedyncza soczewka, która skupia światło docierające przez źrenicę na warstwie fotoreceptorów w siatkówce. „Musisz mieć duże oko, żeby wpłynęło do niego dużo światła, i musisz mieć mnóstwo fotoreceptorów, czyli komórek wzrokowych rejestrujących mnóstwo danych, jeśli chcesz dostrzegać rzeczy, które są tylko nieco jaśniejsze lub ciemniejsze niż tło” – tłumaczy Johnsen. Jak pokazały modele budowane przez badaczy,

kałamarnice, olbrzymie bądź kolosalne, potrafią na tyle dobrze wykrywać niewielkie różnice kontrastu, że mogą zauważyć niebieskozieloną poświatę bioluminescencyjnego planktonu z odległości 120 metrów. Dzięki temu kałamarnica może, wypatrując kaszalotów, monitorować imponujący rejon oceanu, o objętości 7 milionów metrów sześciennych, czyli około 2800 basenów olimpijskich. Oczy kałamarnicy, jak odkrył Johnsen, radzą sobie lepiej z wyczuwaniem zamazanej poświaty o niskiej intensywności, jaką wytwarza zbiór tych plamek światła, niż z wykrywaniem ich jako indywidualnych punktów. To tak, jakbyśmy dostrzegali raczej zarys Drogi Mlecznej, niż rozbijali go na poszczególne gwiazdy, albo wychwytywali z odległości 100 metrów samą poświatę choinkowych lampek, zamiast dostrzegać każdą żarówkę osobno. Wielkie oczy kałamarnicy raczej nie pomogą jej zauważyć innej kałamarnicy tego samego gatunku ani zwierząt, na które sama poluje – ryb i mniejszych kałamarnic – ponieważ te zwierzęta są zbyt małe, by wytwarzać poświatę w stosunkowo dużym obszarze.

Według obliczeń Johnsen'a jedyną korzyścią kałamarnic olbrzymich czy kolosalnych z posiadania tak wielkich oczu jest zdolność do wykrywania z dużej odległości, do 500 metrów lub coś koło tego, masywnych i delikatnie świecących obiektów, wtedy gdy wokół nie ma wiele światła. Wygląda na to, że zagadka ogromnego oka wielkiej kałamarnicy została rozwiązana: dzięki swoim rozmiarom jej oko może wykrywać poświatę kaszalotów płynących w oddali wśród organizmów bioluminescencyjnych. Choć nadal nie możemy wykluczyć, że te wielkie oczy kałamarnicy wykrywają jedynie mroczny cień drapieznika w odległości do 100 metrów. Lub – co bardziej prawdopodobne – jedno i drugie. Trudno tego dowieść. W płytszej wodzie posiadanie większych oczu, o średnicy przekraczającej 10 centymetrów, nie pomaga widzieć dalej, co w pewnej mierze wyjaśnia różnicę między wielkością oczu kałamarnicy a rozmiarami oczu jej najbliższych rywali

w tym konkursie.

Czas się zmyć jak kałamarnica

Kałamarnica może zauważyć kaszalota mniej więcej z tej samej odległości, z jakiej kaszalot może ją wytropić swoim sonarem. Obydwa zwierzęta mają więc mniej więcej równe szanse w tym pojedynku, tyle że kałamarnica musi jeszcze zdążyć uciec. Biorąc pod uwagę imponującą szybkość rozwijaną przez kaszalota, 32 km/h, wydaje się mało prawdopodobnie, żeby kałamarnica mogła wygrać z nim wyścig pływacki. Niemniej, aby ocalić życie, kałamarnica może wykorzystać dwie inne okoliczności: po pierwsze, niedoskonałości w działaniu sonaru kaszalota oraz po drugie, optyczne cechy wody morskiej. Sonar kaszalota wysyła sygnały tylko w określonym kierunku. Jeśli kałamarnica, która zauważy poświatę wytwarzaną przez ruch płynącego w oddali kaszalota, zejdzie z linii działania jego detektora, może wymknąć się promieniom sonaru i dyskretnie rozpląnąć się w mroku wód rozpraszających światło. „Gdybyś ścigał jakiś samochód na autostradzie i ten samochód byłby kilka kilometrów przed tobą, nadal będziesz go widział – wyjaśnia Johnsen. – Ale pod wodą świat wygląda inaczej, ponieważ jeśli coś znajduje się dalej niż 100 metrów od ciebie, nie będziesz w stanie tego zobaczyć”. Przypomina to zabawę w chowanego w ciemnościach i w gęstej mgłę, w której kaszalot może zauważyć jedynie to, na co skieruje wąski promień swojej latarki, podczas gdy kałamarnica jest w stanie przebić wzrokiem tę mgłę we wszystkich kierunkach. „Jeśli kałamarnica olbrzymia zdoła odpłynąć w innym kierunku, kaszalot może jej już nigdy nie spotkać” – mówi Johnsen.

