

BRIAN COX

ANDREW COHEN

Ukryte siły Natury



Profesor Cox przedstawia kosmos, jakiego nigdy wcześniej nie znaliśmy. — „SUNDAY EXPRESS”

B R I A N C O X

A N D R E W C O H E N

Ukryte siły Natury

tłumaczenie

RADOSŁAW KOSARZYCKI



Spis treści

Karta redakcyjna

Inna perspektywa

SYMETRIA

Wszechświat w płatku śniegu

Dlaczego pszczoły budują sześciokąty?

Pukając do drzwi chemii

Fundamentalne składniki i siły Natury

Dlaczego Ziemia jest sferą?

Dlaczego życie pojawiło się w tak wielu kształtach i rozmiarach?

Symetria i łamanie symetrii w biologii

Wszechświat w płatku śniegu

RUCH

Gdzieś w czasoprzestrzeni

Życie na orbitującej planecie. Pory roku

Formowanie Ziemi i Księżyca

Życie na orbitującej planecie. Burze

Życie na orbitującej, rotującej planecie. Przyływy

Szczególna teoria względności Einsteina

Gdzieś w czasoprzestrzeni

Obliczanie czasoprzestrzeni

PIERWIASTKI

Ćma i płomień

Chemia to nauka zajmująca się ruchem elektronów

Potwory Frankensteina

O powstawaniu gatunków. Ramy wnioskowania o sensie życia na Ziemi

Najstarsze życie na Ziemi

Ciepły mały staw?

Życie, termodynamika i entropia

Ćma i płomień
Bardzo odmienny Eden
Życie poza Ziemią

KOLOR

Bładoniebieska kropka
Tęczowe połączenie
Dlaczego Słońce świeci?
Fizyka jądrowa Słońca
Dlaczego gorące rzeczy świecą? Część 1: James Clerk Maxwell i złoty wiek
beprzewodowy
Dlaczego gorące rzeczy świecą? Część 2: Max Planck i kwantowa rewolucja
Nieoczekiwane wtrącenie: problem neutrin słonecznych
Bładoniebieska zielona planeta. Część 1: Oceany
Bładoniebieska zielona planeta. Część 2: Niebo
Bładoniebieska zielona planeta. Część 3: Ląd
Bładokolorowe kropki

Źródła ilustracji

Podziękowania

Zdjęcia

Przypisy

© Copyright by Copernicus Center Press, 2018

Originally published in the English language by HarperCollins Publishers Ltd. under the title *Forces of Nature*

Text © 2016 Brian Cox and Andrew Cohen

Diagrams, design and layout © 2016 HarperCollins Publishers

By arrangement with the BBC

Photographs © individual copyright holders

Tytuł oryginalny

Forces of Nature

Adiustacja i korekta

Mirosław Ruszkiewicz

Projekt okładki

Mariusz Banachowicz

Fotografia na okładce

Brian Cox © BBC 2016

Skład

MELES-DESIGN

ISBN 978-83-7886-374-8

Wydanie I

Kraków 2018

Copernicus Center Press Sp. z o.o.

pl. Szczepański 8, 31-011 Kraków

tel./fax (+48 12) 430 63 00

e-mail: marketing@ccpress.pl

Księgarnia internetowa: <http://ccpress.pl>

Konwersja: [eLitera s.c.](http://eLitera.s.c.)

Dla mojego taty, Davida

Brian Cox

Dla Benjamina, Marthy, Theo, Dana, Jake'a, Lyli,
Ellie, Toby'ego, Phoebe, Maxa, Zaka, Josha, Isaaca
i Tabithy, bo ciekawe młode umysły zawsze zadają
najmądrzejsze pytania.

Andrew Cohen

POSZUKIWANIE NAJGŁĘBSZYCH ODPOWIEDZI

NA NAJPROSTSZE PYTANIA

Co za piękno. Widziałem chmury i ich delikatne cienie na odległej drodze Ziemi... Woda wyglądała jak ciemnawe, delikatnie połyskujące plamy... Gdy spoglądałem na horyzont, widziałem gwałtowne, kontrastujące przejście między jasną powierzchnią Ziemi a absolutnie czarnym niebem. Cieszyłem się bogatą paletą barw Ziemi. Jest ona otoczona błękitną aureolą, która stopniowo ciemnieje, przechodzi w turkus, ciemny błękit, fiolet i w końcu w węgielną czerń.

Jurij Gagarin

Inna perspektywa

To książka o nauce. Czym jest nauka? To dobre pytanie, na które może istnieć tyle odpowiedzi, ilu jest naukowców. Ja bym powiedział, że nauka to próba zrozumienia świata naturalnego. Wiedza, którą odkrywamy, często brzmi abstrakcyjnie i zupełnie nie przystaje do tego, co jest nam bliskie, ale to złudne wrażenie. Nauka zajmuje się tłumaczeniem codziennych, najdrobniejszych szczegółów ludzkiego doświadczenia. Dlaczego niebo jest niebieskie? Dlaczego gwiazdy i planety są okrągłe? Dlaczego Ziemia się obraca? Dlaczego rośliny są zielone? To są pytania, które mogłoby zadać dziecko, lecz z pewnością nie są to pytania dziecinne; prowokują one bowiem łańcuch odpowiedzi, które z czasem wiodą do granic naszej wiedzy.

Jeżeli kopiesz wystarczająco głęboko, większość pytań kończy się na niepewności. Niebo jest niebieskie, ponieważ tak światło oddziałuje z materią, a sposób oddziaływania światła z materią określony jest przez symetrie, które ograniczają prawa Natury. Spotkamy jeszcze te twierdzenia w dalszych częściach książki. Jeżeli jednak dalej będziemy kopać i zadawać pytania o to, skąd się wzięły te konkretne symetrie lub dlaczego w ogóle istnieją prawa Natury, dojdziemy do tego wspaniałego, mglistego miejsca, w którym pracują i żyją naukowcy; przestrzeni między tym, co znane, a tym, co nieznane. To działka badaczy i prawdziwy dom ciekawości oraz zachwyty.

Wielkie pytania czają się w półmroku. W jaki sposób powstało życie na Ziemi? Czy istnieje życie na innych planetach? Co się stało w pierwszych kilku chwilach po Wielkim Wybuchu? To są pytania, które wywołują uczucie głębi, złożoności i nierozwiązywalności, lecz techniki i procesy wykorzystywane przez nas do poszukiwania odpowiedzi na nie są dokładnie takie same jak do odkrywania, dlaczego niebo jest niebieskie. To ważna informacja. Jeżeli pytanie wydaje się głębokie, nie oznacza to, że aby na nie odpowiedzieć, trzeba się na rok zaszyć w dziczy, usiąść ze skrzyżowanymi nogami i mieć nadzieję, że nas olśni. Najczęściej odpowiedzi są tworzone z informacji uzyskanych w systematycznym i dokładnym badaniu prostszych zagadnień. To przewodnia myśl naszej książki. Próbując zrozumieć świat otaczający nas na co dzień – barwy, strukturę, zachowanie i historię naszego domu – budujemy wiedzę i techniki niezbędne do tego, aby wyjść poza codzienność i zbliżyć się do Wszechświata.

PIERWSZEGO
DNIA WSZYSCY
WSKAZYWALIŚMY
NASZE KRAJE. TRZECIEGO
CZY CZWARTEGO DNIA
WSKAZYWALIŚMY NASZE
KONTYNENTY. PIĄTEGO
DNIA WIDZIELIŚMY TYLKO
JEDNĄ ZIEMIĘ.

SUŁTAN BIN SALMAN BIN ABDULAZIZ AL SAUD,
PROM KOSMICZNY STS-51-G

CO CIEKAWE,
PATRZĄC NA ZIEMIĘ,
Z PRZEJĘCIEM
POMYŚLAŁEM:
MÓJ BOŻE,
TO MALEŃSTWO
JEST TAKIE KRUCHE.

MIKE COLLINS, GEMINI 10, APOLLO 11

Planeta Ziemia to najłatwiejsze we Wszechświecie miejsce do badania, ponieważ na niej żyjemy, ale mimo to jest ona zdumiewająco skomplikowana. Przede wszystkim to jedyna planeta, o której wiemy, że posiada życie. Jest domem dla ponad siedmiu miliardów ludzi i co najmniej 10 milionów gatunków zwierząt i roślin. Jej powierzchnia w 29 procentach pokryta jest lądami, a ludzie podzielili te 148 326 000 kilometrów kwadratowych na 196 krajów, choć nie wszyscy zgadzają się co do tej liczby. W tych granicach, odzwierciedlając osobliwości 10 000 lat historii człowieka, istnieje ponad 4000 religii. Niektórzy chcą zwiększyć liczbę krajów, inni chcą zmniejszyć liczbę religii. Jak na taki mały świat krążący wokół zwykłej gwiazdy w przypadkowej galaktyce, nie jest on zbyt zorganizowany i trudno go zrozumieć przez tę zaściankową mgłę. Zaledwie nieco ponad 500 osób wzbiło się na tyle wysoko, aby zobaczyć nasz dom z przestrzeni kosmicznej – mały glob na tle gwiazd – a gdy to już zrobili, stało się coś interesującego. Zaczęli widzieć przez mgłę i wracali na Ziemię nie z opisem segregacji i złożoności, ale jedności i prostoty.

Gdy w końcu znajdziesz się na Księżycu i spojrzysz na Ziemię, wszystkie te różnice i cechy narodowe zlewają się w jedno i zaczynasz się zastanawiać, czy być może to naprawdę jest jeden świat i dlaczego, do diabła, nie możemy nauczyć się żyć obok siebie jak normalni ludzie.

Frank Borman, Gemini 7, Apollo 8

Gdyby ktoś przed lotem powiedział: „Czy poniesie cię, gdy spojrzysz na Ziemię z Księżycy?“, powiedziałbym: „Nie, nie ma mowy”. Jednak gdy po raz pierwszy spojrzałem na Ziemię, stojąc na Księżycu, popłakałem się.

Alan Shepard, Mercury 3, Apollo 14

Astronauci nie silili się na poetyckie komentarze. To wypowiedzi ludzi, których doświadczenie dało im inną perspektywę. Astronauci widzą prostotę, ponieważ zostali zmuszeni do spojrzenia na świat w inny sposób. Stanowimy jeden gatunek mieszkający na jednej planecie i mamy jedną szansę, aby to wszystko zepsuć. Nie możemy wszyscy być astronautami, ale możemy być naukowcami i wydaje mi się, że nauka oferuje podobną perspektywę jak wysokość. Ona nas wynosi, umysłowo, a nie fizycznie, i pozwala nam badać krajobraz rozciągający się pod nami. Szukamy regularności, a gdy je dostrzeżemy, szukamy ich źródła. Wracając z przestrzeni kosmicznej, Scott Carpenter, oficer amerykańskiej marynarki wojennej oraz weteran wojny w Korei, stwierdził, że powinniśmy być lojalni nie w stosunku do naszych krajów, lecz do rodziny ludzi i planety jako całości. Podróże kosmiczne umożliwiają zmianę perspektywy i tak też jest z nauką. Im więcej wiemy o Naturze, tym piękniejsza się wydaje i tym bardziej rozumiemy, jakim przywilejem jest możliwość spędzenia naszego krótkiego życia na jej badaniu. Bądź dzieckiem. Przyjrzyj się małym rzeczom. Nie daj się kierować uprzedzeniom. Nie przyjmuj niczego na wiarę. Obserwuj i myśl. Zadawaj proste pytania. Szukaj prostych odpowiedzi. Właśnie to będziemy robić w tej książce i mam nadzieję, że zbliżając się do końca, przynasz rację Scottowi Carpenterowi.

TA PLANETA TO NIE *TERRA FIRMA*.
TO DELIKATNY KWIAT, O KTÓRY TRZEBA
DBAĆ. JEST SAMOTNY. JEST MAŁY.
JEST ODIZOLOWANY I NIE MA ZAPASÓW.
A MY NIE TRAKTUJEMY GO WŁAŚCIWIE.
WYRAŹNIE NASZA NADRZĘDNA
LOJALNOŚĆ POWINNA BYĆ SKIEROWANA
NIE KU NASZEMU KRAJOWI CZY
NASZEJ RELIGII, CZY NASZEMU MIASTU
RODZINNEMU, CZY NAWET KU NAM
SAMYM. POWINNA BYĆ SKIEROWANA
KU – NUMER DWA – RODZINIE LUDZI
I – NUMER JEDEN – KU PLANECIE
JAKO CAŁOŚCI. TO NASZ DOM, I TO
WSZYSTKO, CO MAMY.

SCOTT CARPENTER, MERCURY 7

SYMETRIA

Wszechświat w płatku śniegu

U wielbiam fotografię Wilsona „Snowflake’a” Bentleya (zob. wklejka, strona 2); z przechyloną głową, zadowolony, chroniony przed zimnem przez ciekawość, pochłonięty szczegółami Natury, którą trzyma ostrożnie w obu dłoniach, nieświadomy śniegu padającego na jego kapelusz. Bez rękawic. Jako piętnastolatek z Jericho w stanie Vermont, Bentley spędzał śnieżne dni od listopada do kwietnia przy zniszczonym mikroskopie, szkicując płatki śniegu, zanim zdążyły się roztopić. Sfrustrowany ich przemijaniem, zbyt szybkim, aby można było je uchwycić bardzo szczegółowo, zaczął eksperymentować z kamerą i 15 stycznia 1885 roku wykonał pierwsze na świecie zdjęcie płatka śniegu. Na przestrzeni kolejnych 45 lat zebrał ponad 5000 zdjęć i poświęcił swoje życie dokładnym obserwacjom i dokumentacji kropli deszczu, płatków śniegu oraz mgieł sunących przez jego farmę.

Te delikatne zdjęcia świata dostępnego każdemu, ale rzadko przez kogokolwiek dostrzeganego, poruszyły wyobraźnię opinii publicznej. Jak mogło być inaczej? One są magiczne, nawet dzisiaj, w erze powszechnej fotografii. Śmiało spójrzcie na te struktury, nieskończone i przepiękne – by sparafrazować Darwina – i spróbujcie się nimi nie zainteresować. W jaki sposób powstają? Jakie mechanizmy naturalne mogą przypominać pracę szalonego, niecierpliwego rzeźbiarza opętanego podobieństwem, a jednocześnie niezdołnego do wyrzeźbienia dwóch takich samych obiektów?

To pytania dotyczące praktycznie każdej naturalnie występującej struktury, na które Darwin odpowiedział w odniesieniu do zwierząt w swojej pracy *O powstawaniu gatunków*. W maju 1898 roku Bentley wraz z George’em Henrym Perkinsem, profesorem historii naturalnej na Uniwersytecie Vermont, napisał artykuł dla periodyku „Appletons’ Popular Science”, w którym stwierdził, że dowody przeanalizowane klatka po klatce poświadczają, iż żadne dwa płatki śniegu nie są takie same. „Każdy kryształ był majstersztykiem i żaden wzór nigdy się nie powtórzył”, napisał. Ich unikatowość jest częścią fascynacji i romansu, a mimo to mają coś wspólnego; wszystkie charakteryzują się „sześciokątną symetrią”. Co jest bardziej interesujące? Prawdopodobnie zależy to od charakteru obserwatora.

Johannes Kepler znany jest przede wszystkim dzięki odkrytym przez siebie prawom ruchu planet. Analizował bardzo precyzyjne obserwacje przeprowadzone przez duńskiego astronoma Tychona Brahe, tak samo jak Snowflake Bentley analizował swoje zdjęcia i dostrzegł w zgromadzonych danych pewne regularności. Te regularności pozwoliły mu zaproponować teorię, według której planety poruszają się po orbitach eliptycznych wokół Słońca, zakreślając równe powierzchnie w równych okresach czasu, a prędkość orbitalna jest związana z ich średnią odległością od Słońca. Empiryczne prawa Keplera stanowiły podłoże, na którym Isaac Newton stworzył swoje prawo powszechnego ciążenia opublikowane w 1687 roku; co według wielu (powiedziałbym, że wszystkich, ale trzeba także uszczęśliwić

wątpiących historyków) jest pierwszą współczesną pracą naukową.

W grudniu 1610 roku, wkrótce po opublikowaniu dwóch ze swoich trzech praw w „Astronomia Nova”, Kepler ciemną nocą przemierzał most Karola w Pradze, gdy płatek śniegu wylądował na jego płaszczu. Wyrażna struktura eleganckiego, białego niemal niczego przykuła jego uwagę. Napisał o niej nawet małą książkę zatytułowaną *Podarek, czyli o sześciokątnych płatkach śniegu*. To praca naukowa, która przenika czas i stanowi wartościowy i zabawny wgląd w umysł jej autora. Strona tytułowa książki nosi podpis: „Dla szanownego Doradcy na dworze Jego Królewskiej Mości, Lorda Matthausa Wackera von Wackenfelsa, pasowanego na rycerza, Patrona Pisarzy i Filozofów, mojego Lorda i Dobroczyńcy”. Językowi współczesnemu brakuje tego smaku; chciałbym móc coś równie wspaniałego zamieścić na początku swojej książki.