Jedyne zwierzęta, które miały równie wielkie oczy jak kałamarnice

olbrzymie i kolosalne, dziś są już wymarłe. Ichtyozaur – duży gad morski, żyjący około 250–290 milionów lat temu – miał do 16 metrów długości. Jego oczy przypuszczalnie miały średnicę 35 centymetrów – odpowiednik, jeśli będziemy się trzymać kuchennych analogii, dekoracyjnych talerzy, jakie czasem umieszcza się pod talerzem z jedzeniem w eleganckich restauracjach. Ponownie mamy tu przypadek „dużych zwierząt, które usiłują dostrzec w wodzie inne duże zwierzęta”. Kaszaloty jeszcze wtedy nie istniały, a zatem ichtiozaury przypuszczalnie wypatrywały siebie nawzajem albo nieprzyjemnie uzębionych pliozaurów.

Większość faktów dotyczących potężnych kałamarnic nadal otacza aura tajemnicy. Czego jeszcze Johnsen chciałby się dowiedzieć o zmyśle wzroku tych zwierząt? „Ciągle jeszcze nie ujrzeliśmy tego stworzenia w naturze i nie widzieliśmy, jak się zachowuje i co jest dla niego ważne – odpowiada. – Poza tym chcielibyśmy wiedzieć więcej na temat jego siatkówki. Znamy kształt oka i źrenicy, soczewki, znamy optykę, wiemy, że działa jak kamera”. Dalsze odkrycia dotyczące siatkówki kałamarnicy mogłyby nam powiedzieć, czy widzi ona kolory, jak ostry ma wzrok, w jaki sposób przetwarza informacje wzrokowe w mózgu, co może zobaczyć, a czego nie. „Znamy najprostsze fakty, ale nie znamy elementów, dzięki którym moglibyśmy powiedzieć, jak wygląda świat widziany jej oczami – wyjaśnia Johnsen. – O wielkiej kałamarnicy nie wiemy prawie nic”.

Podsumowanie światła

W tym rozdziale spotkaliśmy zwierzęta, które na wiele różnych sposobów wykorzystują fizyczne cechy światła: mrówki i pszczoły używają polaryzacji, żeby znaleźć drogę; pisklęta kukułki posługują się plamami barw

widzialnych w świetle ultrafioletowym, aby zdobyć więcej pożywienia; strzelczyki indyjskie potrafią uwzględniać zjawisko załamania się światła, dzięki czemu mogą strącać do wody owady; ośmiornice zmieniają barwy, by ukryć się przed rybami wyposażonymi w latarki, a kałamarnice o ogromnych oczach potrafią umknąć przed kaszalotem, wykrywając bioluminescencyjną poświatę planktonu poruszonego przez niego w oddali.

Dzięki tym zwierzętom dowiedzieliśmy się, że światło jest falą składającą się z oscylujących pól, elektrycznego i magnetycznego, usytuowanych wobec siebie pod kątem prostym. Pszczoły i mrówki pokazały nam, że niebo polaryzuje te pola, a także jak to się dzieje, że za sprawą rozproszenia światła niebo jest błękitne. Dzięki piskłtom kukułki oraz ich żółtym plamom na skrzydłach, odbijającym światło ultrafioletowe, dowiedzieliśmy się, że światło, podobnie jak dźwięk i inne rodzaje fal, ma długość i częstotliwość. Natomiast strzelczyk indyjski zademonstrował nam, w jaki sposób światło się załamuje – albo ulega refrakcji – kiedy wpada do wody i zmienia prędkość. Ośmiornica pomogła nam dowiedzieć się więcej na temat barw, odbicia i załamania. I wreszcie ogromne kałamarnice przyniosły nam niezwykle ważną wiadomość, że światło może zachowywać się i jak fala, i jak cząsteczka.

Nie ma to jak skończyć w wielkim stylu, a czy może być coś bardziej stosownego niż opowieść o największych bezkręgowcach jako zwieńczenie naszej błyskawicznej wycieczki po świecie zwierząt wykorzystujących prawa fizyki w życiu codziennym? Tak, nie ma nic lepszego niż efektowne zakończenie. Choć to jeszcze nie koniec naszej opowieści. Poczytajcie dalej, jeśli chcecie dowiedzieć się, czy zwierzęta wiedzą, co robią, oraz poznać ciemniejszą stronę zwierząt i fizyki.

[13] Jules Verne, *20 000 mil podmorskiej żeglugi*, przekład anonimowy, Kraków 2005, s. 251.

ZAKOŃCZENIE

**ŻYCIE, WSZECHŚWIAT
I CAŁA RESZTA**



Życie fizyki

W naszym świecie jest wiele zwierząt, które wykorzystują zasady fizyki do tego, by przeżyć. Strzelczyki indyjskie strącają strumieniem wody muchy siedzące na liściach nad wodą. Strętwy (elektryczne węgorze) ogłuszają swoją ofiarę prądem elektrycznym, a węże ogrodowce o czerwonych bokach gromadzą się w gniazdach liczących tysiące osobników, aby zachować ciepło (a także aby je ukraść, w przypadku samico-samców). Nawet najzwyklejsze zwierzęta mają smykałkę do fizyki. Domowy kot wykorzystuje napięcie powierzchniowe, aby językiem wciągnąć do pyszczka strumień płynu, a psy otrząsają się z wody do sucha, postępując zgodnie z zasadami prostego ruchu harmonicznego. Znalezienie przykładów do tej książki było łatwe, ponieważ mieliśmy mnóstwo materiału do wyboru. Niemniej wiązał się z tym pewien problem, bo z braku miejsca musieliśmy przy tej okazji wiele zwierząt pominąć (przepraszamy więc meduzy, z ich alarmem przeciwwłamaniowym, śledzia potrafiącego skasować efekt polaryzacji oraz wyczuwającego pola elektryczne dziobaka).

Znajomość praw fizyki okazuje się użyteczna nie tylko wtedy, gdy chcemy zrozumieć, jak zwierzęta się porozumiewają, bronią się, poruszają, jedzą albo piją. Daje nam także narzędzia do badania ich zachowań. Amperomierze do pomiarów elektrycznego ładunku powierzchniowego pszczoł, tunele aerodynamiczne do badania ich lotu. Kamery na promieniowanie podczerwone do obrazowania ciepła wydzielanego przez ogon kalifornijskiej wiewiórki ziemnej czy temperatury kropli krwi wydalanej z odbytu samicy komara. Nieoczekiwanie techniczną gwiazdą tej książki okazała się kamera wideo rejestrująca ruch z prędkością setek,

a nawet tysięcy klatek na sekundę. Dopiero obserwując nagrania w zwolnionym tempie, uczeni dowiedzieli się, w jaki sposób komar unika zderzenia z kroplami deszczu oraz w jaki sposób owad z rodziny nartnikowatych przemyka po powierzchni wody.

Po drodze mieliśmy w *Kudłatej nauce* okazję poznać wielu sławnych uczonych. Według nas największym geniuszem pozostaje bezspornie Isaac Newton. Zapomnijcie o Albercie Einsteinie i jego trudnych do pojęcia rozważaniach na temat prędkości światła. Kiedy chodzi o klasyczną fizykę rządzącą życiem zwierząt, Newton jest naszym numerem jeden. Występował niemal w każdym rozdziale naszej książki dzięki odkryciu praw ruchu, dzięki swoim badaniom nad mechaniką cieczy oraz obliczeniom dotyczącym prędkości dźwięku (nawet jeśli pomylił się o 20 procent). Newton był dziwakiem – przez wiele lat starał się (bez powodzenia) zamienić zwykłe metale w złoto i miał kontrowersyjne poglądy religijne – ale w dziedzinie myślenia naukowego nie miał sobie równych, nawet jeśli narażał się na uszkodzenie wzroku, gdy wciskał sobie rozmaite przedmioty obok gałki ocznej, żeby zobaczyć, w jaki sposób zmienia jego sposób postrzegania świata.

Zainspirowane przez naturę

Fizyka nie ma jednak monopolu na mądrość. Idee często przepływały w przeciwnym kierunku, gdy to zachowania zwierząt stawały się inspiracją postępów w fizyce. Starożytni Grecy, zastanawiając się, jakie siły działają na przedmioty w ruchu, obserwowali woły ciągnące wóz. Wysiłki osiemnastowiecznych uczonych zmagających się z zagadką węgorzy elektrycznych pomogły nam zrozumieć zjawisko elektryczności. Dzięki

koniom, które wprawiały w ruch wiertło wycinające otwór w metalowym walcu, udało się udowodnić, że ciepło jest formą energii. Niemiec Otto Lilienthal (1848–1896) zbudował pierwszy na świecie szybowiec, przyglądając się lotowi bocianów.

Zwierzęta zainspirowały także powstanie nowych technologii. Czasami uczeni po prostu budowali sztuczne zwierzę, aby dowiedzieć się czegoś na temat zwierząt prawdziwych; widzieliśmy Robostridera, który naśladował ruchy owada chodzącego po wodzie, mechaniczną ćmę i wypchaną kalifornijską wiewiórkę ziemną z przemysłowymi podgrzewaczami w ogonie. Co bardziej znaczące, uczeni i inżynierowie, opracowując nowe technologie, starali się naśladować zachowania zwierząt, takie jak choćby wykorzystanie zjawiska wibracji w zainspirowanym przez zachowania słoni urządzeniu służącym do poprawy słuchu czy trzymający się podłoża materiał *geckskin* naśladowujący swoją budowę powierzchnię palców gekona. Nie zapominajmy także o hipotezie Newtona, że wspaniałe barwy pawiego ogona powstają nie za sprawą pigmentów, ale sposobu, w jaki światło słoneczne odbija się od powierzchni ich piór. To odkrycie – kiedy już udało się je potwierdzić – doprowadziło do powstania względnie nowej dziedziny badań dotyczących tak zwanych barw strukturalnych. Zawdzięczamy jej rozmaite wynalazki, od trudnych do podrobienia banknotów po inteligentne okna, które reagują na otoczenie, a nawet mierniki pozwalające sprawdzić, ile jest alkoholu w drinku.