Jako współczesny projekt badawczy, *Podarek, czyli o sześciokątnych płatkach śniegu* Keplera przepadłby już na samym początku, bowiem zaczyna się słowami: „Jestem w pełni świadomy, jak bardzo podoba ci się Nicłość, nie tyle z powodu niskiej ceny, ile z powodu uroczego i subtelnego *jeu d'esprit* zabawnego Passereau^[1]. Dlatego też bez obaw mogę stwierdzić, że podarek będzie dla ciebie tym przyjemniejszy, im bliższy będzie niczemu”. No, to jest dopiero stwierdzenie o przewidywanym skutku ekonomicznym; im moje badania będą bliższe nicości, tym będą bardziej wartościowe. Spróbuj to umieścić w swoim arkuszu kalkulacyjnym... Keplerowi nie udaje się wytłumaczyć struktury płatków śniegu – jak miałoby mu się to udać? Pełne wytłumaczenie wymaga teorii atomów i sporej części maszynierii współczesnej fizyki; zajmiemy się tym nieco później. Udaje mu się natomiast ukazać radość z nauki; sama idea wciągających badań Natury ma ogromną wartość, niezależnie od ich wyników. Jego książka wprost eksploduje ciekawością, kipi od domysłów dotyczących płatków śniegu i ich podobieństwa do innych regularnych kształtów występujących w świecie naturalnym; pięciopłatkowe kwiaty, nasiona granatów czy plastry miodu. Autor opisuje tak wiele kwestii, skacząc z jednego tematu na drugi, że w końcu, z właściwą sobie wnikliwością, sam siebie podsumowuje słowami: „Jednak zbyt się rozpędziłem, próbując dać tobie podarek Niczego, i prawie Nic sobie z tego nie robiłem. Z tego niemal Niczego niemal odtworzyłem cały Wszechświat, który zawiera wszystko!”.

Kepler zadaje jednak wyraźne pytanie, które stawia sobie każdy, oglądając wspaniałe fotografie Snowflake’a Bentley’a: w jaki sposób z pozbawionego formy źródła powstają struktury tak uporządkowane i regularne jak płatki śniegu? „Skoro tak się zawsze dzieje, że kiedy zaczyna padać śnieg, pierwsze jego cząstki przyjmują kształt małych, sześciokątnych gwiazd, musi być po temu jakiś powód; bo gdyby to było dziełem przypadku, to dlaczego miałyby zawsze sześć rogów, a nie pięć czy siedem, skoro i tak są rozproszone i różne od siebie, zanim połączą się w chaotyczną masę?”

Kepler wiedział, że śnieg powstaje z pary wodnej, która nie ma żadnej wyraźnej struktury. Skąd zatem płatki śniegu biorą swoją strukturę? Co ta sześciokątna struktura mówi nam o elementach, z których zbudowane są płatki śniegu, i o siłach, które je rzeźbią? To współczesny sposób na przyglądanie się światu, sposób rozpoznawalny dla każdego fizyka.

Wgląd Keplera i jego zachwycająca frustracja spowodowana brakiem wiedzy, która pozwoliłaby na dojście do odpowiedzi, rozbrzmiewa niczym echo przez stulecia. „Pukałem do drzwi chemii – pisze – i widząc, jak wiele jeszcze trzeba powiedzieć w tym temacie, zanim poznamy powód, wolę usłyszeć, co o tym myślisz, mój geniuszu, a następnie dyskutować o tym, aż padnę. Nic po tym. Koniec”.

Nauka to rozkoszna frustracja. Polega na zadawaniu pytań, na które odpowiedzi mogą być niedostępne – teraz lub nawet zawsze. Polega na zauważaniu regularności, upewnianiu się, że te regularności mają naturalne wytłumaczenie, i poszukiwaniu tych wyjaśnień. Celem tego rozdziału, zainspirowanego przez Keplera i Snowflake’a Bentley’a, jest próba wytłumaczenia złożonych kształtów występujących w Naturze: od uli pszczelich do gór lodowych, od planet do swobodnie spadających teściowych (naprawdę!). To wszystko sprawi, że zaczniemy myśleć o tym, jak taka różnorodność i złożoność może powstać z praw Natury, których przecież jest niewiele i są stosunkowo proste. Pod koniec rozdziału natomiast wytłumaczymy strukturę płatków śniegu.

Dlaczego pszczoły budują sześciokąty?

Pszczoły mają trudny problem do rozwiązania. Jak przechowywać miód, pożywienie, które wyżywi kolonię przez długie zimowe miesiące? Wiemy, że pszczoły w tym celu budują plastry miodu. Kepler był zainteresowany strukturą plastrów miodu, ponieważ są zbudowane, jak to napisał, za pomocą „agenta”. Skoro poszukiwał „agencji” odpowiedzialnej za rzeźbienie płatków śniegu, postanowił poszukać powodu, dla którego pszczoły budują sześciokąty. Dzięki Darwinowi moglibyśmy zaproponować, że odpowiedź ma jakiś związek z dobozem naturalnym, który jest prostą i silną ideą. Jeżeli odziedziczona cecha lub zachowanie gwarantują korzyść w czymś, co Darwin nazywał „walką o byt”, ta cecha zacznie dominować w kolejnych pokoleniach po prostu dlatego, że jest większe prawdopodobieństwo jej przekazania. Suma cech fizycznych, zachowań i konstrukcji organizmu znana jest jako fenotyp i to właśnie na nim operuje dobór naturalny. Jeżeli dobór naturalny stoi za budową plastrów miodu, powinniśmy być w stanie zrozumieć, dlaczego ich sześciokątny kształt stanowi korzyść dla pszczół, które go zbudowały.

Karol Darwin był zafascynowany pszczołami i podążał dokładnie tą samą ścieżką. „Musi faktycznie być nudnym człowiekiem ten, kto może badać fantastyczną strukturę plastra, tak wspaniale dopasowaną do swojego celu, bez entuzjastycznego podziwu”, napisał w *O pochodzeniu gatunków*. Uwielbiam bezpośredniość wiktoriańskiego piśmiennictwa; jeżeli twój umysł nie zadaje pytań, jesteś nudziarzem. W tej samej doniosłej pracy Darwin opisuje serię eksperymentów, które przeprowadził w celu zrozumienia instynktu budowania komórek przez pszczoły z ula.

(...) początkowo wydaje się niewyobrażalne, jak mogą one zachować wszystkie niezbędne kąty i płaszczyzny, lub nawet dostrzegać, że zostały wykonane prawidłowo. Jednak trudność nie jest aż tak wielka, jak się wydaje na początku: całą tę przepiękną pracę, zdaje mi się, można sprowadzić do zaledwie kilku bardzo prostych instynktów.

W celu zidentyfikowania tych prostych instynktów Darwin porównał zachowanie budujących plastry pszczół miodnych z mniej architektonicznie uzdolnionym gatunkiem pszczoły meksykańskiej *Melipona domestica*. Pszczoły *Melipona* budują regularne plastry cylindrycznych komórek, które Darwin uznał za prostszy kształt geometryczny, stadium pośrednie między brakiem struktury a sześciokątami pszczoły miodnej. „Możemy bezpiecznie stwierdzić, że gdybyśmy mogli delikatnie zmodyfikować instynkty, w które wyposażone są pszczoły *Melipona*, pszczoła ta tworzyłaby struktury równie idealne, co te tworzone przez pszczoły miodne”.

Aby przetestować tę hipotezę, Darwin przeprowadził serię eksperymentów we współpracy ze swoim przyjacielem i innym naturalistą Williamem Bernhardtem Tegetmeierem. Dodali oni różnokolorowe farby do wosku pszczelego, dzięki czemu mogli tworzyć wizualny zapis

procesu konstrukcji, który pozwolił im dowiedzieć się, że pszczoły najpierw budują cylindryczne komórki, a następnie modyfikują je tak, aby przyjęły kształt sześciokątów. Darwinowi udało się to opisać w ramach procesu doboru naturalnego:

Tym sposobem można, jak sądzę, wytłumaczyć ten najdziwniejszy ze wszystkich znanych instynktów, instynkt budowania plastrów, za pomocą przypuszczenia, że dobór naturalny korzystał stopniowo z mnóstwa kolejnych drobnych modyfikacji w prostszych instynktach. Przez drobne stopniowania coraz doskonalej doprowadzał on pszczoły do zakreślania kul w należytych odległościach od podwójnej warstwy, do wznoszenia i wydrążania w wosku wzdłuż płaszczyzny przecięcia, chociaż, oczywiście, pszczoły nie wiedzą o tym, że zakreślają kule w odpowiednich odległościach, tak jak nie wiedzą, jakie są kąty graniastosłupów lub romboidalnych blaszek u ich podstawy. Bodźcem do działania procesu doboru naturalnego było zbudowanie komórek należycie trwałych i mających formę i wielkość odpowiednią dla larw, z największą przy tym oszczędnością wosku i pracy. Pojedynczy rój, który budował najlepsze komórki z najmniejszym wydatkiem pracy i potrzebował najmniej miodu do wydzielania wosku, rozwijał się najpomyślniej i swój nowo nabyty instynkt oszczędności przekazywał późniejszym rojom, które z kolei miały najwięcej szans na zwycięstwo w walce o byt.

Darwin doszedł do wniosku, że pszczoły budują sześciokątne plastry miodu, ponieważ są one najbardziej ekonomicznym sposobem na podział powierzchni przeznaczonej na przechowywanie miodu. Sześciokąty wykorzystują mniej wosku, a pszczoły, które wykorzystują mniej wosku, są wydajniejsze i mają większą szansę na przetrwanie i przekazanie odziedziczonego zachowania kolejnemu pokoleniu. To ma sens, gdyż budowanie woskowego plastra wymaga dużych ilości miodu; aby wyprodukować jeden gram wosku, pszczoła musi zjeść nawet osiem gramów miodu. To wyraźny powód przemawiający za wydajnym budowaniem, bo wykorzystanie jak najmniejszej ilości wosku maksymalizuje ilość miodu dostępnego jako pożywienie – to przewaga, która ukształtowała zachowanie pszczół miodnych przez pokolenia.

Czy tak faktycznie jest? Z pewnością jest to prawdopodobne. Gdyby pszczoły wykorzystywały cylindry do budowania swoich plastrów miodu, między poszczególnymi komórkami powstawałyby szczeliny, a cała struktura byłaby dużo mniej wydajna. Podobnie pięciokąty i ośmiokąty powodują powstawanie szczelin, więc także nie są optymalnym rozwiązaniem. Można sobie wyobrazić, że każda komórka może być formowana w unikatowy kształt, tak aby dopasowywała się do swojego sąsiada. W tym scenariuszu personalizacji każda komórka miałaby inny kształt, ale luki w plastrze miodu byłyby minimalizowane. Problemem tej strategii jest to, że jedna pszczoła musi skończyć, zanim druga zacznie dopasowywać do niej swoją komórkę. To nie jest wydajne użycie dostępnego czasu. Powtarzalny jeden kształt niepozostawiający żadnych luk wydaje się tutaj lepszym rozwiązaniem. Kwadrat, trójkąt i sześciokąt to jedyne regularne figury geometryczne, które dopasowują się do siebie na płaszczyźnie, nie pozostawiając luk^[2].

Dlaczego jednak pszczoły wykorzystują sześciokąty? Około 36 roku p.n.e. rzymski uczyony Marek Terencjusz Warron sporządził najstarszy znany nam opis wytłumaczenia budowy plastra miodu. Stwierdza w nim, że najwydajniejszym sposobem podziału powierzchni na

obszary o tej samej wielkości (komórki) przy możliwie najmniejszym łącznym obwodzie (wosk) jest wykorzystanie regularnej siatki sześciokątnej albo plastra miodu. W pracy nie znalazł się żaden dowód, a to zapewnienie pozostało przypuszczeniem jeszcze przez 2000 lat, do 1999 roku, kiedy to matematyk z Uniwersytetu Michigan o nazwisku Thomas Hales odkrył ten dowód: wzór sześciokątny jest najwydajniejszym wzorem inżynierskim. Dobór naturalny, który wybiera pod kątem wydajności i prowadzi do powstawania struktur będących niejako cieniem leżących u ich podstaw eleganckich praw matematycznych. Cóż za piękna odpowiedź na proste pytanie.

PSZCZOŁY ZATEM ZNAJĄ
TYLKO TEN FAKT, KTÓRY
JEST DLA NICH PRZYDATNY
– SZEŚCIOKĄT JEST
WIĘKSZY OD KWADRATU
I TRÓJKĄTA I POMIEŚCI
WIĘCEJ MIODU PRZY
TYM SAMYM KOSZCIE
MATERIAŁÓW POTRZEBNYCH
DO WYKONANIA KAŻDEGO
Z NICH.

PATRIARCHA ALEKSANDRII, A.D. 340

Cóż... być może, ale może też chodzić o coś więcej. W 2013 roku trzech inżynierów – Karihaloo, Zhang oraz Wang – opublikowało artykuł zatytułowany *Plastry pszczoł miodnych: w jaki sposób okrągłe komórki zmieniają się w zaokrąglone sześciokąty*. Teoria mówi, że pszczoły miodne, tak jak pszczoły Melipona, uważane przez Darwina za marnych architektów, tworzą komórki, które początkowo są w przekroju okrągłe. Sześciokąty pojawiają się, ponieważ ciepło ciała pszczoły zmiękcza воск, podnosząc jego temperaturę do 45 stopni Celsjusza, kiedy to воск zaczyna płynąć jako lepki płyn. Okrągłe komórki wykonane ze stopionego wosku zachowują się wtedy podobnie do baniek mydlanych, łącząc się ze sobą pod kątem 120 stopni w każdym miejscu styku. Jeżeli wszystkie bąble lub komórki woskowe mają identyczne rozmiary i odstęp, kołowe komórki gwałtownie zamieniają się w plaster sześciokątów. Karihaloo i jego zespół zademonstrowali ten proces, wykorzystując dym do przeszkodzenia pszczołom miodnym w tworzeniu ula i udowadniając, że większość niedawno powstałych komórek była okrągła, podczas gdy starsze rozwinęły się już w sześciokąty. To przejście od budowy cylindrycznej do sześciokątnej wydaje się tym, co obserwował Darwin, jednak wytłumaczenie tego przejścia jest już inne.

Dobór naturalny wciąż stanowi podstawowe wyjaśnienie sześciokątów, ale pszczoły nie muszą się wysilać i budować najwydajniejszych kształtów opakowania, ponieważ fizyka robi to za nie, jeżeli otrzyma ładny plaster okrągłych komórek o zbliżonych rozmiarach i odstępach oraz trochę ciepła ciała pszczoły. Jak dla mnie, jest to jeszcze bardziej eleganckie i wydajne rozwiązanie; pszczoły pozwalają fizyce dokończyć swoją pracę! Jak napisali autorzy badania: „Nie możemy (...) ignorować ani nie możemy się nie zachwycić rolą odgrywaną przez pszczoły w tym procesie poprzez ogrzewanie, ugniatanie i rozciąganie wosku dokładnie tam, gdzie trzeba”. Czy to jest rozwiązanie problemu, który rozpałał wyobraźnię tak wielu przez tak długo? Pochodzenie sześciokątów wciąż jest badane, a artykuł autorstwa Karihaloo i współpracowników z pewnością nie jest ostatnim słowem na ten temat w literaturze.

Tak właśnie powinno być, i to ilustruje coś często pomijanego w prezentowaniu osiągnięć nauki. Wyniki naukowe zawsze są wstępne. Żaden dobry naukowiec nigdy nie powie, że oto przedstawił prawdę ostateczną dotyczącą badanej kwestii. Wyniki badań są publikowane, gdy autorzy i grupa badaczy z ich dziedziny uznają, że stanowią one wartościowy wkład w daną dziedzinę. Co ważne, nie oznacza to, że są one prawidłowe, a jedynie, że nie są na pierwszy rzut oka złe. Zamiast zamykać dany temat, publikacja służy za czerwoną płachtę na innych badaczy. Jak można przeczytać w częściowym, choć oczywistym zachwycie Keplera nad porażką poszukiwań satysfakcjonującego wytłumaczenia struktury płatka śniegu, prawdziwą radość może dać usłyszenie, co ty o tym myślisz, mój uczony kolego.

Pukając do drzwi chemii

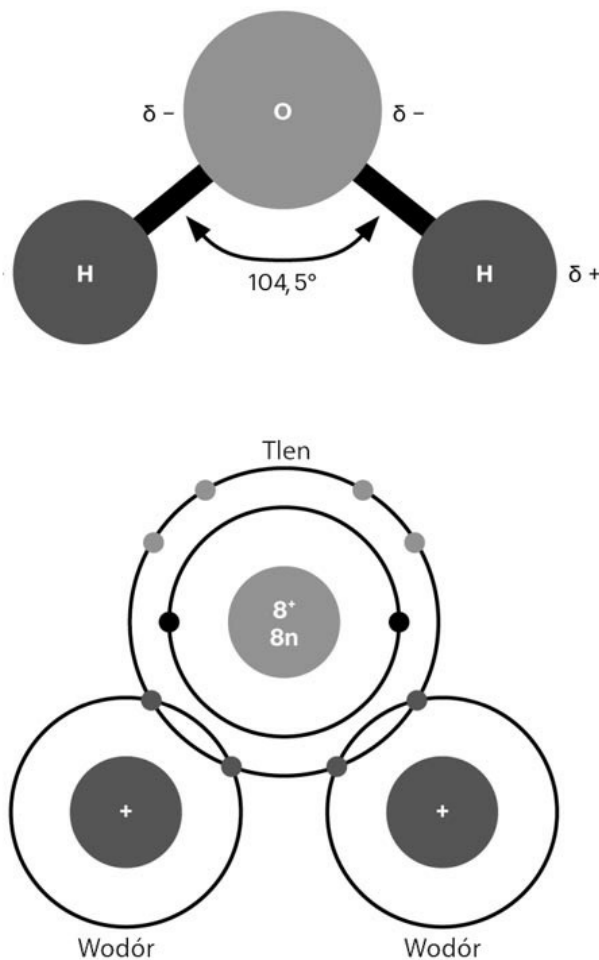
W ostatnich wersach *Podarku, czyli o sześciokątnych płatkach śniegu* Kepler pisze z uroczym żalem, że „puka do drzwi chemii”, wskazując, iż te drzwi zostaną otwarte przez przyszłe pokolenia. Zapewnia słusznie, że za strukturę płatków śniegu musi przynajmniej częściowo odpowiadać leżąca u jej podstaw struktura czy kształt, ale zważywszy na to, że teoria atomowa nie przeniosła się w rzeczywistość eksperymentalnie testowalnej nauki do początków XIX wieku, a struktura samych atomów została odkryta w XX wieku, Kepler nie miał żadnych możliwości otwarcia tych drzwi. Teraz już wiemy, że elementy, z których zbudowane są płatki śniegu, to cząsteczki wody, a z kolei cząsteczki wody są zdolne do ekstremalnie złożonych zachowań, gdy się ze sobą łączą. To może być zdumiewające stwierdzenie, kiedy myślimy o wodzie jako bezbarwnej, bezwonnej cieczy w szklance. Jednak nie powinno to być zaskakujące, jeżeli pomyślimy o cząsteczkach wody jako obiektach, które spontanicznie się ze sobą łączą, tworząc romantyczne zawijasy i wyjątkową różnorodność płatków śniegu.