Ten dwukierunkowy przepływ informacji nie powinien być dla nas zaskoczeniem. Zazwyczaj mówimy o biologii i fizyce, jakby nie miały ze sobą związków, ale to tylko nazwy, które nadajemy różnym sposobom patrzenia na przyrodę. Wygodne, lecz nie zawsze pomocne. Rozdzielanie fizyków i biologów – w rezultacie chodzą na inne zajęcia i uczą się innych przedmiotów – hamuje postęp. W końcu każda grupa mówi innym językiem:

dla fizyka jądro to zbiór cząstek w sercu atomu, dla biologa to struktura w sercu komórki kryjąca geny.

Wielu fizykom można zarzucić przekonanie, że wszystko sprowadza się do fizyki. Czym jest zwierzę – powiedzą – jak nie zbiorem atomów i cząsteczek, złożonych z elektronów, neutronów i protonów, które same składają się z kwarków i gluonów? To prawda. Ale mówi nam tylko tyle, ile usłyszeliśmy. Chociaż możemy odwołać się do ruchu cząsteczek powietrza, aby wyjaśnić, w jaki sposób pawie emitują infradźwięki, nie będziemy wiedzieli, dlaczego je wydają, jeśli nie poznamy obyczajów godowych tych ptaków. Świat to skomplikowane miejsce i nie zawsze można wszystko sprowadzić do fizyki, nie wspominając nawet o genetyce zwierząt, neuronauce czy fizjologii.

Poza tym fizyka nie jest całkiem niewinna. Rozwój techniki, w znacznej mierze opierający się na fizyce, doprowadził do zniszczenia wielu siedlisk zwierząt. Stojące na brzegu morza linie wysokiego napięcia i naszpikowane stalą hotele mogą zaburzać pola magnetyczne wykorzystywane przez żółwie morskie w procesie znajdowania drogi do domu. Wydobywanie koltanu, występującej w Demokratycznej Republice Konga rudy zawierającej tantal niezbędny do produkcji kondensatorów wszechobecnych w naszych telefonach komórkowych, laptopach i innych elektronicznych gadżetach, prowadzi do niszczenia siedlisk dzikich zwierząt i sprzyja polowaniu na goryle Grauera (*Gorilla beringei graueri*). Rozwój techniki przyniósł poprawę poziomu ludzkiego życia i przyczynił się do tak znacznego wzrostu populacji, że jako ludzkość zaczynamy zagarniać na potrzeby rolnictwa i budowy miast tereny należące niegdyś do dzikiej przyrody. Rewolucja przemysłowa zapoczątkowała spalanie paliw kopalnych, przyczyniające się obecnie do zmiany klimatu.

Niemniej rozwój techniki, wykorzystywanej mądrze, może być siłą

działającą na rzecz powszechnego dobra poprzez poprawę opieki medycznej, dostarczanie zdrowej wody pitnej oraz czystej energii, która nie będzie prowadziła do emisji dwutlenku węgla ani substancji zatruwających środowisko. Technika może także okazać się pomocna w ratowaniu przed wyginięciem gatunków zwierząt, które sami wpędziliśmy w kłopoty. Wspominaliśmy na przykład o wykorzystywaniu sejsmicznych nawoływań słońi do sprowadzania zabłąkanych samców na teren rezerwatu, aby oszczędzić im konfliktów z ludźmi. Z kolei wiedza o tym, że świeżo wyklute żółwie morskie zapamiętują parametry pola magnetycznego rodzinnej plaży, pomaga nam w ponownym wprowadzaniu żółwi na wybrzeża, na których niegdyś wyginęły z powodu działalności człowieka.

Znamy się

Zanim się rozstaniemy, powinniśmy jeszcze wspomnieć o pewnym problemie zamiatanym pod dywan. Czy zwierzęta naprawdę znają się na fizyce? Wiele razy mówiliśmy o nich w taki sposób, jak gdyby świadomie posługiwały się zasadami fizyki (po części dlatego że łatwiej opowiadać te wszystkie historie, uciekając się do antropomorfizacji). Ale czy zwierzęta potrafią rozumować, używając abstrakcyjnych pojęć, takich jak masa, grawitacja, siły albo wytrzymałość materiałów? Daniel Povinelli, antropolog z Uniwersytetu Luizjany w Stanach Zjednoczonych, podjął to pytanie w książce z 2000 roku: *Folk Physics for Apes. The Chimpanzee's Theory of How the World Works* (Fizyka ludowa dla naczelnych. Teoria szympanсів o tym, jak działa świat). W warunkach naturalnych szympansy wytwarzają narzędzia i następnie się nimi posługują; używają kamienia jako młotka oraz jakiegoś obiektu w roli naturalnego kowadła do rozbijania orzechów;

używają patyków do wyciągania termitów z gniazda. W laboratorium badacze obserwowali, że potrafią ustawić na sobie kilka skrzynek, jeśli chcą dostać się do bananów leżących poza swoim zasięgiem. Podobnie zoolog Alex Kacelnik z uniwersytetu w Oxfordzie, w Wielkiej Brytanii, pokazał kiedyś, że wrony z Nowej Kaledonii potrafią zagiąć drut w haczyk, żeby wyciągnąć małe wiaderko z jedzeniem z pionowej rury. Możesz nawet kupić swojemu psu puzzle, które zmuszą go do nauczenia się, jak dobrać się do smakołyku dzięki popychaniu plastikowych suwaków.