Pojedyncze cząsteczki wody nie są jakoś szczególnie skomplikowane. To cząsteczki składające się ze związanych ze sobą atomów wodoru i tlenu. Tlen został po raz pierwszy wyizolowany w 1774 roku przez Josepha Priestleya, syna wytwórcy wełnianej odzieży z Yorkshire, a wodór po raz pierwszy został zidentyfikowany w 1766 roku przez Henry’ego Cavendisha. Nagroda Nobla w dziedzinie fizyki trafiła w 1926 roku do Jeana Baptiste’a Perrina za potwierdzenie fizycznej rzeczywistości cząsteczek. Wciąż żyją ludzie, którzy żyli wtedy – to doskonale pokazuje, jak trudnym zadaniem jest badanie świata mikroskopowego i jak szybko najnowsza nauka może stać się wiedzą powszechną.

Cząsteczka wody składa się z dwóch atomów wodoru związanych z jednym atomem tlenu: H_2O (zob. rysunek na następnej stronie). Cząsteczka wody nie jest liniowa. Atomy wodoru są ustawione względem siebie pod kątem 104,5 stopnia. Powodem tego stanu rzeczy jest obecność dwóch dodatkowych par elektronów znajdujących się po przeciwnej stronie niż atom tlenu. Aby wyjaśnić, dlaczego tak się dzieje, zrobmy szybki kurs fizyki atomowej i mechaniki kwantowej.

Atomy są złożone z trzech głównych składników, jeżeli patrzymy na nie z punktu widzenia chemii (później zajmiemy się tym dokładniej); składają się one z małych, gęstych jąder atomowych zbudowanych z protonów i neutronów oraz z krążących daleko od nich elektronów. Gdyby jądro atomowe miało rozmiar piłeczki tenisowej, zewnętrzne orbity elektronów miałyby promień kilku kilometrów. Wodór jest najprostszym pierwiastkiem; jego jądro składa się z jednego protonu. Kolejny jest hel zawierający dwa protony i dwa neutrony. Tlen posiada osiem protonów i osiem neutronów. Jądro jest otoczone przez elektrony, które są utrzymywane na orbicie przez jedną z czterech fundamentalnych sił Natury: elektromagnetyzm. Elektrony są naładowane ujemnie, a protony są naładowane dodatnio,

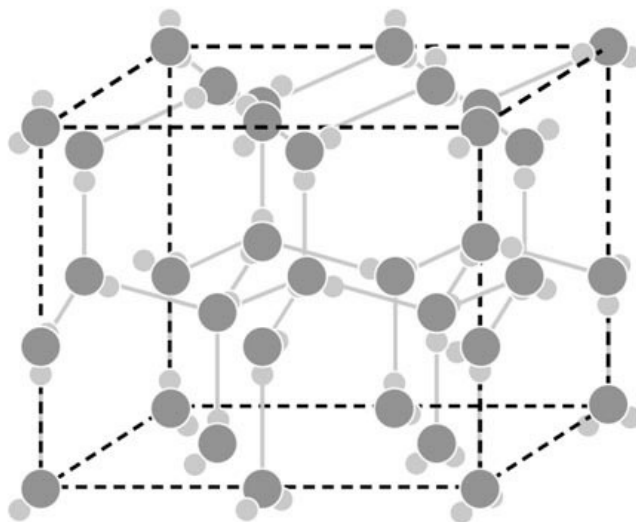
natomiast ujemny ładunek elektryczny elektronu jest dokładnie równy, lecz o przeciwnym znaku co ładunek dodatni protonu. Nikt nie wie, dlaczego te ładunki są tak dokładnie sobie równe co do skali; to jedna z wielkich tajemnic fundamentalnej fizyki. Atomy każdego pierwiastka chemicznego są elektrycznie obojętne, co oznacza, że liczba protonów w jądrze jest równa liczbie otaczających je elektronów. Dlatego też atomy wodoru posiadają po jednym elektronie, a atomy tlenu – po osiem.



Struktura cząsteczki wody przedstawiająca osiem elektronów tlenu, z których dwa są dzielone z atomami wodoru.

Teraz potrzebujemy odrobiny teorii kwantowej. Ładunek elektryczny jądra atomowego można przedstawić jako swego rodzaju pudło, w którym uwięzione są elektrony. Elektrony, wraz z wszystkimi fundamentalnymi składnikami Wszechświata, podlegają prawom teorii kwantowej, która opisuje, w jaki sposób się poruszają. Okazuje się, że podstawowe zasady teorii kwantowej są sprzeczne z intuicją i stawiają czoła zdrowemu rozsądkowi. Wszystko jest w porządku, wszak nie ma powodu, aby oczekiwać, że prawa rządzące Wszechświatem będą zgodne ze „zdrowym rozsądkiem”. Najbardziej fundamentalna zasada rządząca zachowaniem

cząstek subatomowych mówi, że nie lubią one stać w miejscu. Nieskrępowane najprawdopodobniej będą się przemieszczać, a im bardziej będziemy chcieli je unieruchomić, tym bardziej będą się przemieszczać. Obecność jądra nieznacznie poskramia anarchiczne elektrony, ograniczając ich ruch do „jądrowego pudełka”.



Sześciokątna krystaliczna struktura lodu 1_I . Cząsteczki wody są połączone ze sobą wiązaniami wodorowymi. Atomy tlenu z jednej cząsteczki wody ustawiają się z atomami wodoru z innej.

Inna zasada rządząca zachowaniem elektronów mówi, że nie przepadają one za towarzystwem innych elektronów. Zasada ta jest znana jako zakaz Pauliego, który także jest skutkiem praw teorii kwantowej. Elektrony rozmieszczają się tak wokół jądra, aby trzymać się z dala od innych. Istnieje jednak zastrzeżenie istotne dla zrozumienia struktury atomów. Elektrony o przeciwnym spinie mogą się do siebie zbliżyć (lub „łączyć w parę”). Oczywiście nie mogą się za bardzo do siebie zbliżyć, ponieważ mają ten sam ładunek elektryczny, a „te same ładunki się odpychają”. Spin to właściwość cząstek subatomowych, którą łatwo nazwać, ale trudno sobie wyobrazić. Możesz wyobrazić sobie elektrony jako małe bączki, choć jest to zła analogia z wielu powodów, więc w sumie lepiej tego nie robić. Niemniej spin jest miarą tego, jak szybko elektron się kręci – tyle że idea obracającego się punktu nie jest czymś, co można sobie łatwo wyobrazić. Dla cząstek takich jak elektrony, które są znane jako cząstki „o spinie $\frac{1}{2}$ ” lub fermiony, spin może przyjmować tylko dwie wartości; są to kolejno stan w górę i stan w dół. Spin jest bezpośrednią, choć subtelną konsekwencją połączenia szczególnej teorii względności Einsteina oraz teorii kwantowej zawartej przez fizyka Paula Diraca w 1928 roku w równaniach opisujących elektron. Szczegóły nie są tutaj istotne; to, co jest istotne, to fakt, że ujemnie naładowane elektrony są przechwytywane przez dodatni ładunek elektryczny protonów w jądrze atomowym i że elektrony trzymają się od siebie z daleka, choć elektrony o przeciwnym spinie mogą się do siebie zbliżyć bardziej niż te

o jednakowym spinie. To wystarczająco dużo informacji, abyśmy na poziomie podstawowym poznali cząsteczkę wody. Tlen posiada osiem elektronów. Dwa z tych elektronów znajdują się blisko jądra i nie odgrywają znaczącej roli w łączeniu dwóch atomów wodoru z tlenem. Pozostałe sześć jest współdzielonych zgodnie z diagramem przedstawionym [na stronie 32^{\[3\]}](#).

KOLEJNA ZASADA
RZĄDZĄCA
ZACHOWANIEM
ELEKTRONÓW MÓWI,
ŻE NIE LUBIĄ
ONE SWOJEGO
TOWARZYSTWA.
TO TAK ZWANY
ZAKAZ PAULIEGO.

Jedna z podstawowych idei w chemii, która ponownie ma swoje źródło w fundamentalnych prawach teorii kwantowej, mówi, że elektrony mogą być współdzielone z innymi atomami. Skutkiem tego jest powstawanie wiązań chemicznych. Dwa atomy wodoru będą dzieliły swoje pojedyncze elektrony z atomem tlenu, jeżeli mogą, łącząc się z nim w celu uzupełnienia dwóch pozostałych zewnętrznych luk wokół tlenu; tak powstaje cząsteczka wody przedstawiona na górnej ilustracji. Powodem 104,5-stopniowego odchylenia jest obecność pozostałych dwóch par elektronów na zewnętrznej powłoce atomu tlenu. Znajdują się one po przeciwnej stronie atomu tlenu niż atomy wodoru, nadając cząsteczce wody charakterystyczny kształt i wiele jej nietypowych właściwości.

Cząsteczka wody, tak jak składające się na nią atomy, jest elektrycznie obojętna, jednak nierówne rozłożenie elektronów oznacza, że jej odnoża złożone z atomów wodoru posiadają bardzo mały wypadkowy ładunek dodatni, podczas gdy tlen ma delikatny ładunek ujemny. Z tego też powodu woda jest uważana za związek biegunowy – posiada ujemny i dodatni biegun. To sprawia, że cząsteczka wchodzi na zupełnie inny poziom złożoności.

Ważnym skutkiem biegunowości wody jest fakt, że cząsteczki wody lubią się ze sobą łączyć. Ujemnie naładowane zakończenia tlenowe cząsteczek wody przyciągają dodatnio naładowane zakończenia wodorowe innych cząsteczek wody i łączą się ze sobą poprzez tak zwane wiązanie wodorowe. Proces ten zachodzi masowo w wodzie ciekłej, prowadząc przy tym do powstania całkiem dużych i złożonych struktur.

Skutki są nawet bardziej dramatyczne, gdy spadnie temperatura i woda zamarza, tworząc warstwę lodu. Lód wodny to naprawdę osobliwa rzecz. Istnieje siedemnaście znanych form lodu, z których najbardziej powszechny na Ziemi jest lód I_h (strukturę którego przedstawiono na ilustracji [na stronie 34](#)). Regularna struktura krystaliczna odpowiada za jedną z najbardziej osobliwych właściwości wody: lód unosi się na wodzie. To bardzo nietypowe zachowanie. Każde inne powszechnie występujące ciało stałe jest gęstsze w stanie stałym niż w stanie ciekłym, a tym samym nie unosi się na sobie w stanie ciekłym. Krystaliczna struktura lodu jest jednak na tyle porowata, że w warunkach ciśnienia atmosferycznego i 0 stopni Celsjusza ma 8 procent mniejszą gęstość niż woda w stanie ciekłym. Właśnie dlatego góry lodowe unoszą się na powierzchni oceanów.

To interesująca i zupełnie nietrywialna obserwacja. Sugerowano, że to nietypowe zachowanie mogło odegrać istotną rolę w ewolucji i przetrwaniu życia na Ziemi. Gdyby lód był gęstszy od wody w stanie ciekłym, opadałby na dno oceanów. W takim przypadku, szczególnie w trakcie zlodowaceń na Ziemi, jeziora, morza i oceany zamarzłyby od dna ku powierzchni, co sprawiłoby, że zamarzłyby na stałe. To miałoby dramatyczny wpływ na ekosystemy i łańcuchy pokarmowe opierające się na faunie uzależnionej od dna oraz na roślinności tak w zbiornikach słodko-, jak i słonowodnych.

Złożona struktura lodu jest skutkiem praw teorii kwantowej, których jest zaledwie kilka i które są proste. Mówiąc „proste”, nie chcemy w żaden sposób sugerować, że teoria kwantowa jest prosta do nauczenia i stosowania, bo tak nie jest. Matematyka od strony technicznej jest trudna. Teoria kwantowa jest prosta w tym sensie, że składa się z niewielkiej

liczby zasad matematycznych opisujących szeroką paletę zjawisk naturalnych wszystkich rozmiarów, od struktury atomów i cząsteczek do reakcji jądrowych zachodzących we wnętrzu Słońca. Opisują one także działanie prawdziwych narzędzi, takich jak tranzystory i lasery, a od niedawna również takich egzotycznych urządzeń, jak chociażby komputery kwantowe.

Niesamowita oszczędność opisu jest jedną z definiujących i najbardziej zaskakujących cech współczesnej nauki; *a priori* nie jest oczywiste, że niewielki zbiór fundamentalnych praw może opisywać nieograniczoną złożoność obiektów wypełniających nasz Wszechświat, a mimo to taką właśnie prawidłowość odkrywamy w ostatnich kilku stuleciach. Być może Wszechświat wystarczająco regularny, aby umożliwić istnienie obiektów naturalnych tak złożonych jak ludzki mózg, musi rządzić się prostym zestawem praw, lecz skoro nie znamy jeszcze źródła tych praw, to i tego jeszcze nie wiemy. Zdumiewające, że taka złożoność może opierać się na prostocie – zwykła cząsteczka wody jest tutaj dobrym przykładem. Jej asymetryczna, „odchylona” budowa, która koniec końców okazuje się odpowiedzialna za złożoną strukturę lodu, jest skutkiem praw teorii kwantowej, choć prawa te nie mają wbudowanych takich odchyleń. W istocie fizyk powiedziałby, że prawa te cechuje wysoki stopień symetrii, tak jak i jądra wodoru oraz tlenu; tworzą one sferyczne „pudełka jądrowe” do więzienia elektronów. Jednak połączenie ich ze sobą powoduje powstanie struktury asymetrycznej.

Idea symetrii jest centralna we współczesnej fizyce i wielokrotnie spotkamy się z nią w niniejszej książce. Jak na razie po prostu przyjmijmy, że asymetryczna struktura cząsteczki wody jest skutkiem sposobu, w jaki elektrony są rozmieszczone wokół jądra atomu tlenu. Dzieje się tak, ponieważ istnieją cztery dostępne zewnętrzne luki i sześć elektronów, które mogłyby je wypełnić – to właśnie dlatego powstaje asymetryczna budowa cząsteczki, gdy dwa atomy wodoru zbliżą się do tlenu. Taka struktura powstaje spontanicznie. Nikt nie musiał projektować cząsteczki wody i ustalać estetycznego kąta 104,5 stopni między wiązaniami! To skutek, ale nie arbitralnie wprowadzony, praw teorii kwantowej.

Właściwości wody są zatem wynikiem interakcji między cząsteczkami wody. Z kolei właściwości cząsteczek wody są wynikiem interakcji między ich składnikami – atomami wodoru i tlenu. Właściwości atomów wodoru i tlenu są wynikiem oddziaływań między ich składnikami – protonami, neutronami i elektronami – a oddziaływania te rządzą się prostym zestawem zasad. Czy ta regresja nigdy się nie kończy? Jak daleko możemy dojść, kopiąc coraz głębiej i głębiej w poszukiwaniu fundamentalnych praw rządzących właściwościami materii?

Fundamentalne składniki i siły Natury

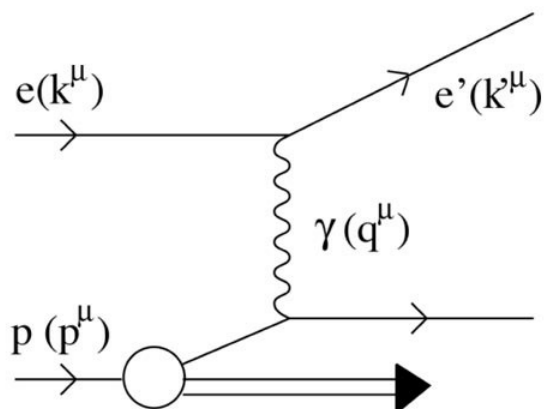
Dzisiaj mija 20 lat, odkąd zacząłem swoje studia doktoranckie. Dzisiaj jest 1 stycznia 2015 roku. Trzy lata później złożyłem swoją pracę pt. *Double Diffraction Dissociation at Large Momentum Transfer*. Byłem zainteresowany zachowaniem obiektu znanego jako pomeron, nazwanego tak na cześć rosyjskiego fizyka Izaaka Pomieranczuka. Poszukiwałem go w odłamkach powstałych w wysokoenergetycznych zderzeniach elektronów z protonami generowanych w akceleratorze cząstek HERA. HERA to żona Zeusa oraz skrót od Hadron-Electron Ring Accelerator (ang. cykliczny akcelerator hadronów i elektronów). Owa maszyna mająca obwód równy 6,7 kilometra znajduje się pod ulicami północnego Hamburga, który jest przepięknym miastem na studia. Zimą zamarza tam rzeka Elba, ale lodołamacze torują ścieżkę do portu i miasto nabiera bliskości z Morzem Bałtyckim. Latem małe plaże wzdłuż rzeki, poniżej starych domów stojących na Blankenese, są pełne turystów i miasto tętni życiem niczym ośrodek położony nad Morzem Śródziemnym. Wczesnymi porankami o każdej porze roku oderwany od rzeczywistości dwudziestokilkulatek z Oldham zazwyczaj podąża kolejką Reeperbahn. To zdumiewające, że ktoś może spędzić trzy lata, przyglądając się szczegółom wysokoenergetycznych zderzeń elektronów i protonów, poszukując w nich cząstki zwanej pomeronem.

Dlaczego interesowały mnie pomerony? Pracowałem nad testowaniem naszej najlepszej teorii jednej z czterech fundamentalnych sił Natury. Spotkaliśmy już jedną z tych sił – elektromagnetyzm – która utrzymuje elektrony na orbicie wokół jądra atomowego oraz cząsteczki wody poprzez wiązania wodorowe. Moje badania pomeronu były związane z badaniem innej siły z tej czwórki – oddziaływań silnych. Konieczność istnienia takiej siły jest oczywista, gdy pomyślimy o opisie jądra atomowego. To ciasno upakowana kula ośmiu dodatnio naładowanych protonów i ośmiu neutronów bez ładunku. Jedna z fundamentalnych właściwości siły elektromagnetycznej mówi, że podobne ładunki elektryczne się odpychają; dlaczego zatem nie dochodzi do rozerwania jądra atomowego? Odpowiedź mówi, że oddziaływania silne sklejają jądro atomu i są znacznie silniejsze niż odpychanie elektromagnetyczne między protonami.

Protony są małe, ale to z nich składa się nieco ponad połowa masy twojego ciała. Większość reszty twojego ciała składa się z neutronów. Przeciętny człowiek jest zbudowany z około 20 tysięcy milionów milionów milionów milionów protonów. W notacji naukowej to 2×10^{28} , czyli dwa z dwudziestoma ośmioma zerami. Na tym poziomie jesteś dość prosty.

Gdy zajrzymy głębiej do wnętrza protonów i neutronów, sytuacja staje się coraz bardziej skomplikowana. Protony są małe jak na nasze codzienne standardy, ale zmierzenie ich rozmiarów i zajrzenie do ich wnętrza znajduje się już w zakresie naszych możliwości naukowych i inżynierskich. Do tego została zaprojektowana HERA. Maszyna ta była gigantycznym mikroskopem elektronowym zaglądającym głęboko do wnętrza materii. Należy

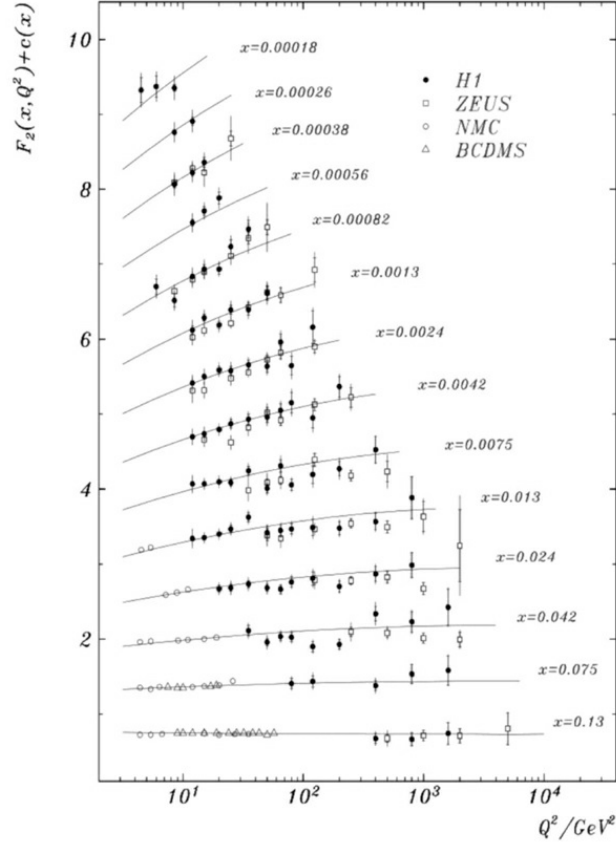
jednak ostrożnie zdefiniować w jakiś sposób słowo „rozmiary”, ponieważ proton nie ma wyraźnej krawędzi, choć ostatnie pomiary umieszczają jego promień nieco powyżej 0,8 femtometra, czyli niecałe 10^{-15} m – to tysięczna milionowej milionowej części metra^[4].



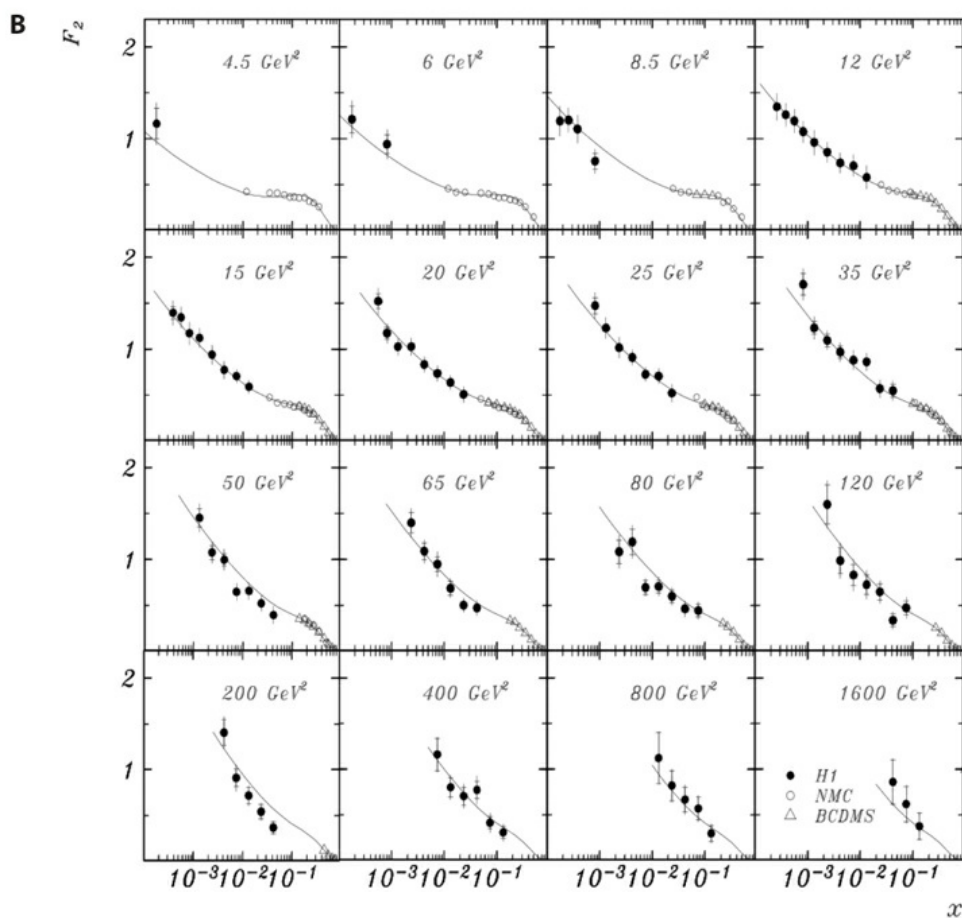
Proces rozpraszania głęboko nieelastycznego poprzez wymianę fotonów w prądzie neutralnym.

Z uwagi na to, że robię się stary i sentymentalny, choć także w służbie opowieści, zamieściłem poniżej dwa wykresy z pracy, którą napisałem w Hamburgu 20 lat temu. Jak by nie patrzeć, to był mój płatek śniegu. Pierwszy wykres to rysunek, który wykonałem w programie komputerowym *xfig* (zob. ilustracja na następnej stronie). To były szczęśliwe dni. Rysunek przedstawia elektron zderzający się z protonem. Język współczesnej fizyki jest sztucznie nieprzejrzysty, czego doskonałym przykładem jest podpis rysunku z mojej pracy, jednak język nie jest zaprojektowany do tego, aby sprawiać złudzenie, że fizycy są bardzo mądrzy. Szczerze mówiąc, nigdy nie sądziłem, że jakiś nie-fizyk to przeczyta. W tym przypadku każde słowo jest niezbędne i coś oznacza. Z pewnością spodobałoby się to George’owi Orwellowi. „Człowiek może pić, ponieważ czuje, że jest porażką, a następnie jeszcze bardziej, bo pije. Jest to raczej to samo, co dzieje się w języku angielskim. Staje się on brzydki i niedokładny, ponieważ nasze myśli są głupie, ale niechlujstwo naszego języka sprawia, że łatwiej nam mieć głupie myśli”^[5]. Fizyka charakteryzuje się precyzją myśli, która jest wspomagana i odzwierciedlana w precyzji języka.

A



$F_2(x, Q^2)$ zmierzone za pomocą HERA w eksperymencie z tarczą stacjonarną, jako funkcja Q^2 (a) oraz x (b). Krzywe stanowią fenomenologiczne dopasowanie przeprowadzone przez H1[26]. $c(x)$ to umowne odchylenie pionowe dodane do każdego punktu w (a) dla przejrzystości, gdzie $c(x) = 0,6(n - 0,4)$, n to numer binu x taki, że $n = 1$ dla $x = 0,13$.



A oto znaczenie podpisu. Prąd neutralny oznacza, że elektron odbija się od protonu, wymieniając z nim elektrycznie obojętną cząstkę – w tym przypadku foton; cząstkę światła. Foton przedstawiono na wykresie linią falistą i oznaczono grecką literą γ . DIS to skrót od angielskiej nazwy Deep Inelastic Scattering (pol. rozpraszanie głęboko nieelastyczne), która oznacza, że foton uderza w coś znajdującego się głęboko wewnątrz protonu, powodując rozbięcie protonu na części. Mniej więcej tak współczesny fizyk cząstek opisałby oddziaływania między dowolnymi dwiema cząstkami; oddziaływania obejmują „wymianę” jakiejś innej cząstki, która przenosi siłę. W tym przypadku siłą jest elektromagnetyzm, a cząstką przenoszącą siłę jest foton. Najbardziej fundamentalny opis mechanizmu, dzięki któremu cząsteczki wody łączą się ze sobą, tworząc лёд, mówi, że fotony są emitowane i pochłaniane przez elektrony w cząsteczkach wody, a wynikiem netto tego procesu jest łączenie się cząsteczek wody ze sobą.

Istnieje także inny sposób myślenia o tych zderzeniach elektron–proton. Można sobie wyobrazić foton wyemitowany wskutek uderzenia elektronem w proton i tym samym odsłonięcia jego struktury wewnętrznej. Owa struktura została przedstawiona na drugim rysunku z mojej pracy, zamieszczonym na poprzedniej stronie.

Pozwólcie mi na jeden paragraf opisujący fizykę na poziomie badawczym. Chciałbym to zrobić z dwóch powodów. Po pierwsze, czystą radością jest możliwość rozumienia złożonej idei, a tym samym zajrzenia w ukrytą prostotę i piękno Natury. Biolog Edward O. Wilson ukuł termin „jońskie oczarowanie”, nazywając to uczucie na cześć Talesa z Miletu, którego Arystoteles uważa za kogoś, kto tworzył fundamenty nauk fizycznych 600 lat p.n.e. na greckiej wyspie Jonia. To uczucie uniesienia pojawiające się w momencie odkrycia nowej cechy Natury i uświadomienia sobie, że jest ona elegancka. Po drugie, to okazja do przypomnienia i rozwinięcia idei, którą tu tworzymy. Nauka polega na prowadzeniu dokładnych obserwacji i próbach wytłumaczenia tego, co widzimy. Może to być sześciokątna struktura plastra miodu, osobliwa symetria płatków śniegu lub szczegóły tego, jak elektrony odbijają się od protonów. Dokładne obserwacje prowadzą do jońskiego oczarowania.

W akceleratorze HERA mierzyliśmy kąt i energię elektronów po tym, jak zderzały się z protonami. To prosty pomiar, a umożliwił nam zbudowanie obrazu tego, od czego „odbijał się” elektron – samego serca materii. Dwa różne sposoby wizualizacji wnętrza protonu przedstawiono na ilustracji. Element zwany $F_2(x, Q^2)$ znany jest jako funkcja struktury protonu. Teraz opiszemy precyzyjny element obserwacji, który wymaga skupienia. Spójrz na ilustrację (A) [na stronie 43](#) i skup się na dolnej linii wykresu opisanej $x = 0,13$. Punkty wzdłuż tej linii mówią o prawdopodobieństwie, z jakim elektron odbija się od czegoś wewnątrz protonu posiadającego 13 procent momentu pędu protonu – to właśnie oznacza $x = 0,13$. Wartość Q^2 to tak zwana wirtualność fotonu, który uderza w proton. Można o niej myśleć jak o sile rozdzielczej fotonu. Wysokie Q^2 odpowiada krótkiej długości fali, co oznacza, że fotony o wysokim Q^2 mogą dostrzec drobniejsze szczegóły. Linia $x = 0,13$ jest stosunkowo płaska, co świadczy o tym, że czymkolwiek jest to, od czego odbija się foton, zachowuje się to tak, jakby nie miało żadnych dostrzegalnych rozmiarów. Dzieje się tak, gdyż to, co widzimy, nie zmienia się wraz ze zwiększaniem mocy rozdzielczej mikroskopu (która odpowiada przechodzeniem na wyższe Q^2), a tak działałoby się, gdyby foton rozpraszał drobne kropki materii wewnątrz protonu. Owe kropki są znane jako kwarki i z tego, co możemy powiedzieć, są one jednymi z fundamentalnych elementów budowy Wszechświata. Razem oba wykresy opisują szczegółowo wnętrze protonu odtworzone przez lata badań eksperymentalnych prowadzonych przez setki naukowców za pomocą akceleratora HERA.

Proton to kipiąca, zmieniająca położenie masa składników przypominających kropki, bezustannie ewoluująca wokół rusztowania. Owo rusztowanie składa się z trzech kwarków: dwóch kwarków górnych i jednego dolnego. Kwarki są ze sobą związane przez siły jądrowe przenoszone przez cząstki zwane gluonami w ten sam sposób, w który siły elektromagnetyczne przenoszone są przez fotony. W przeciwieństwie do fotonów gluony mogą oddziaływać ze sobą poprzez wymianę większej ilości gluonów, a skutkiem tego jest coraz bardziej złożona struktura protonu wraz z powiększaniem siły rozdzielczej. Ilustracja (B) przedstawia właśnie to zachowanie; krzywe rosnące wraz ze spadkiem x mówią nam, że jest tam mnóstwo gluonów, z których każdy niesie ze sobą bardzo małą część momentu pędu protonu. Ilustracja (A) także to pokazuje. Linie nie są płaskie przy mniejszych x . W naszym żargonie to zachowanie znane jest jako „łamanie skalowania”, co oznacza, że im bardziej

zwiększamy zdolność rozdzielczą, tym więcej widzimy elementów przypominających kropki. Innymi słowy, przy niskiej rozdzielczości obserwujemy jedynie rusztowanie, tj. trzy kwarki, podczas gdy przy wyższych rozdzielczościach obserwujemy pełnię struktury gluonowej protonu. Krótko mówiąc, gluony przenoszą około połowy momentu pędu protonu, ponieważ jest ich tak wiele między kwarkami. Linie przedstawione na tych wykresach, które przebiegają w dużej mierze przez punkty danych, obliczono przy wykorzystaniu naszej najlepszej teorii sił jądrowych: chromodynamiki kwantowej, w skrócie QCD (ang. Quantum Chromodynamics). QCD to zestaw zasad określający prawdopodobieństwo wyemitowania gluonu przez kwark oraz opisujący, jak gluony oddziałują z innymi kwarkami i gluonami. To teoria kwantowa – te same podstawowe ramy, do których odnosiliśmy się, gdy omawialiśmy strukturę cząsteczki wody. Gdy zajmujemy się ładunkami elektrycznymi – dla przykładu oddziaływaniami zachodzącymi między elektronami a jądrem atomowym – wykorzystujemy naszą kwantową teorię elektromagnetyzmu zwaną elektrodynamiką kwantową (QED, ang. Quantum Electrodynamics).

Pamiętam, jak pisałem programy komputerowe analizujące potężne ilości danych o pojedynczych zderzeniach elektron–proton i tworzące ilustracje takie jak ta powyżej. Na komputerach dostępnych w latach dziewięćdziesiątych skorzystanie z takiego programu zajmowało kilka dni. Nawet teraz, patrząc na te wykresy, niesamowite wydaje mi się to, że patrzę na strukturę obiektu o rozmiarach tysięcznej części milionowej części milionowej części metra, zmierzonych za pomocą maszyny o obwodzie 6,7 kilometra znajdującej się pod ulicami Hamburga, oraz to, że mamy teorię, która pozwala nam zrozumieć i opisać, co widzimy. Inżynieria przemysłowa i piękno subatomowe są ze sobą idealnie zgrane. Jońskie oczarowanie.

Na następnej stronie zobaczysz wycinek głębokiej struktury zwykłej materii. Tym właśnie jesteś na poziomie dokładności, który możemy obecnie zmierzyć. Dwa rodzaje kwarków, złączone ze sobą za pomocą gluonów, tworzą protony i neutrony, które są ze sobą połączone przez więcej gluonów w jądro atomowe. Elektrony utrzymywane są na orbitach wokół jąder atomowych przez fotony, dzięki czemu mamy atomy, a one z kolei łączą się ze sobą, wymieniając fotony między swoimi elektronami i tworząc cząsteczki. I tak to jest! Prosty obraz będący wynikiem setek lat badań eksperymentalnych i teoretycznych. Struktura wszystkiego może być wytłumaczona za pomocą zestawu cząstek podstawowych i kilku zasad. Spotkaliśmy już trzy takie cząstki: kwarki górne, kwarki dolne i elektrony. Poznaliśmy także dwie siły: siłę oddziaływania silnego i siłę elektromagnetyczną. Istnieje jeszcze siła oddziaływania słabego, która może zmieniać kwarki górne w kwarki dolne przy jednoczesnej emisji cząstki innego rodzaju – neutrino elektronowego. Razem mamy zatem cztery cząstki materii. Siła oddziaływania słabego jest przenoszona przez cząstki znane jako bozony W i Z. Oprócz tego istnieje jeszcze bozon Higgsa, odkryty w 2012 roku za pomocą Wielkiego Zderzacza Hadronów (LHC, ang. Large Hadron Collider) w ośrodku CERN w Genewie, który nadaje cząstkom podstawowym ich masę.