Mogłoby się wydawać oczywiste, że zwierzęta znają prawa fizyki, czy będą to szympansy, wrony czy którykolwiek z gatunków zwierząt opisanych w tej książce. Jednak niebezpieczeństwo związane z postrzeganiem zwierząt w taki sposób, jak gdyby zachowywały się tak jak my, polega na przyjmowaniu założenia, że myślą one tak samo jak my. Jeśli widzimy duże pudełko, wiemy, że trudniej będzie je unieść niż małe pudełko, jednak czy mamy prawo przypuszczać, że szympanś też tak myśli? Na podstawie starannych obserwacji szympanśów posługujących się narzędziami Povinelli doszedł do wniosku, że – jak ujął to kiedyś Gershwin – „niekoniecznie tak jest”. Szympansy nie dorównują nawet małym dzieciom w rozwijaniu swojego rozumienia świata fizycznego.

W dodatku szympansy (a także większość z nas, jeśli już o to chodzi) nie rozumieją fizyki we wszystkich jej wcieleniach, stąd termin „fizyka ludowa”. Zbudowaliśmy sobie obraz świata, który okazuje się skuteczny, gdy w naszym życiu wszystko toczy się normalnie, nawet jeśli ten obraz nie zawsze jest prawdziwy. Ludzie zwykle udzielają błędnej odpowiedzi na pytanie, w jaki sposób będzie spadał na ziemię przedmiot, który upuszczają podczas biegu. Większość sądzi, że przedmiot spadnie prosto na ziemię, choć w rzeczywistości spada, poruszając się jednocześnie do przodu, po linii parabolicznej. Povinelli zwraca uwagę na to, że skoro tak rzadko upuszczamy

przedmioty podczas biegu, nie ma znaczenia, czy znamy prawidłową odpowiedź na to pytanie. W większości sytuacji fizyka ludowa wystarcza, ale nie powinniśmy się łudzić przekonaniem, że znamy fizykę.

David Beckham potrafił po mistrzowsku posyłać piłkę futbolową w stronę bramki przeciwnika w taki sposób, że mijała mur obrońców, ale nigdy nie dostanie Nagrody Nobla za swoją wiedzę o wpływie turbulencji na ruch obrotowy sfery. Podobnie jak pszczoła i konik morski, Beckham potrafił tak wykorzystać turbulencje, aby dzięki nim osiągnąć swój cel, choć nie musiał wiedzieć – w kategoriach fizycznych – co właściwie robi. Czy chodzi o sztukę latania z małymi skrzydłami, czy zaczajanie się na swoją kolację, czy wreszcie o hat trick na boisku piłkarskim, rzecz w tym, aby fizyka działała na twoją korzyść, ponieważ jeśli to ci się uda, masz większą szansę na wygraną, a w życiu tylko zwycięzcy mogą przetrwać.

PODZIĘKOWANIA

Nigdy nie napisalibyśmy *Kudłatej nauki*, gdyby nie pomoc osób wymienionych poniżej, chcielibyśmy w tym miejscu wyrazić im swoją ogromną wdzięczność. Jesteśmy dłużnikami wszystkich uczonych, którzy wspaniałomyślnie poświęcili nam swój czas i chętnie dzielili się z nami swoją wiedzą, a jednocześnie okazali się wspaniałymi partnerami pogawędek i rozmów, zarówno na żywo, jak i drogą korespondencyjną. Nasze podziękowania zechcą przyjąć następujące osoby wymienione mniej więcej w kolejności „pojawiania się na ekranie”: Rick Shine, Andrew Dickerson, Claudio Lazzari, Masato Ono, Masami Sasaki, Aaron Rundus, Helmut Schmitz, Stephen Wroe, David Kisailus, Sheila Patek, Alyssa Stark, John Bush, Mark Denny, Roman Stocker, Michael Nauenberg, Sunny Jung, Brad Gemmell, Charlie Ellington, Matt Wilkinson, Angela Freeman, Holger Goerlitz, Bruce Young, Leo van Hemmen, Caitlin O’Connell, William Turkel, Kenneth Catania, Daniel Robert, Ken Lohmann, Marian Plotkin, Rüdiger Wehner, Matthias Wittlinger, Martin Stevens, Keita Tanaka, Shelby Temple i Sonke Johnsen. Dziękujemy wam za to, że podzieliliście się z nami swoją wiedzą, i przepraszamy, jeśli przypadkiem coś zrozumieliśmy nie tak, jak należy, ewentualne błędy obciążają tylko nas.