Czwarta i ostatnia siła fundamentalna to najpowszechniejsza grawitacja. Jest ona na tyle słaba, że jej wpływ na świat subatomowy pozostaje niezauważalny nawet w naszych

najbardziej precyzyjnych eksperymentach, takich jak te przeprowadzone w akceleratorze HERA. Jeżeli to stwierdzenie wydaje ci się trochę zadziwiające, zwłaszcza jeśli kiedyś zdarzyło ci się spaść z drabiny, zatrzymaj tę myśl w pamięci na chwilę – wrócimy do grawitacji nieco później, gdy będziemy omawiać kształt planet i galaktyk.

masa →	$\approx 2,3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1,275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173,07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
ładunek →	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
KWARKI	u górny	c powabny	t szczytowy	g gluon	H bozon Higgsa
	$\approx 4,8 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$	$\approx 4,18 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$	0 0 1	
	d dolny	s dziwny	b denny	γ foton	
LEPTONY	$0,511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$	$105,7 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$	$1,777 \text{ GeV}/c^2$ -1 $1/2$	$91,2 \text{ GeV}/c^2$ 0 1	
	e elektron	μ mion	τ tau	Z bozon Z	
	$< 2,2 \text{ eV}/c^2$ 0 $1/2$	$< 0,17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$	$< 15,5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$	$80,4 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1	
	ν_e neutrino elektronowe	ν_μ neutrino mionowe	ν_τ neutrino tau	W bozon W	
				BOZONY CECHOWANIA	

Podstawowe składniki świata naturalnego oraz trzy fundamentalne siły Natury: siła oddziaływania silnego przenoszona przez gluony; siła oddziaływania słabego przenoszona przez bozony W i Z; siła elektromagnetyczna przenoszona przez fotony.

Te cztery cząstki, cztery siły oraz bozon Higgsa wydają się wszystkim, co niezbędne do stworzenia cząsteczki wody, plastra miodu, człowieka czy planety Ziemia. To niewyobrażalnie elegancka i prosta struktura. Z jakiegoś powodu Natura nie przyjęła tego ekonomicznego schematu i stworzyła dwie dalsze kopie rodziny kwarków dolnych, kwarków górnych, elektronów i neutrino elektronowych. Te dwie dodatkowe rodziny nie różnią się niczym od pierwszej poza faktem, że są bardziej masywne, prawdopodobnie dlatego, że w inny sposób oddziałują z cząstkami Higgsa. Istnienie tych trzech rodzin cząstek to kolejna z wielu wielkich zagadek, a odkrywanie, dlaczego Natura wydaje się tak niepotrzebnie rozrzutna, jest jednym z najważniejszych zadań fizyki cząstek XXI wieku. Oczywiście Natura nie mogła być tak rozrzutna! Wiemy, że trzy rodziny cząstek to minimalna liczba konieczna do zajścia procesu znanego jako łamanie CP, który jest niezbędny do wytłumaczenia, dlaczego, jeżeli

Wszechświat zaczął się z równą ilością materii i antymaterii, istnieje w nim dzisiaj materia, z której złożone są gwiazdy i ludzie. To jednak nie jest odpowiedź na pytanie „Dlaczego?”, a miło by było wiedzieć, czy istnienie planet, gwiazd i galaktyk sprowadza się do łutu szczęścia.

Łącznie z tymi dodatkowymi rodzinami mamy zatem dwanaście fundamentalnych cząstek materii, cztery różne rodzaje cząstek przenoszących siły oraz cząstkę Higgsa. I to tyle, co wiemy – choć wcale nie zdziwiłbym się, gdyby w Wielkim Zderzaczu Hadronów w ciągu najbliższych kilku lat pojawiło się więcej cząstek. Myślę tak, ponieważ mamy już wiele dobrych dowodów z wielu niezależnych obserwacji astronomicznych na istnienie jeszcze innej formy materii we Wszechświecie znanej jako ciemna materia. We Wszechświecie pod względem masy istnieje pięć razy więcej ciemnej materii niż „normalnej” materii, a owa ciemna materia nie może składać się z dwunastu cząstek, które odkryliśmy w eksperymentach przeprowadzanych w akceleratorach cząstek takich jak HERA czy LHC. Zestaw cząstek fundamentalnych znanych w 2015 roku przedstawiono na rysunku [na stronie 49](#).

Moim planem nie było jednak stworzenie pełnego kursu fizyki cząstek, niezależnie od tego, że chciałbym to zrobić; jest to natomiast rozdział traktujący o kształtach i wzorach Natury oraz o tym, co one nam mówią na temat tego, jak działa Wszechświat. Niemniej pozwolę sobie na jeszcze jedną podróż w świat fizyki cząstek – opowieść o odkryciu kwarków w protonach i neutronach stanowi piękny przykład na to, jak fizycy dostrzegają prawidłowości i starają się je wytłumaczyć. Zdumiewający jest także fakt, że istnienie kwarków zostało przewidziane, *zanim* odkryto eksperymentalnie.

Teoretyczne przypuszczenia, że podstawowe cząstki znajdują się poniżej poziomu protonów i neutronów, zostały wysunięte przez Murraya Gell-Manna oraz George’a Zweiga w 1964 roku. Opierały się one na wzorze obserwowanym w subatomowych cząstkach znanych w tym czasie. Do początku lat sześćdziesiątych odkryliśmy już nieelegantną, bogatą i wprost niekończącą się listę cząstek subatomowych. Protony i neutrony stanowią część całej rodziny cząstek zwanych barionami; są tam także cząstki lambda, sigma, delta, kaskady i wiele innych. Istnieje jeszcze rodzina cząstek zwanych mezonami: piony, kaony, rho i tak dalej. Jest trzynaście różnych typów cząstki lambda, dziewięć typów cząstki sigma i osiem kaonów. Fizyka cząstek coraz bardziej przypominała subatomową gałąź botaniki. Wtedy Gell-Mann oraz Zweig dostrzegli piękny wzór. Cząstki można było ułożyć według ich obserwowanych właściwości we wzory geometryczne. Jeden z takich wzorów przedstawia ilustracja [na stronie 53](#). Dzisiaj nazywamy je supermultipletami.

Tak jak podejrzewał Kepler, rozważając sześciokątną symetrię płatków śniegu, wzory występujące w Naturze bardzo często wskazują, że stoi za nimi jakaś głębsza struktura. Wzory te mogą, ale nie muszą być łatwe do zauważenia – Gell-Mann otrzymał Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki w 1969 roku za rozpoznanie wzoru wśród cząstek – a to one właśnie są kamieniem z Rosetty, który pozwala nam odszyfrowywać język Natury. W tym przypadku wzory, w jakie układają się cząstki, wskazały Gell-Mannowi oraz Zweigowi, że wszystkie bariony składają się z trzech mniejszych elementów, które Gell-Mann nazwał kwarkami. Gdy

Cząstka znajdująca się u podstawy piramidy na ilustracji, znana jako Omega-minus, jest szczególnie ciekawa ze względów historycznych, ponieważ jej istnienie zostało przewidziane przez Gell-Manna na spotkaniu w ośrodku CERN w 1962 roku wyłącznie w oparciu o kształt podstawy piramidy. Została ona następnie odkryta w Brookhaven National Laboratory w USA w 1964 roku. Gdy teoria przewiduje istnienie czegoś nowego, co potem udaje się odkryć, możemy mieć pewność, że podążamy właściwą ścieżką.

Barionowy supermultiplet przedstawiający zawartość kwarków w każdym barionie.

Dlaczego Ziemia jest sferą?

Istnieje fotografia naszej planety zatytułowana *The Blue Marble*. Została ona wykonana 7 grudnia 1972 roku przez załogę misji Apollo 17 podczas podróży na Księżyc. Blisko przesilenia zimowego Antarktyda jest na nim lądem wiecznego światła, a Madagaskar – wyspa lemurów – znajduje się mniej więcej w środku kadru. Czerwone pustynie otoczone niebieskimi oceanami i zielonymi odcieniami wskazują na życie.

5 grudnia 2012 roku NASA opublikowała zdjęcie zatytułowane *The Black Marble* przedstawiające obie Ameryki nocą. Widzimy na nim cywilizację na powierzchni planety; światła wskazują na świt antropocenu – wieku dominacji człowieka. Co widać na tych zdjęciach? Co jest najbardziej podstawową cechą Ziemi? Aleksiej Leonow, po zakończeniu pierwszego w historii spaceru kosmicznego 18 marca 1965 roku, miał na to pytanie odpowiedź.

Nigdy nie wiedziałem, co naprawdę oznacza słowo „okrągły”, do momentu gdy ujrzałem Ziemię z przestrzeni kosmicznej.

Aleksiej Leonow, Woschod 2, Sojuz 19/ASTP

Widziana z przestrzeni kosmicznej Ziemia jest niemal idealną sferą. Wszystkie planety w Układzie Słonecznym, wszystkie duże księżyce i samo Słońce także są sferami. Tak samo jest ze wszystkimi gwiazdami we Wszechświecie. Dlaczego? Jeżeli mnóstwo różnych obiektów posiada wspólną cechę, musi stać za tym jakieś wytłumaczenie. Aby do niego dojść, zastanówmy się, co mogłoby wpływać na kształt planety, księżyca czy gwiazdy. Nie może mieć to wiele wspólnego z ich składem chemicznym, wszak planety zbudowane są z innej materii niż gwiazdy. Ziemia jest zbudowana z ciężkich pierwiastków chemicznych, takich jak żelazo, tlen, krzem i węgiel. Słońce z kolei składa się głównie z wodoru i helu; to potężna kula plazmy bez stałej powierzchni. Olbrzymie planety takie jak Jowisz mają więcej wspólnego z gwiazdami niż z Ziemią, przynajmniej pod względem składu chemicznego. One również składają się w dużej mierze z wodoru i helu. Gwiazdy i planety łączy jednak siła, która uformowała je i utrzymuje w całości – grawitacja. Aby zatem zrozumieć, dlaczego wszystkie są sferyczne, musimy nieco dokładniej zbadać naturę grawitacji.

Opierając się grawitacji

Przez większą część roku Tarragona jest spokojnym śródziemnomorskim portem na północno-wschodnim wybrzeżu Hiszpanii, lecz co roku we wrześniu eksploduje żywymi, kontrastującymi barwami, gdy liczne zespoły rywalizują z grawitacją w konkursie *castells*. *Castells* to wieże z ludzi sięgające nawet na wysokość dziesięciu osób i charakteryzujące się delikatną mieszaniną siły, równowagi, strategii i pracy zespołowej, które są niezbędne do ich

zbudowania. Każdy zespół zaczyna od stworzenia fundamentów wieży, gdzie nawet 200 osób formuje tak zwane *pinya*. Gdy są już fundamenty, ludzie łączą się w różnego rodzaju struktury, starając się wznieść jak najwyższą wieżę. Oczywiście każdy następny poziom powstaje dopiero po stworzeniu poprzedniego. Najbardziej utytułowanym zespołem jest Castellers de Vilafranca, który wygrał konkurs w Tarragonie już osiem razy od 1972 roku. Masa zielonych, zgodnie poruszających się koszul przepływa z jednego poziomu na drugi, przy czym na każdym następnym poziomie znajduje się coraz mniej ludzi, aż w końcu dwoje dzieci kończy ostatnią stabilną platformę dla *enxaneta*, czyli *castellera*, który wejdzie na sam szczyt; dlatego też niewielka masa ciała, zwinność – i prawdopodobnie brak strachu – są tutaj pożądane; zazwyczaj *enxaneta* ma zaledwie sześć lub siedem lat. To właśnie po to przychodzą tłumy. Wieże jednak pękają, ludzie spadają na siebie, ich upadki amortyzowane są przez zderzające się ze sobą łokcie, kolana, głowy i ramiona, zazwyczaj powodując jedynie sińce czy od czasu do czasu wybite zęby. Poważne obrażenia zdarzają się bardzo rzadko.

Wszyscy wiedzą, dlaczego ludzie spadają na ziemię, gdy tracą równowagę – grawitacja. Jednak jak dokładnie obiekty zachowują się pod wpływem grawitacji? Mamy dwa rodzaje ram teoretycznych, z których oba są wciąż wykorzystywane w zależności od tego, co chcemy obliczyć. To właśnie tutaj leży klucz do sukcesu nauki: nie ma w niej żadnych prawd absolutnych! Przydatność to kwestia treści; jeżeli teoria może być wykorzystana do przewidywania wyników, które zgadzają się z danymi eksperymentalnymi w pewnych warunkach, to tak długo, jak długo rozumiemy jej ograniczenia, możemy dalej wykorzystywać taką teorię. Pierwsza teoria grawitacji została spisana przez Isaaca Newtona w 1687 roku w jego pracy *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* – matematycznych zasadach filozofii naturalnej, zainspirowanych przynajmniej w części przez prace naszego towarzysza – Johannesesa Keplera.

Dokładniejszy opis grawitacji w 1915 roku opublikował Albert Einstein. Teoria Newtona nie mówi nic o tym, jak grawitacja działa między obiektami, ale pozwala na obliczenie siły grawitacyjnej między dowolnymi obiektami znajdującymi się gdziekolwiek we Wszechświecie. Bardziej szczegółowa ogólna teoria względności Einsteina zawiera wytłumaczenie siły grawitacji. Przestrzeń i czas ulegają odkształceniu w obecności materii i energii, a obiekty podróżują po liniach prostych po tej zakrzywionej i zniekształconej czasoprzestrzeni. Z uwagi na to zniekształcenie wydaje nam się, że na obiekty działa siła, którą nazywamy grawitacją. Jednak w teorii Einsteina nie ma siły; jest zakrzywiona czasoprzestrzeń i zasada mówiąca, że wszystko porusza się po liniach prostych. W rozdziale zatytułowanym *Ruch* zajmiemy się czasoprzestrzenią dużo bardziej szczegółowo.

Aby odpowiedzieć na pytanie o sferyczne planety, nie potrzebujemy eleganckiej i znacznie bardziej wymagającej matematycznie ogólnej teorii względności. To wykorzystywanie młota dwuręcznego do rozłupania orzecha. Ograniczymy się zatem do prostszej teorii Newtona; wszak ogólna teoria względności dałaby nam ten sam wynik. Oto prawo powszechnego ciążenia opracowane przez Newtona:

$$F = G m M / r^2$$

Słownie to równanie mówi, że między wszystkimi obiektami istnieje siła F równa iloczynowi ich mas m oraz M i odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości r między nimi. Jeżeli dwukrotnie zwiększymy odległość między dwoma obiektami, siła grawitacyjna między nimi spadnie czterokrotnie. G to tak zwana stała Newtona i mówi nam o intensywności siły grawitacyjnej. Jeżeli mierzymy masę w kilogramach, odległość w metrach i chcemy poznać siłę grawitacyjną w niutonach, to $G = 6,6738 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$.

Stała grawitacji Newtona jest jedną z fundamentalnych stałych fizycznych. Opisuje ona właściwość naszego Wszechświata, którą można zmierzyć, ale nie wywnioskować z jakiejś głębszej zasady. Jedną z wielkich, nierozwiązanych tajemnic fizyki jest pytanie, dlaczego stała grawitacyjna jest taka mała, co można sprowadzić do pytania, dlaczego siła grawitacyjna między obiektami jest tak słaba. Porównanie sił nie jest takie proste, ponieważ ich intensywność zależy od skali energii, w której je badamy; bardzo blisko Wielkiego Wybuchu, w tak zwanej temperaturze Plancka ($1,417 \times 10^{32}$ stopnia Celsjusza), wszystko przemawia za tym, że wszystkie cztery siły miały taką samą moc. Aby opisać fizykę w takich temperaturach, potrzebujemy kwantowej teorii grawitacji, której aktualnie nie znamy. Jednak w energiach, które spotykamy w życiu codziennym, grawitacja jest około czterdziestu rzędów wartości słabsza od siły elektromagnetycznej; to 1 z 40 zerami. Taka mikroskopijność wydaje się absurdalna i wymaga wytłumaczenia. Fizycy rozważają istnienie dodatkowych wymiarów przestrzeni we Wszechświecie oraz wiele innych egzotycznych idei, lecz jak na razie nie mamy żadnych dowodów, które wskazywałyby w którąkolwiek stronę. Jedna z możliwości mówi, że stałe Natury zostały losowo ustalone w Wielkim Wybuchu – w takim wypadku stanowią one zwykły zestaw nieobliczalnych fundamentalnych liczb definiujących Wszechświat, w jakim przyszło nam żyć. Być może w przyszłości uda się opracować teorię, która umożliwi nam wytłumaczenie, dlaczego te fundamentalne liczby mają właśnie takie, a nie inne wartości.

Newton odkrył swoje prawo grawitacji, poszukując prostego równania, które mogłoby opisać obserwowaną złożoność ruchu planet wokół Słońca. Trzy empiryczne prawa Keplera opisujące ruch planet można wyprowadzić z prawa grawitacji Newtona i praw ruchu. Właśnie dlatego możemy określić teorię Newtona jako elegancką, tak jak określaliśmy teorię kwantową na początku rozdziału. Newton odkrył proste równanie, które jest w stanie opisać szeroką paletę zjawisk: lot pocisków artyleryjskich na Ziemi, orbity planet wokół Słońca, orbity księżyców Jowisza i Saturna czy ruch gwiazd w galaktykach. To prawo było pierwszym odkrytym prawdziwie uniwersalnym prawem Natury.