Wielkie podziękowania zechce także przyjąć nasz zespół pierwszych czytelników: Mike Follows, Holger Goerlitz, Tania Hershman, Patrick Kalaugher, Maxim Kosek, Bernd Kramer, David Pye, Vijay Shah, Su Smith,

Marric Stephens, Shelby Temple oraz Kate Watt. Dziękujemy wam za cierpliwość oraz inteligentne komentarze. Specjalne podziękowania dla Lotte Kammengi za wprowadzenie Liz w sekrety lotu opisane w *Cabin Pressure*.

Dziękujemy wszystkim w wydawnictwie Bloomsbury, w tym także Jimowi Martinowi i Annie MacDiarmid, za to, że zamówili tę książkę i poddali ją redakcyjnej obróbce, Aaronowi Gregory za fantastyczne ilustracje oraz Markowi Dando za doskonałe diagramy.

I wreszcie specjalne podziękowania dla Louise Mayor, redaktorki czasopisma „Physics World”, która w 2012 roku zaproponowała i przygotowała specjalne wydanie tego magazynu poświęcone „fizyce zwierząt”. To właśnie sukces tego przedsięwzięcia uświadomił nam, jak wspaniałym pomysłem może być książka na ten temat.

INDEKS GROMAD I GATUNKÓW ZWIERZĄT

Nazwy łacińskie podano tylko w przypadku ich wystąpienia w treści książki.

albatros

antylopy

bawół afrykański

bawół wodny

bezkęgowce

bizon

boa dusiciel

borsuk

bogatkowate (*Buprestidae*)

chomik

chrząszcze por. żuki

– *Melanophila acuminata* (ciemnik czarny z rodziny bogatkowatych)

– *Melanophila consputa*

chrząszcze ogniolubne

ciernik (*Gasterosteus aculeatus*)

czapla siwa (*Ardea cinerea*)

ćmy

– ćma trupia główka

– rolnica tasiemka (*Noctua pronuba*)

delfiny

diprotodon

dziesięcionogi

dziobak

dżdżownice

flamingi

gady

gąsienice

gekon

gekon toke (*Gekko gecko*)

gepard

gęsi

głowonogi (cefalopody)

goryl Grauera (*Gorilla beringei graueri*)

gryznie

grzechotnik

grzechotnik pacyficzny (*Crotalus oreganus*)

grzechotnikowate

hiena (*Hyaena hyaena*)

hipopotamy

homary

ichtiozaur

indyki dzikie

inia amazońska (*Inia geoffrensis*)

jaszczurki

– *Draco*

jaszczurki latające

jeleń

jętki

kaczki

kakapo (*Strigops habroptila*)

kalifornijska wiewiórka ziemna (susłouch plamkowany; *Otospermophilus beecheyi*)

kalmarowate

kałamarnice

– kałamarnica Humboldta (*Dosidicus gigas*)

– kałamarnica kolosalna (*Mesonychoteuthis hamiltoni*)

– kałamarnica olbrzymia (*Architeuthis*)

– *Loligo*

– *Onychoteuthis banksii*

kangur

karetta zob. żółw morski

kaszalot spermacetowy (*Physeter macrocephalus*)

kleszcze

kobra królewska

kolibry

komary

- *Aedes aegypti*
- *Anopheles freeborni*
- *Anopheles gambiae*
- *Anopheles stephensi*

konie

koniki morskie

- karłowaty (*Hippocampus zosterae*)
- pigmejowy (*Hippocampus satomiae*)

konik polny

koń

kot domowy (*Felis catus*)

kot szablozębny (*Smilodon fatalis*)

koty

koza

kraby zob. też tułacz hawajski

krewetka

- krewetka boksująca (modliszkowa) zob. rawka błazen
- krewetka pistoletowa (*Alpheus bellulus*)

krokodyl

krokodyl australijski słonowodny

królik

kruki

kukułka (*Cuculus canorus*)

kukułka kreskowana (*Cuculus fugax*)

kulanka pospolita (*Armadillidium vulgare*)

lampart

lancetogłów królewski (*Lampropeltis getula*)

langusty

– kalifornijska langusta kolczasta (*Panulirus interruptus*)

– *Palinustus waguensis*

– *Panulirus longipes*

latarenkowiec duży (*Anomalos katoptron*)

lew

lew morski

lisy

liście (*Phyllium*)

luszczowate

łasice

małże

mącznik

mątwy

meduza

megalania (*Varanus priscus*)

meszki

mirunga północna (słoń morski; *Mirounga angustirostris*)

modraczek zwyczajny (*Tarsiger cyanurus*)

mopek zachodni (*Barbastella barbastellus*)

motyle

mrówki

– *Cataglyphis fortis*

– mrówka saharyjska (*Cataglyphis bicolor*)