Odpowiedź na nasze pytanie „dlaczego Ziemia jest sferyczna?” musi być zawarta w równaniu Newtona, ponieważ Ziemia powstała wskutek oddziaływania grawitacji. Siła grawitacyjna rzeźbi planety. Nasz Układ Słoneczny utworzył się z obłoku gazu i pyłu zapadającego się pod wpływem przyciągania grawitacyjnego jakieś 4,6 miliarda lat temu. Słońce powstało jako pierwsze, po nim narodziły się planety. Przeskoczmy o kilka milionów lat do czasu, kiedy nowo narodzone Słońce świeciło w centrum pozbawionego planet Układu Słonecznego. Wokół młodego Słońca krąży pozostałości obłoku pyłu i gazu, z którego

powstało Słońce, zawierające wszystkie składniki niezbędne do tworzenia planet. To tak zwany dysk protoplanetarny. Dokładne szczegóły procesu formowania się planet wciąż są celem wielu badań, a mechanizmy odpowiadające za ten proces mogą być inne dla planet skalistych takich jak Ziemia i inne dla gazowych olbrzymów takich jak Jowisz. W przypadku planet podobnych do Ziemi losowe kolizje cząstek pyłu powodują powstanie obiektów o średnicy około 1 kilometra zwanych planetozymalami. One z kolei rosną, przyciągając mniejsze fragmenty skał i pyłu swoją grawitacją, tym samym zwiększając swą masę, co z kolei zwiększa ich przyciąganie grawitacyjne, które przyciąga więcej obiektów, i tak dalej. To tak zwana akrecja samorozpędzająca się (ang. *runaway accretion*), a symulacje komputerowe uwzględniające prawa Newtona wskazują, że seria kolizji między takimi rosnącymi planetozymalami prowadzi do powstania niewielkiej liczby planet skalistych w dysku protoplanetarnym otaczającym młodą gwiazdę.

Modele formowania planet można sprawdzić, obserwując przez teleskop młode układy gwiazdne. W 2014 roku obserwatorium ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) w Chile wykonało przepiękne zdjęcie układu planetarnego powstającego w dysku protoplanetarnym wokół HL Tauri – układu, którego wiek wynosi mniej niż 100 000 lat i oddalonego od nas o zaledwie 450 lat świetlnych. Na zdjęciu widać wyraźnie serię jasnych pierścieni koncentrycznych oddzielonych ciemnymi obszarami. Uważa się, że te ciemne przerwy są oczyszczane przez powstające planety krążące wokół gwiazdy i zbierające materię dysku na swojej drodze – to cienie orbit planetarnych. Interesujący jest fakt, że proces powstawania planet wydaje się stosunkowo zaawansowany w tym bardzo młodym układzie. To zdjęcie prawdopodobnie odzwierciedla, jak wyglądał Układ Słoneczny jakieś 4,5 miliarda lat temu.

Planety skaliste rozpoczynają życie jako małe, nieregularne planetozymale i ewoluują, z czasem przyjmując kształt sferyczny. Aby zrobić krok naprzód na drodze do zrozumienia, dlaczego tak się dzieje, zauważmy pewien fakt: nie wszystkie obiekty w Układzie Słonecznym są sferami. Marsjański księżyc Fobos ma promień około 11 kilometrów. To bezkształtna skała. Jeszcze mniejsze są planetoidy, komety i ziarna pyłu, które powstawały tak samo jak planety. Kometa 67P/Czuriumow-Gierasimienko ma niecałe 5 kilometrów średnicy i intrygujący kształt hantli. Analiza danych zebranych przez sondę „Rosetta” krążącą wokół komety w trakcie pisania tej książki wykazała, że 67P powstała wskutek powolnego zderzenia dwóch większych obiektów. Być może jest to ilustracja procesów, które w przeszłości prowadziły do powstawania dużo większych obiektów, takich jak planety i księżyce. Mniejsze skały łączą się ze sobą pod wpływem grawitacji, a jeżeli w otoczeniu znajduje się wystarczająco dużo materiału, tak jak to było na wczesnych etapach życia Układu Słonecznego, obiekty będą zderzały się ze sobą bardzo często, stopniowo przyjmując większe rozmiary. Dlaczego kometa 67P nie jest sferyczna?

Powróćmy do ludzkich wież. Od czego zależy maksymalna wysokość wieży? Rozważmy sztuczną sytuację, w której wieża jest pionowym układem ludzi, stojących jeden na drugim. Jeżeli w tym układzie jest dwoje ludzi, wtedy siła działająca na osobę znajdującą się na dole równa jest wadze osoby znajdującej się nad nią. Rozpatrzmy to zdanie. Czym jest waga?

Twoja waga na powierzchni Ziemi dana jest przez równanie Newtona; to siła wywierana na ciebie przez Ziemię. Jakie liczby powinniśmy wstawić do równania, aby ją obliczyć? Twoja masa: 75 kg . Masa Ziemi: $5,972 \times 10^{24} \text{ kg}$. Stała grawitacyjna Newtona: $6,6738 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$. Co powinniśmy wstawić zamiast r ? To odległość od środka Ziemi do środka ciebie. Ten fragment wydaje się trochę niejasny. Bardziej precyzyjnie r to odległość między środkiem masy Ziemi i twoim środkiem masy, ale bardzo dobrym przybliżeniem jest wstawienie do równania Newtona po prostu promienia Ziemi. Wszak ty masz wzrost tylko około metra, dwóch, a średni promień Ziemi to $6\,371\,000$ metrów, więc przesunięcie środka masy o kilkadziesiąt centymetrów nie zmienia wyniku w sposób znaczący.

FORCA, EQUILIBRI, VALOR I SENY

(SIŁA, RÓWNOWAGA, ODWAGA
I ZDROWY ROZSĄDEK)

Po wstawieniu powyższych liczb równanie Newtona powie nam, że siła wywierana na ciebie na powierzchni Ziemi – twoja waga – wynosi około 736 niutonów (siła 1 niutona wytwarza przyspieszenie 1 m/s^2 na 1 kg masy).

Teraz musimy wprowadzić kolejne prawo Newtona – jego trzecie prawo ruchu, także opublikowane w *Principia*...: Każdej akcji odpowiada reakcja o równej sile i przeciwnym zwrocie. Oznacza to, że Ziemia wywiera na ciebie siłę, a ty wywierasz równą i przeciwną siłę na Ziemię. Teraz możemy zrozumieć, co się dzieje, gdy ludzkie wieże stają się coraz wyższe. Jeżeli jedna osoba stoi na ramionach drugiej, wywiera na nią siłę o wartości około 730 niutonów skierowaną w dół. Jeżeli kolejna osoba o tej samej masie wejdzie na szczyt, siła działająca na osobę stojącą u podstawy podwoi się, osiągając wartość 1460 N. Gdy kolejne dwie osoby wejdą na szczyt, tworząc wieżę składającą się z pięciu osób, siła działająca na osobę stojącą na dole wyniesie 2920 N i tak dalej. Logiczne zatem, że w pewnym momencie osoba stojąca na dole nie będzie w stanie utrzymać całej wieży i konstrukcja runie. To właśnie tu wchodzi w grę umiejętność *castellerów*. Budując podstawę składającą się z wielu osób, można rozłożyć te siły na wiele osób, dzięki czemu możliwe jest tworzenie wyższych struktur, zanim dojdzie do katastrofy. Oczywiście jest jakiś koszt: większa podstawa może utrzymać większą warstwę powyżej, która z kolei może utrzymać wyższą warstwę powyżej itd. Ale większa warstwa waży więcej i wywiera większą siłę na warstwę poniżej. Genialne geometryczne rozwiązania tej układanki grawitacyjnej powstają poprzez połączenie prób i błędów, instynktu i umiejętności, i właśnie to sprawia, że zawody *castells* w Tarragonie są tak interesujące. Dla naszych celów liczy się jednak zasada. Gdy wieża robi się coraz wyższa, siły oddziałujące na jej podstawę także rosną i prędzej czy później osiągną jakiś limit.

Prawdopodobnie już wiesz, do czego to prowadzi. Wysokie wieże z ludzi są dużo trudniejsze do utrzymania, ponieważ siła oddziałująca na podstawę staje się stopniowo coraz większa wraz ze wzrostem masy całej wieży. To wskazuje, że rozmiar struktur wznoszących się nad powierzchnię planety jest ograniczony przez wytrzymałość skał, z których składa się planeta, oraz przez przyciąganie grawitacyjne, a więc wagę struktury. Na Ziemi najwyższa góra mierzona od podstawy na dnie morza to Mauna Kea na Hawajach. Ten uśpiony wulkan ma 10 kilometrów wysokości, ponad kilometr więcej niż Mount Everest. Mauna Kea powoli tonie, gdyż jej ciężar jest na tyle duży, że skały znajdujące się pod nią nie mogą jej utrzymać. Dla porównania Mars jest mniej masywną planetą. Przy zaledwie $6,39 \times 10^{23} \text{ kg}$ jego masa to jedynie 10 procent masy Ziemi, a jego promień jest połowę mniejszy od promienia Ziemi. Szybkie obliczenia przy wykorzystaniu równania ze strony 57 powiedzą ci, że obiekt na powierzchni Marsa waży około 40 procent tego, co na powierzchni Ziemi. Skoro więc Mars ma skład chemiczny zbliżony do Ziemi, a skały na jego powierzchni mają podobną wytrzymałość, na Marsie mogą istnieć wyższe góry, ponieważ po prostu ważą mniej – i tak faktycznie jest. Marsjańska góra Olympus Mons to najwyższa góra w Układzie Słonecznym – jej wysokość to ponad 24 kilometry, czyli niemal trzy Everesty stojące jeden na drugim. Tak monstrualnych rozmiarów obiekty nie mogą występować na Ziemi z uwagi na ich potężną wagę – co jest wynikiem wyższej masy Ziemi i tym samym silniejszego przyciągania grawitacyjnego na powierzchni.

Widzimy zatem, że musi istnieć ograniczenie wysokości, do jakiej może się wypiętrzyć formacja powyżej powierzchni planety. Im masywniejsza planeta, tym silniejsze przyciąganie grawitacyjne na jej powierzchni i tym mniejsze formacje powierzchniowe może ona utrzymać. Gdy planety stają się coraz większe, ich powierzchnia staje się coraz bardziej równa ze względu na silniejszą grawitację. Mniej masywne planety mogą być bardziej nieregularne. Tym samym zbliżamy się do odpowiedzi na nasze pytanie: mamy mechanizm wygładzania powierzchni planet, dlaczego jednak planeta miałaby być wygładzana w kształt sfery?

Wyobraź sobie górę na powierzchni planety. Załóżmy, że znajduje się ona na biegunie północnym. Teraz wyobraź sobie, że obracasz planetę o, powiedzmy, 90 stopni tak, że owa góra znajduje się na równiku. Czy coś się zmieniło? Wszystkie argumenty dotyczące maksymalnej wysokości góry wciąż obowiązują, ponieważ siła grawitacyjna na powierzchni zależy *tylko* od promienia i masy planety oraz masy góry. W równaniu Newtona nie ma żadnego odniesienia do kąta (zob. s. 57).

Mówiąc bardziej wyrafinowanym językiem, możemy stwierdzić, że prawo grawitacji Newtona zawiera symetrię rotacyjną. Oznacza to, że siła grawitacji wywiera ten sam wpływ na dwa obiekty niezależnie od ich względnej orientacji. To tylko przykład tego, co fizycy i matematycy mają na myśli, gdy mówią o symetriach równania czy prawa Natury, i oznacza to, że obliczenie maksymalnej wysokości góry w dowolnym miejscu na powierzchni Ziemi może prowadzić do tej samej odpowiedzi niezależnie od położenia góry, *ponieważ* prawo grawitacji Newtona jest symetryczne względem rotacji. Symetria prawa grawitacji jest odzwierciedlona w symetrii obiektów, które tworzy. Grawitacja wygładza góry demokratycznie, symetrycznie, sprawiając, że zagęszczenia materii o wystarczająco silnym przyciąganiu grawitacyjnym, aby przezwyciężyć stałość substancji, z której powstały, przyjmują kształt sferyczny. To właśnie dlatego Ziemia jest sferycznie symetryczna.

U podstaw współczesnej fizyki teoretycznej leży bardzo ważne twierdzenie. Rozważanie obiektów pod kątem symetrii jest niezwykle istotne, a być może fundamentalne. Rozpatrz możliwość tego, że prawa Natury charakteryzują się pewnymi symetriami, które stanowią fundamentalne właściwości Wszechświata. Miałoby to swoje odzwierciedlenie w obiektach fizycznych, którymi takie prawa rządzą. Dla przykładu wyobraź sobie Wszechświat, w którym dozwolone są tylko prawa Natury symetryczne względem obrotów o 90 stopni. W takim Wszechświecie powstają tylko obiekty takie same po obrocie o 90 stopni; istnieją sześciany, ale już sfery nie istnieją. To nie jest aż takie szalone, jak mogłoby się wydawać. Z tego, co możemy powiedzieć, nasz Wszechświat posiada zestaw ekstremalnie restrykcyjnych symetrii, a cząstki subatomowe i siły, które nimi rządzą, mają u podstaw tego typu symetrie^[6]. W rzeczywistości *wszystkie* prawa Natury, które postrzegamy dzisiaj jako fundamentalne, można zrozumieć, rozumując w ten sposób. Istnieją silne przesłanki wskazujące, że symetrie rządzące Naturą mogą być prawdziwie fundamentalne. Zdobywca Nagrody Nobla Steven Weinberg napisał: „Chciałbym zaproponować tutaj coś, czego nie jestem pewien, ale co przynajmniej stanowi możliwość: określenie grupy symetrii Natury może być wszystkim, czego potrzebujemy, aby mówić o świecie fizycznym, poza zasadami mechaniki kwantowej”.

Laureat Nagrody Nobla Philip Warren Anderson napisał: „To tylko lekka przesada powiedzieć, że fizyka zajmuje się badaniem symetrii”. Laureat Nagrody Nobla David Gross napisał: „W rzeczy samej, trudno sobie wyobrazić, że taki postępowanie mógłby zachodzić w dedukcji praw Natury, gdyby nie istniały określone symetrie (...). Dzisiaj uświadamiamy sobie, że zasady symetrii są jeszcze potężniejsze – one kształtują formę praw Natury”. Złożoność, którą dostrzegamy, rzucając okiem na Wszechświat, maskuje znajdujące się u jej podstaw symetrie. Jednym z głównych celów współczesnej fizyki teoretycznej jest pozbycie się tej złożoności i odsłonięcie leżącej u jej podstaw prostoty i symetrii praw Natury.

Wracając jednak do naszego zadania, takie wnioskowanie prowadzi do przewidywania rozmiarów i kształtów planet i księżyców – a te można sprawdzić: powinny mieć kształt sferyczny, jeżeli są wystarczająco duże, a tym samym wystarczająco masywne, tak aby ich przyciąganie grawitacyjne przewyższało sztywność strukturalną skał, z których są zbudowane. Sztywność skał jest związana z intensywnością sił Natury, które utrzymują ze sobą składniki skał – cząsteczki dwutlenku krzemu, żelaza i tak dalej. To siła elektromagnetyczna, a jakżeby inna? Istnieją tylko cztery siły, a dwie siły jądrowe są ograniczone do samych jąder atomowych. Olbrzymie obiekty takie jak planety powstają wskutek oddziaływania grawitacji, która stara się je ukształtować w sfery, a elektromagnetyzm usiłuje się temu przeciwstawić. Możemy wykonać obliczenia, próbując oszacować minimalny rozmiar zbitki materii pozwalający jej na przyjęcie kształtu bliskiego sferze i porównując ciężar masy skały w pobliżu jej powierzchni z siłą strukturalną skał znajdujących się poniżej^[7]. W odpowiedzi otrzymamy około 600 kilometrów.

Możemy to sprawdzić w bezpośrednich obserwacjach Układu Słonecznego. Fobos pasuje do naszych przewidywań; przy średnim promieniu zaledwie nieco ponad 11 kilometrów i masie 10^{16} kilogramów przyciąganie grawitacyjne na jego powierzchni jest o wiele za niskie, aby przewyższyć sztywność skały, wygładzać jego powierzchnię i kształtować Fobos w sferę. Przy średnicy około 550 kilometrów planetoida Pallas jest największym znanym obiektem niesferycznym. Księżyc Saturna Mimas o promieniu niecałych 200 kilometrów jest najmniejszym sferycznym obiektem Układu Słonecznego. Zbudowany jest głównie z lodu, który odkształca się znacznie łatwiej niż skała – to dlatego jest taki mały, a mimo to sferyczny. Nasze szacunki są zatem w miarę dobre.

Nawiasem mówiąc, takie szacunki wykonywane na papierowej serwetce są bardzo istotne w fizyce, mówią nam bowiem, że jesteśmy na właściwej drodze, bez zbytniego komplikowania sytuacji. Moglibyśmy doprecyzować nasze obliczenia, biorąc pod uwagę różny skład chemiczny różnych obiektów i licząc przyciąganie grawitacyjne na różnych głębokościach. Moglibyśmy nawet spróbować wykorzystać ogólną teorię względności zamiast praw Newtona, ale niewiele byśmy się wtedy dowiedzieli. Nauka tego, co można ignorować, a co uwzględnić, stanowi element i nieodłączną część doświadczenia każdego zawodowego naukowca – można to nazywać jakąś fizyczną intuicją. Nie ma żadnych określonych rozmiarów, powyżej których obiekt przyjmuje kształt sferyczny; granica zależy od składu chemicznego obiektu; mieszanina skały i lodu łatwiej ulega odkształceniom niż sama skała. Zasadniczo każdy księżyc lodowy o średnicy powyżej 400 kilometrów będzie sferą. Obiekty

zbudowane ze skał muszą być większe, ponieważ siła grawitacyjna potrzebna do odkształcenia skały jest większa. Jeżeli skalisty księżyc ma wewnętrzne źródło ciepła, prawdopodobnie w wyniku obecności dużych ilości materii radioaktywnej w jądrze lub ogrzewania pływowego, ciało łatwiej ulega odkształceniom i może przyjąć kształt sferyczny przy mniejszych rozmiarach niż obiekt mniej aktywny. Układ Słoneczny pełen jest przykładów na wzajemne oddziaływanie sztywności i grawitacji, jednak ogólnie mówiąc wydedukowaliśmy, że wszystko o promieniu kilkuset kilometrów stanie się sferyczne, gdyż siły grawitacyjne przewyższą sztywność skały.