- *Myrmica laevinodis*
- *Odontomachus*
- *Odontomachus bauri*
- *Odontomachus haematodus*

mszyce

muchy

muszka owocowa (*Drosophila*)

mysz

nartnikowate

- *Gigantometra gigas*
- „żuki Jezusa”

niedźwiedź brunatny

nietoperze zob. także mopek zachodni

nosorożec

ogrodowiec zwyczajny (pończosznik, *red-sided garter snake*)

okrzemki

omułki

orły

osowate

osy

- *Encarsia formosa*
- osa figowa

ostrygojad zwyczajny (*Haematopus ostralegus*)

ośmiornice

- *Japetella heathi*

owady

owca

padalec

pająki

pajęczaki

palczak madagaskarski (aj-aj; *Daubentonia madagascariensis*)

panda

papugi

pasikoniki

pawie

– *Pavo cristatus*

pchły

pelikany

piaskogrzeb przyładkowy (kretoszczur; *Georychus capensis*)

pies

pingwiny

pliozaur

płazy

płetwal błękitny (*Balaenoptera musculus*)

płochacz pokrzywnica (*Prunella modularis*)

położowate

pończosznik zob. ogrodowiec

pszczoły

– europejska pszczoła miodna (*Apis mellifera*)

– japońska pszczoła miodna (*Apis cerana japonica*)

ptaki

ptaszorowate

pterodaktyle

– *Ornithocheiroidea*

pterozaury

– *Ananguera santanae*

– *Coloborhynchus robustus*

– *Quetzalcoatlus northropi*

pyton

raki

rawka błazen (krewetka modliszkowa; krewetka boksująca; *Odontodactylus scyllarus*)

rekin

rozwiazdy

roztocza *Varroa*

róża

rudzik zwyczajny

ryby

ryby latające

saharyjska żmija rogata (*Cerastes cerastes*)

sarna

skorpiony

skorupiaki

skunksy

słonie

– afrykański (*Lexodonta africana*)

– azjatyckie

słoń morski zob. mirunga

smok zob. waran

sokół wędrowny

sowa płomykówka

ssaki

Stenopus hispidus zob. także krewetka boksująca; rawka błazen

stonogi

stręwa zob. węgorz elektryczny

struś

strzelczyk (*Toxotes chatareus*)

strzelczyk indyjski (rodzaj *Toxotes*)

szczur

szczuroskoczek zmienny (*Dipodomys merriami*)

szerszenie

– szerszeń japoński (*Vespa mandarinia japonica*)

– szerszeń wschodni (*Vespa orientalis*)

szopy

szpak zwyczajny (*Sturnus vulgaris*)

szympany

śledź

ślepiec (*Spalax*)

ślimaki

– morskie

światlikowate (Myctophidae)

świnia

świnka morska

tajgówka japońska (*Cyanoptila cyanomelana*)

tau (*Opsanus tau*)

termity

Trialeurodes vaporariorum

Triatominae

trzcinniczek zwyczajny

trzmiele (rodz. *Bombus*)

– trzmiel ziemny (*Bombus terrestris*)

trzmielowate

tułacz hawajski (*Ocypode ceratophthalma*)

tygrys

ukwiały

waran z Komodo (*Varanus komodoensis*)

waranowate

ważki

ważki różnoskrzydłe

wciornastki

węgorz elektryczny (strętwą; *Electrophorus electricus*)

węgorze

węże zob. także boa dusiciel, grzechotnik, lancetogłów, ogrodowiec, pyton;

por. żmije

– *Pituophis catenifer catenifer*

węże latające (*Chrysoplea*); por. jaszczurki (*Draco*)

wężorowate (*Stomiidae*)

widłonogi

wieloryby

wiewiórki zob. też kalifornijska wiewiórka ziemna

– wiewiórka pospolita (ruda; *Sciurus vulgaris*)

– wiewiórka szara (*Sciurus carolinensis*)

wiewiórki latające (polatuchy)

wiewiórkowate (*Sciuridae*)

włócznik (miecznik; *Xiphias gladius*)

woły

wrona

wróbel

wydra morska

zawisak tytoniowy (*Manduca sexta*)

zawisakowate (*Sphingidae*)

zyfia gęsiogłowa (walu Cuviera; *Ziphius cavirostris*)

żaby

żaby latające

żmije zob. też saharyjska żmija rogata

żółwie

– żółw morski (karetta; *Caretta caretta*)

żuki por. chrząszcze

– *Merimna atrata*

– *Stenocara gracilipes*

INDEKS NAZWISK

Ackeret Jakob

Adams Douglas

Ampère André Marie

Angliss Sarah

Archimedes

Aristoff Jeffrey

Arystoteles

Attenborough David

Autumn Kellar

Baker Robin

Barbera Joseph

Beckham David

Beethoven Ludwig van

Bell Alexander Graham

Benndorf Hans

Berners-Lee Tim

Bernoulli Daniel

Bohr Niels

Bouligand Georges Louis

Bousack Herbert

Braille Louis

Bullock Sandra

Bush John

Buskey Edward

Carr Archie

Carwardine Mark

Catania Kenneth

Chan Brian

Chaplin Charlie

Choumet Valerie

Clarke Arthur C.