Gdy grawitacja wygrywa, kształt obiektów, które tworzy, odzwierciedla symetrię praw fizycznych leżących u jej podstaw, i właśnie dlatego duże pojedyncze obiekty – takie jak planety i gwiazdy – są zawsze sferyczne.

W większej skali jednak sytuacja się zmienia. Nasza najbliższa galaktyczna sąsiadka, Andromeda, zawiera około 400 miliardów gwiazd uformowanych i związanych ze sobą przez grawitację. Ale galaktyka ma kształt dysku, a nie sfery. Układ Słoneczny także jest dyskiem, a nie sferą. Dlaczego?

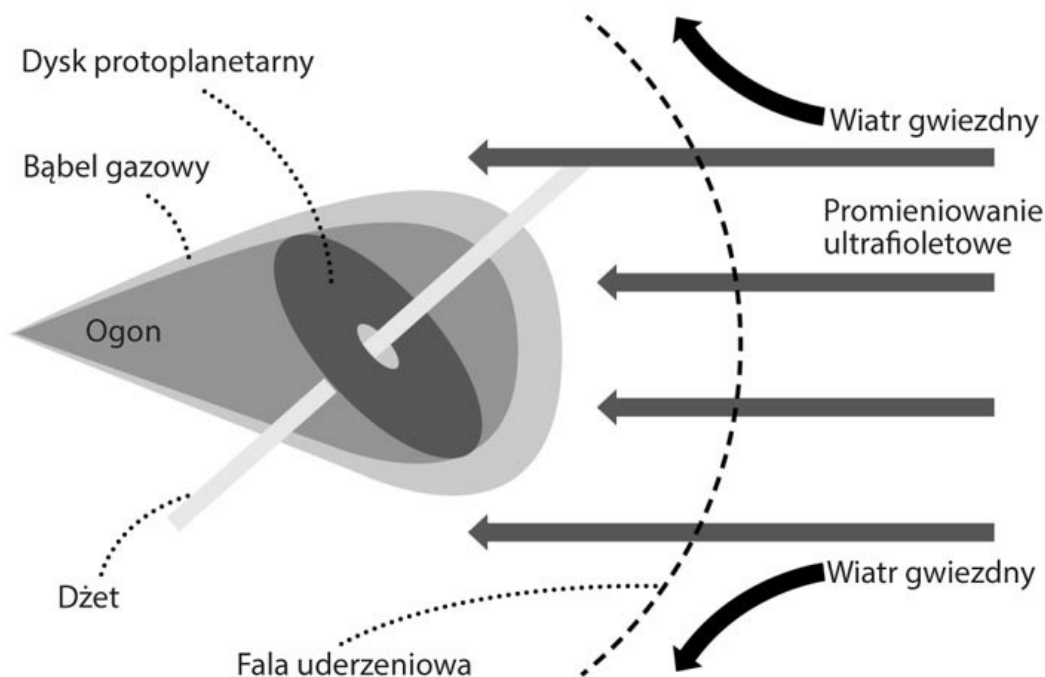
Dlaczego we Wszechświecie są dyski oraz sfery?

Powyżej wytłumaczyliśmy, że planety i duże księżyce są sferami, bo skoro siły grawitacyjne są wystarczająco silne, aby przewyższyć siły elektromagnetyczne odpowiadające za sztywność materii, leżąca u podstaw symetria sił grawitacyjnych przejawia się w obiektach, które formuje. Ponieważ w prawie grawitacji Newtona nie istnieje żaden wyróżniony kierunek, nie będzie też wyróżnionego kierunku w obiektach, które powstają pod jej wpływem. To nie do końca prawda, nawet w przypadku planet, gdyż one rotują wokół własnej osi.

Nasza planeta obraca się wokół własnej osi raz na 24 godziny. Oś obrotu wyznacza szczególny kierunek, a to oznacza, że nie wszystkie punkty na Ziemi są takie same. Osoba stojąca na ziemskim równiku rotuje z prędkością 1670 km/h, podczas gdy osoba przebywająca w Minnesocie rotuje z prędkością 1180 km/h. Symetria sferyczna uległa zniszczeniu – dwa punkty różnią się od siebie. Jak zobaczymy w rozdziale zatytułowanym *Ruch*, różnica ta prowadzi do obserwowalnych efektów, takich jak rotacja układów burzowych czy odchylenie pocisków artyleryjskich w locie. Prowadzi ona także do bardzo nieznacznego spłaszczenia Ziemi – równikowy obwód Ziemi wynosi 40 075 kilometrów, a biegunowy 40 008 kilometrów. Ziemia nie jest sferyczna, lecz jest spłaszczoną elipsoidą obrotową właśnie ze względu na rotację. Gdyby rotowała szybciej, byłaby bardziej spłaszczona. Gdy nasz Układ Słoneczny się formował, rotacja – a dokładniej moment pędu – była „eksportowana” na zewnątrz z nowo formującego się Słońca, głównie poprzez kolizje i oddziaływania magnetyczne w dysku protoplanetarnym, co powodowało spłaszczenie całego układu w dysk.

Transfer spinu na zewnątrz z centrum odpowiada również za spłaszczenie niektórych galaktyk, chociażby Galaktyki Andromedy. Gromady kuliste gwiazd, takie jak spektakularna

Messier 80, pozostały sferyczne, ponieważ były zbyt rozproszone, aby moment pędu mógł być odprowadzany na zewnątrz. Kształty obiektów związanych ze sobą grawitacyjnie zależą więc od ilości i położenia „spinu”. Dla ekspertów stosunek momentu pędu L do energii potencjalnej grawitacji E jest kwestią kluczową. Duży L/E = dysk. Mały L/E = sfera.



Niektóre z wielu właściwości, które doprowadziły do częściowej utraty symetrii dysku Układu Słonecznego.

Skrywa się tutaj bardzo ważna idea. Używaliśmy terminu „łamanie symetrii”, aby opisać, jak obecność osi rotacji wyznacza konkretny kierunek, przez co kształt obiektu odbiega od idealnego sferycznego kształtu, który odzwierciedla symetrię podstawowego prawa Natury – w tym przypadku grawitacji. Dysk naszego Układu Słonecznego jest mniej symetryczny niż sfera, ponieważ pozostaje taki sam tylko obracany wokół konkretnej osi w przestrzeni – osi rotacji. Zatem przynajmniej częściowo utraciliśmy symetrię. Możemy powiedzieć, że symetria prawa grawitacji, która ukształtowała nasz Układ Słoneczny, została ukryta przez obecność szczególnego kierunku w przestrzeni – osi rotacji. Sama rotacja jest wynikiem kilku elementów kolapsu pierwotnego obłoku pyłowego, do którego doszło pięć miliardów lat temu, a podział rotacji między Słońcem a planetami zależał od prędkości kolapsu, gęstości dysku protoplanetarnego i mnóstwa innych delikatnych szczegółów historii formowania się Układu Słonecznego. Fakt ten podkreśla jedno z głównych wyzwań współczesnej nauki: określenie, które właściwości struktur obserwowanych w Naturze są odzwierciedleniem podstawowych praw Natury, a które są uzależnione od historii formowania lub innych wpływów. To zadanie

wyjątkowo trudne do zrealizowania w przypadku skomplikowanych układów fizycznych. Kształty planet, układów planetarnych i galaktyk, choć astronomicznych rozmiarów, są łatwiejsze do wytłumaczenia niż kształty bardziej zwyczajnych obiektów, z którymi stykamy się na co dzień. Przeskoczmy więc z prostych planet do najbardziej złożonych ze wszystkich struktur fizycznych – organizmów żywych. Badając symetrie i struktury organizmów żywych, możemy dalej badać ideę mówiącą, że kształt i forma obiektów fizycznych są wynikiem złożonego współoddziaływania między głębokimi zasadami fizycznymi a historią ich formowania.

Dlaczego życie pojawiło się w tak wielu kształtach i rozmiarach?

Rywalizacja między siłą grawitacji i siłą elektromagnetyczną jest odpowiedzialna za wygładzanie powierzchni planet i księżyców w sfery oraz ograniczanie maksymalnych rozmiarów gór na ich powierzchniach. Jedną z centralnych idei stojących za tą książką, którą omówimy dokładniej w rozdziale zatytułowanym *Pierwiastki*, jest fakt, że nie ma jakiegś fundamentalnej różnicy między obiektami nieożywionymi, takimi jak planety, a żywymi, takimi jak bakterie czy ludzie; wszystkie obiekty we Wszechświecie są zbudowane z tych samych składników i zostały ukształtowane przez te same siły Natury. Powinniśmy zatem oczekiwać, że dostrzeżemy jakieś ograniczenia co do formy i funkcji obiektów żywych nakładane przez prawa Natury. Podstawowa fizyka to oczywiście nie jedyny czynnik odpowiedzialny za strukturę organizmów; istnieje także swobodna ewolucja za pomocą doboru naturalnego, która zmienia żywe organizmy w czasie w odpowiedzi na zmieniające się środowisko, interakcje z innymi organizmami żywymi i liczne dostępne nisze środowiskowe. To kreatywne współoddziaływanie niesłabnącego determinizmu praw fizycznych z kipiącą, bezustannie splatającą się, wciąż zmieniającą się bazą danych życia na Ziemi zostało wspaniale uchwycone w ostatnich wersach *O powstawaniu gatunków* Darwina:

Jest to zaiste wzniosły pogląd, iż Stwórca natchnął życiem kilka form, lub jedną tylko, i że podczas gdy planeta nasza, podlegając ścisłym prawom ciężenia, dokonywała swych obrotów, z tak prostego początku zdołał się rozwinąć i wciąż jeszcze się rozwija nieskończony szereg form najpiękniejszych i najbardziej zadziwiających.

Kolejnym z naszych powracających tematów jest czczenie energetycznej ciekawości wczesnych naukowców. Tworzone przez nich opisy idei charakteryzują się wprost zapierającym dech w piersiach liryzmem, który wciąż ma kluczowe znaczenie; a mimo to ich prezentacja wydaje się nieskrępowana przez poważniejsze i ograniczające wymagania współczesnej nauki. Także w najnowszej erze mamy do czynienia ze wspaniałymi pisarzami, którzy potrafili uchwycić logikę, przejrzystość wypowiedzi i zachwyt nad nauką – jako pierwsi na myśl przychodzą Richard Feynman, Richard Dawkins i Carl Sagan – ale istnieje coś fascynującego w obserwowaniu ewolucji nauki w słowach. Ograniczenia autorów renesansu tak często graniczą z ograniczeniami całej wiedzy, że badania opisywane na stronie stanowią badania prowadzone niemal w czasie rzeczywistym niż dobrze przemierzoną ścieżkę intelektualną. Być może właśnie ta cecha nadaje pismom dawnych mistrzów tak rewelacyjne tempo.

Tak jak siła grawitacji nakłada ograniczenie na maksymalne rozmiary gór na Ziemi, tak samo ogranicza zakres form, które mogą powstać poprzez dobór naturalny, redukując całkowite rozmiary organizmów żyjących na jej powierzchni. Cztery lata temu Galileusz

badał czynniki, które określają rozmiary zwierząt; podobnie jak Kepler badający płatki śniegu, operował na granicach wiedzy, wyprzedzając swoje czasy. *Dyskursy i matematyczne demonstracje odnoszące się do dwóch nauk* to ostatnia książka Galileusza, napisana już w warunkach aresztu domowego i opublikowana w 1638 roku przez holenderskiego wydawcę Lodewijka Elseviera, ponieważ żaden inny kraj znajdujący się pod wpływem inkwizycji nie chciał nawet na nią spojrzeć. Każdy naukowiec czytający tę książkę rozpozna ową nazwę: firma Elsevier, nazwana tak od nazwiska wydawcy, jest dzisiaj jednym z głównych wydawców periodyków naukowych. Praca Galileusza napisana jest w stylu konwersacji trzech mężczyzn: Simplicia, Sagreda i Salviatiego, z których każdy reprezentuje autora w różnym wieku i charakteryzującego się różnym poziomem wiedzy. Postacie przekazują z pytania na pytanie podczas rozmowy trwającej cztery dni, omawiając i debatując nad każdym tematem przed przejściem do kolejnego. W pewnym sensie czytanie tej książki stanowi przyjemność porównywalną z podsłuchiowaniem konwersacji na ławce w parku – aczkolwiek jest to park odwiedzany przez nietypowych myślicieli. Galileusz omawia tam większość ówczesnej fizyki, włącznie z krytycznym spojrzeniem na fizykę Arystotelesa, ruch przyspieszony, ruch pocisków i naturę nieskończoności. Jego badania także skupiały się na trwałości materiałów oraz ograniczeniach rozmiarów i form struktur, zarówno żywych, jak i nieożywionych, nakładanych przez prawa Natury.

Na podstawie tego, co już omówiłem, wyraźnie można dostrzec niemożliwość zwiększania rozmiarów struktur do ogromnych wymiarów, tak w sztuce, jak i w Naturze. Podobnie niemożliwość budowania statków, pałaców czy świątyń ogromnych rozmiarów w taki sposób, aby belki, żelazne śruby i wszystkie inne elementy konstrukcyjne były w stanie je utrzymać. Natura również nie może wytwarzać drzew o wyjątkowych rozmiarach, ponieważ ich gałęzie odłamywałyby się pod własnym ciężaru; niemożliwe byłoby budowanie struktur kostnych ludzi, koni czy innych zwierząt tak, aby utrzymywały wszystko na miejscu i wykonywały swoje normalne funkcje, jeżeli zwierzęta te miałyby mieć znacznie większy niż zwykły wzrost. Zwiększone rozmiary można osiągnąć tylko, stosując trwalsze i silniejsze materiały niż zwykle lub też powiększając rozmiary kości, tym samym zmieniając ich kształt, co prowadzi do powstania monstrów.

Galileusz po raz pierwszy wskazuje związek między objętością a powierzchnią, znany dzisiaj jako prawo kwadratu-sześcianu; gdy rozmiary obiektu wzrastają, objętość rośnie szybciej niż powierzchnia. Wyobraźmy sobie na przykład kostkę o boku równym 2 cm. Powierzchnia jej ścian to $6 \times 2 \times 2 = 24 \text{ cm}^2$. Objętość to $2 \times 2 \times 2 = 8 \text{ cm}^3$. Jeżeli dwukrotnie zwiększymy długość boku, powierzchnia ścian wyniesie 96 cm^2 , a objętość 64 cm^3 . Ponownie dwukrotnie zwiększymy długość boku i powierzchnia ścian rośnie do 384 cm^2 , a objętość do 512 cm^3 . I tak dalej.

To oznacza, że wraz ze zwiększaniem rozmiarów zwierząt ich objętość, a tym samym ich masa, rośnie szybciej niż ich powierzchnia oraz powierzchnia przekroju ich kości. Skutkiem jest to, że zwierząt nie da się przeskalować w większe. Myszy nie można powiększyć do rozmiarów słonia, bo jej szkielet by tego nie wytrzymał; to właśnie dlatego słon ma grubsze nogi w stosunku do reszty ciała niż mysz. To sprawia, że mamy do czynienia

z fundamentalnym ograniczeniem maksymalnych rozmiarów organizmów żywych na lądzie; wytrzymałość strukturalna kości, lub drewna w przypadku drzew, ogranicza masę organizmu w ten sam sposób, w jaki strukturalna wytrzymałość skał występujących w skorupie ziemskiej ogranicza rozmiary gór. Na Marsie słonie mogłyby mieć mniej masywne nogi.

Galileusz uświadomił sobie, że istnieje wyjątek od tej reguły. Tam, gdzie grawitacja nakłada ograniczenie na rozmiar i kształt zwierząt na lądzie, ograniczenia nakładane przez prawa fizyczne na organizmy żywe w wodzie są inne. Zwierzęta morskie unoszą się w wodzie, co znaczy, że wpływ grawitacji nie ma żadnego znaczenia. Skoro do utrzymania ich masy nie są potrzebne wytrzymałe kości, ich forma jest wyłączona spod tego jednego ograniczenia.

Tak o tym rozmawiają Simplicio, Sagredo i Salviati na swojej metaforycznej ławce parkowej. Swoją drogą nie potrafię sobie ich nie wyobrazić jako renesansowej wersji Pete'a i Duda^[8].

Simplicio: Być może tak jest, ale skłonny jestem wątpić z uwagi na to, że potężne rozmiary osiągnęte przez niektóre ryby, takie jak wieloryby, nawet dziesięciokrotnie przewyższają rozmiary słonia, a mimo to jakoś się utrzymują.

Simplicio: Bardzo mądra uwaga! A teraz, w odpowiedzi, powiedz mi, czy kiedykolwiek widziałeś rybę pozostającą w bezruchu pod wodą, ani nie opadającą na dno, ani nie unoszącą się ku powierzchni, bez wywierania siły poprzez płynięcie?

Simplicio: U zwierząt morskich zatem okoliczności są odwrotne do tego, co obserwujemy u zwierząt lądowych, w tym sensie, że u tych ostatnich kości utrzymują nie tylko własny ciężar, ale także ciężar ciała, podczas gdy u tych pierwszych ciało utrzymuje nie tylko własny ciężar, lecz również ciężar kości. Dlatego powinniśmy przestać zastanawiać się, dlaczego te niesamowicie duże zwierzęta zamieszkują wodę, a nie ląd, to znaczy powietrze.

Sagredo: Jestem przekonany i chcę tylko dodać, że to, co nazywamy zwierzętami lądowymi, tak naprawdę powinniśmy nazywać zwierzętami powietrznymi, skoro żyją w powietrzu, są otoczone powietrzem i oddychają powietrzem.

Salviati: Podobają mi się dyskusja Simplicia, zarówno sformułowane pytanie, jak i odpowiedź. Co więcej, wyraźnie widzę, że taka ogromna ryba po wyciągnięciu na brzeg nie byłaby w stanie zbyt długo się utrzymać, ale uległaby zgnieceniu pod wpływem własnej masy, gdy tylko połączenia między jej kośćmi nie wytrzymałyby naprężeń.