Clarke Dom

Clay Landon T.

Clay Lavinia D.

Collini Cosimo Alessandro

Coulomb Charles Augustin de

Cover Jack

Coward Noël

Cumberbatch Benedict

Cuvier Georges

Dalajlama XIV

D'Amore Domenic

Darwin Charles

Demoll Reinhard

Denny Mark

Dhinojwala Ali

Dickerson Andrew

Dickinson Michael

Dirac Paul

Disney Walt

Doppler Christian

Doyle Arthur Conan

Dudley Robert

Edgerton Harold

Einstein Albert

Ellington Charlie

Faraday Michael

Finnemore John

Ford Harrison

Franklin Benjamin

Freeman Angela

Friedel Paul

Frisch Karl von

Fry Bryan

Galecki Johnny

Galileo Galilei

Galvani Luigi

Gates Bill

Gemmell Brad

Gilbert William

Goerlitz Holger

Hanna William

Hare James

Heinlein Robert

Heisenberg Werner

Hemmen Leo van

Henslow John Stevens

Hertz Heinrich

Higgs Peter

Hoff Wilhelm

Hofstede Hannah ter

Hooke Robert

Houdini Harry

Hu David

Ibn Sahl

Ingram Dale

Ishay Jacob

Jallabert Jean

Johnsen Sönke

Joule James Prescott

Jung Sunny

Kacelnik Alex

Kaluza Theodor

Kipling Rudyard

Kisailus David

Krause Brian

Lahondère Chloé

Lamb sir Horace

Land Edwin

Laplace Pierre Simon

Lazzari Claudio

Leonardo da Vinci

Lilienthal Otto

Lohmann Ken

Lowell Jim

Lubbock John

Magnan Antoine

Maxwell James Clerk

Mills Zachary

Monroe Marilyn

Morain Malinda

Moreno Karen

Moyers Bill

Nauenberg Michael

Navier Claude-Louis

Newton Isaac

Nilsson Dan-Eric

O'Connell Caitlin

Ono Masato

Orwell George

Pacini Filippo

Parsons Jim

Patek Sheila

Plotkin Marian

Potter Beatrix

Povinelli Daniel

Prandtl Ludwig

Priestley Joseph

Ptolemeusz

Rattarithikul Manop

Rattarithikul Rampa

Rayleigh lord (John William Strutt)

Reagan Ronald

Reis Pedro

Richer Jean

Robert Daniel

Rundus Aaron

Runnalls Gordon

Sainte-Laguë André

Santschi Felix

Sasaki Masami

Schmitz Helmut

Schrödinger Erwin

Sheng Jian

Shine Rick

Snell Willebrord

Spielberg Steven

Stark Alyssa

Stevens Martin

Stocker Roman

Stokes George Gabriel

Stukeley William

Tanaka Keita

Temple Shelby

Tesla Nikola

Thompson Benjamin

Turkel William

Vater Abraham

Verne Jules

Vivaldi Antonio

Volta Alessandro

Vowles David

Waals Johannes Diderik van der

Walsh John

Warhol Andy

Warrant Eric

Watt James

Wehner Rüdiger

Weis-Fogh Torkel

Wilkinson Matt

Winckler Johann Heinrich

Wittlinger Matthias

Wolf Harald

Wordsworth William

Wroe Stephen

Young Bruce

Zeale Matt

Zylinski Sarah

Tytuł oryginału

Furry Logic. The Physics of Animal Life

Copyright © Matin Durrani and Liz Kalaugher, 2016.

This translation of Furry Logic is published by Społeczny Instytut

Wydawniczy

Znak by arrangement with Bloomsbury Publishing Plc and

Macadamia Literary Agency, Warsaw.

Opracowanie graficzne

Paweł Panczakiewicz/PANCZAKIEWICZ ART.DESIGN

www.panczakiewicz.pl

Ilustracja na okładce

Joanna Panek

www.joannapanek.com

Rysunki

Barbara Wrzos

GRAPHITO studio graficzne

Opieka redakcyjna

Kamila Piechota

Korekta

Małgorzata Biernacka

Barbara Gąsiorowska

Indeks

Artur Czesak

Copyright © for the Polish translation by Jarosław Mikos
© Copyright for this edition by SIW Znak sp. z o.o., 2017

ISBN 978-83-240-5020-8

znak

Książki z dobrej strony: www.znak.com.pl

Więcej o naszych autorach i książkach: www.wydawnictwoznak.pl

Społeczny Instytut Wydawniczy Znak, ul. Kościuszki 37, 30-105 Kraków

Dział sprzedaży: tel. [12 61 99 569](tel:126199569), e-mail: czytelnicy@znak.com.pl

Plik opracował i przygotował Woblink

woblink
woblink.com