Uwolnione spod tyranii grawitacji, zwierzęta wodne mogą być większe niż ich lądowi kuzyni, lecz nie są całkowicie wyzwolone spod praw fizyki.

Każdej zimy ciepłe wody Florydy stanowią dom dla jednego z mniej eleganckich kształtów Natury. Należy tu jednak poczynić zastrzeżenie, bowiem nieporadnie wyglądający manat jest równie dobrze przystosowany do swojego środowiska co najestetyczniejszy, wyrefinowany motyl. Zachodnioindyjski manat to największy żyjący przedstawiciel rzędu *Sirenia* całkowicie wodnych, roślinożernych ssaków. Być może nie do końca dokładne taksonomicznie, ale trafne może być wyobrażenie sobie czterometrowej wodnej krowy bez nóg, niespiesznie pasącej się na morskich trawach rosnących w wolno poruszających się prądach wodnych wzdłuż wybrzeża Florydy.

W miesiącach letnich manaty zapuszczają się na północ nawet do Massachusetts, jednak

wraz ze spadkiem temperatury związanym ze zmianą pór roku muszą powrócić do cieplejszych mórz. Zwierzęta te nie są w stanie zbyt długo przetrwać w wodach o temperaturze poniżej 20 stopni Celsjusza. Konieczność znalezienia ciepłych wód na zimę każe manatom zbierać się w ogromne grupy wokół gorących źródeł, którymi usiane jest wybrzeże Florydy i gdzie temperatury wody utrzymują się powyżej 22 stopni Celsjusza przez cały rok. Wykorzystują one także aktywność ludzi, gromadząc się w wodach wypływających z elektrowni w pobliżu Apollo Beach i Fort Myers. Manat to naprawdę dziwne zwierzę; ma więcej wspólnego ze słoniem niż z jakimkolwiek innym ssakiem morskim – obydwa gatunki miały wspólnego przodka jakieś 60 milionów lat temu, wkrótce po tym, jak wymarły dinozaury. Ów przodek mógł przypominać współczesnego górala skalnego charakteryzującego się długością około 50 centymetrów i nieprzypominającego ani manata, ani słonia; 60 milionów lat to dużo czasu dla bezkierunkowego sита doboru naturalnego na wyrzeźbienie zwierzęcia wykorzystującego zalety określonych nisz środowiskowych.

Niszą słonia jest bycie największym zwierzęciem lądowym, co z pewnością daje mu przewagę nad drapieżnikami, aczkolwiek jest on też żywym anatomicznym dowodem na zmagania z grawitacją. Zgodnie z prawem kwadratu-sześcianu słoń wyewoluował z wyjątkowo grubymi nogami, które pozwalają utrzymać jego znaczną masę. Mamy tutaj do czynienia także z kwestią chłodzenia: ciepło ucieka z organizmu przez jego powierzchnię. Wraz ze wzrostem objętości zwierzęcia rośnie ilość wydzielanego przez niego ciepła, ale powierzchnia proporcjonalnie się zmniejsza zgodnie z prawem kwadratu-sześcianu. To stanowi problem dla zwierząt lądowych; słoń rozwiązał ten problem poprzez rozwój nowatorskiego systemu chłodzenia – wielkich uszu.

Manat z kolei zasiedlił inną niszę. Przejście z mieszkańca rejonów przybrzeżnych do postaci ssaka morskiego spowodowało wyewoluowanie kończyn w płetwy, które nadal posiadają praprawną strukturę obejmującą kości palców i paznokcie. Kończyny tylne stały się gigantycznymi płetwami ogonowymi przypominającymi wiosła w stopniowych zmianach ewolucyjnych wspaniale udokumentowanych w skamielinach. Kończyny dawnego przodka, które znacząco urosły, aby pozwolić słoniom stawić czoła grawitacji, w przypadku manatów stały się opływowe, umożliwiając im pływanie z prędkością nawet 12 kilometrów na godzinę. Manat może nurkować głęboko nawet na 20 minut, choć jako ssak oddychający powietrzem musi prędzej czy później wynurzać się na powierzchnię. Ilość czasu spędzanego pod wodą maksymalizuje on poprzez spowalnianie pulsu i metabolizmu, obniżając tym samym zapotrzebowanie na tlen; jednak w tym momencie biologia zaczyna kłócić się z fizyką. Niskie tempo metabolizmu oznacza ograniczone wytwarzanie ciepła, a woda wyjątkowo skutecznie odciąga ciepło od ciała, dlatego pojawia się tutaj ryzyko zbytniego ochłodzenia. Rozwiązania kompromisowe odkryte naturalnie przez dobór naturalny to wzrost rozmiarów, który pozwala na obniżenie stosunku powierzchni ciała do jego objętości, a tym samym obniżenie tempa utraty ciepła na jednostkę objętości, oraz przyjęcie kształtu sferycznego (zob. ilustracja poniżej).

To przepiękny przykład naturalnie występującego kształtu odzwierciedlającego głębszą matematyczną rzeczywistość. Sfera jest trójwymiarowym kształtem o najmniejszym stosunku

Symetria i łamanie symetrii w biologii

Człowiek witruiński Leonarda da Vinci jest najprawdopodobniej najslynniejszym rysunkiem kształtu człowieka w historii. Obraz przedstawia człowieka w dwóch nałożonych na siebie pozycjach: opisanego na okręgu i kwadracie. Proporcje dokładnie obliczono w celu ukazania perfekcji człowieka i połączenia go bezpośrednio ze Wszechświatem. Da Vinci zainspirował się jedną z najważniejszych prac klasycznych – *De architectura* autorstwa rzymskiego architekta Witruwiusza. Związek formy człowieka z okręgiem i kwadratem odzwierciedla starożytne idee – z czasów Platona, Pitagorasa i wcześniejszych tradycji mistycznych – które usiłowały odkryć połączenie między Naturą i geometrią. Wczesne prace Keplera dotyczące ruchu planet także były mocno osadzone w tej tradycji; pogląd, że ruch planet można opisać idealnymi bryłami platonicznymi, odrzucił on dopiero, gdy dane zmusiły go do stwierdzenia, iż planety poruszają się w rzeczywistości po orbitach eliptycznych, a nie kołowych. Warto zwrócić uwagę, że wytłumaczenie ruchu planet jest bardziej eleganckie i piękniejsze niż geometryczna perfekcja, którą Kepler miał nadzieję odkryć. Jak już widzieliśmy, ruch wszystkich planet i księżyców w Układzie Słonecznym, a także w każdym innym układzie planetarnym we Wszechświecie, można opisać, stosując do nich prawa ruchu Newtona i prawo powszechnego ciążenia; to istotne uproszczenie, które z pewnością spodobałoby się Keplerowi, a przed nim również Platonowi. Wszak prawa Newtona uosabiają „idealną” symetrię sferyczną ukrytą, choć wciąż widoczną, w strukturach, które tworzy.

Podobnie, ze współczesnej perspektywy patrząc, interesująca w człowieku jest nie tyle symetria, ile jego częściowa symetria. Jak już wspomnieliśmy, sfera to idealnie symetryczny trójwymiarowy kształt – to znaczy wygląda dokładnie tak samo pod każdym kątem. Ludzie wraz z większością (choć nie wszystkimi) dużych zwierząt posiadają głowę na jednym końcu, a odbyt na drugim – mają one bardzo różne funkcje u większości wrażliwych osób. Ludzie charakteryzują się tak zwaną symetrią dwustronną, przynajmniej na zewnątrz. Oznacza to, że istnieje określona oś symetrii przebiegająca od głowy do odbytu, wzdłuż której wykazujemy symetrię lustrzaną; mamy prawą i lewą połowę ciała. Dlaczego?

Ta książka bazuje na programie telewizyjnym. Częścią wyzwania podczas kręcenia filmu dokumentalnego, którego celem jest wytłumaczenie lub opisanie abstrakcyjnych idei naukowych, pozostaje ustalenie, na co należy zwrócić kamerę. Czasy, w których widzowie chcieliby oglądać akademika w średnim wieku, w bezrękawniku, z chaotyczną fryzurą i ołówkiem, dawno już minęły. Żałuję, ponieważ urodziłem się w 1968 roku, mam naturalnie chaotyczne włosy i wielki piórnik na ołówki. Ktoś z zespołu w BBC wpadł na bardzo dobry pomysł zilustrowania zakresu symetrii żywych organizmów: na wyspie Marado na południowym wybrzeżu Korei Południowej znalazł społeczność nurkujących babć.

Od wieków kobiety z tego regionu Korei nurkują na wstrzymanym oddechu, polując na

dnie morskim na cenne słuchotki, muszle, jeżowce i ośmiornice. Ich zbiory są tak ważne, że Marado stało się jednym z rzadkich na świecie społeczeństw matriarchalnych: kobiety tradycyjnie pracują na oceanie, podczas gdy mężczyźni wychowują dzieci i prowadzą dom. W zimnych wodach Morza Wschodniochińskiego zostanie Haenyeo, czyli „kobietą morza”, nie jest takie łatwe. Dziewczęta zaczynają trenować w wieku 11 lat, lecz po osiągnięciu odpowiedniego poziomu wiele z nich nurkuje przez resztę swojego życia. Nie do końca wiadomo, skąd się wzięła ta tradycja, jednak z perspektywy biologicznej ma ona sens – kobiety są lepiej przystosowane do pracy w zimnej wodzie niż mężczyźni. Przed pojawieniem się pianek do nurkowania Haenyeo nurkowały praktycznie bez osłony i dodatkowy tłuszcz w organizmie kobiety stanowił zaletę. Nurkowie pozostają w wodzie przez kilka godzin, nurkując za każdym razem nawet na dwie minuty na głębokość większą niż 20 metrów. Dzisiaj średni wiek Haenyeo to 65 lat, a niektóre z nich mają ponad 80 lat. Ten demograficzny klif odzwierciedla zmieniający się świat. Aktualnie pracuje mniej niż 2000 Haenyeo, a kiedyś było ich 50 000. Bogactwa dna morskiego już nie kuszą pokolenia XXI wieku, aczkolwiek Haenyeo są wciąż bardzo poważane w kulturze koreańskiej, zaś turyści z całego świata przyjeżdżają, aby podziwiać nurkujące kobiety i zjeść trochę upolowanych przez nie owoców morza.

Oceany stanowią dom dla najbardziej rzucających się w oczy różnych kształtów ciała. Rozgwiazdy, anemony morskie i meduzy charakteryzują się symetrią radialną, przynajmniej powierzchownie; mają dolną i górną część, które można określić poprzez położenie otworu gębowego, jednak nie mają prawej i lewej strony. Meduzę cechuje ciągła symetria obrotowa wokół osi centralnej, podczas gdy pięcioramienna rozgwiazda wygląda tak samo po każdym obrocie o 72 stopnie. Ośmiornica odznacza się symetrią dwustronną tak jak my: symetria lustrzana wokół osi centralnej, nie mówiąc już o ośmiu ramionach. Niektóre gąbki nie mają w ogóle żadnej symetrii. Skąd bierze się tak ogromna rodzina symetrii wśród organizmów żywych? To bardzo dobre pytanie, na które wciąż poszukiwana jest odpowiedź. Najstarsze szeroko akceptowane dowody kopalne wskazujące na symetrię dwustronną mają 555 milionów lat i przedstawiają przypominające ślimaka stworzenie o nazwie Kimberella, organizm żyjący na skałach, a znaleziony w Australii Południowej oraz – liczniej – w pobliżu Morza Białego w Rosji. To tuż przed eksplozją kambryjską, wielką dywersyfikacją życia, która pojawiła się po najwcześniejszych dowodach na wielokomórkowe organizmy w zapisach kopalnych z okresu ediakarańskiego 600 milionów lat temu.

Najpowszechniej akceptowany pogląd mówi o tym, iż symetria dwustronna posiada tę przewagę nad symetrią radialną, że umożliwia organizmom wydajniejsze poruszanie się. Pomyśl tu o rekinie. Nie bez powodu jego kształt przypomina kształt łodzi podwodnej; jedno i drugie wszak muszą szybko i wydajnie przemieszczać się w wodzie. Nie budujemy szybkich, radialnie symetrycznych łodzi podwodnych; wszystkie wyglądają jak rekiny. Gdy życie zaczęło odczuwać świat i poruszać się w coraz bardziej złożony sposób, okazało się, że ciało z wyróżnionymi górą, dołem, prawą i lewą stroną jest najlepszym domem dla centralnego układu nerwowego i zapewnia zwinność potrzebną w powstającym świecie drapieżników i ofiar.

Istnieje jednak inna możliwość. Meduzy także charakteryzują się symetrią dwustronną, choć jest ona wewnętrzna. Z perspektywy ewolucyjnej to ważne. Może wskazywać, że symetria dwuboczna na początku powstała w celu usprawnienia wewnętrznego funkcjonowania organizmów; umożliwia na przykład wydajne oddzielenie układu pokarmowego od układu oddechowego. Co więcej, geny odpowiedzialne za rozwój dwubocznie symetrycznych zwierząt można znaleźć również w meduzach i anemonach. Uważa się to za dowód, że wspólny przodek mógł charakteryzować się symetrią dwuboczną, a zewnętrzna symetria radialna, którą obserwujemy w niektórych złożonych organizmach wielokomórkowych, jest późniejszym osiągnięciem ewolucji.

To kolejny przykład wspaniałego tempa i bezustannie zmieniającej się natury nauki. Wczorajsze wyjaśnienia książkowe jutro mogą stać się ciekawostką historyczną – i dokładnie tak musi być, skoro nasza wiedza o świecie naturalnym jest niepełna i ma bezustannie rosnać. Postęp w nauce zakłada, że wczoraj rozumieliśmy mniej, niż będziemy rozumieć jutro. Mimo to myślę, że bezsprzeczne i wspaniałe jest to, iż potrafimy prześledzić naszą historię w skali geologicznej do okresu historii Ziemi jakieś pół miliarda lat temu, kiedy mieliśmy przodka wspólnego z wszystkimi wielokomórkowymi zwierzętami obecnymi na Ziemi dzisiaj, który z wyglądu przypominałby Kimberellę.

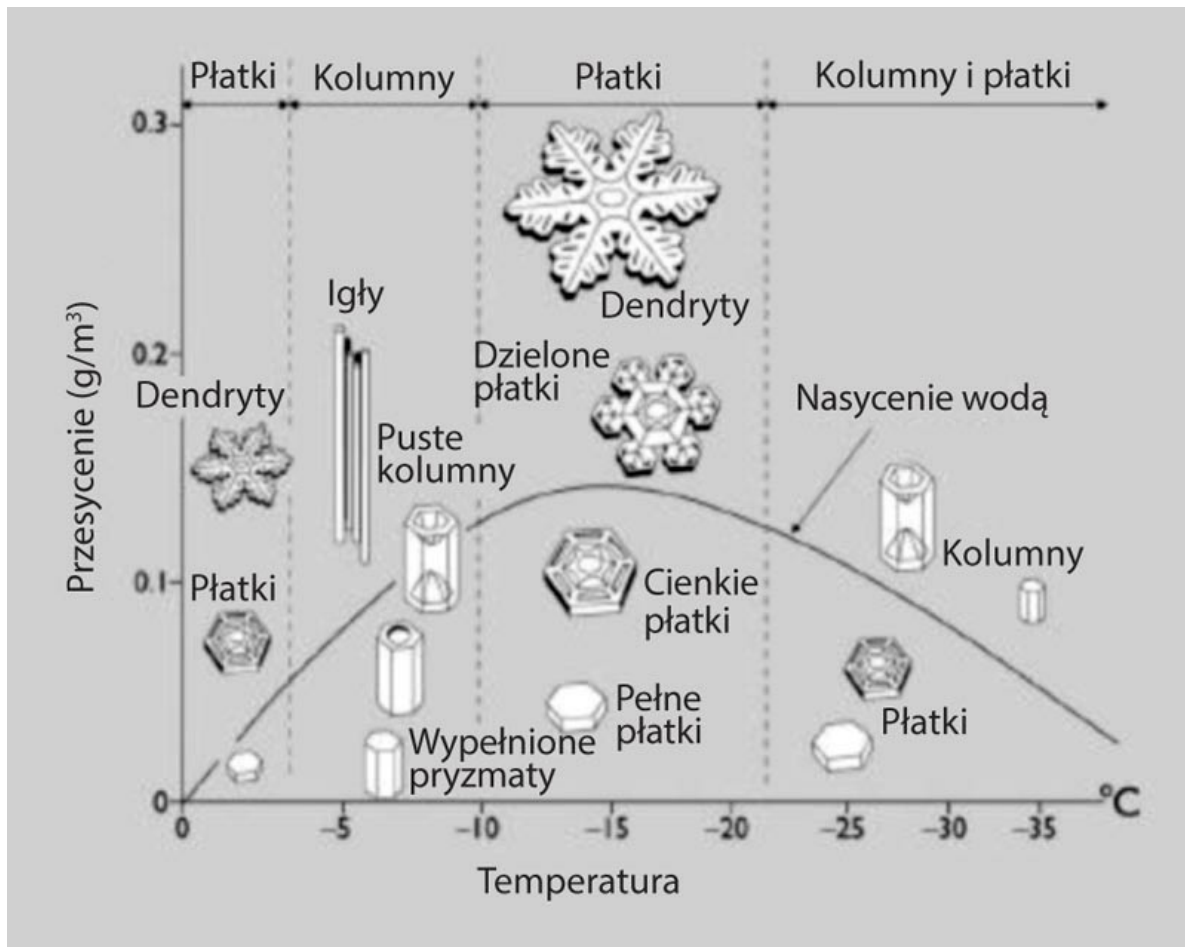


Diagram morfologii przedstawia, w jaki sposób struktura płatków śniegu różni się w zależności od temperatury i wilgotności.

Wszechświat w płatku śniegu

Skończmy zatem tam, gdzie zaczęliśmy, łącząc wszystko, co odkryliśmy w celu odpowiedzi na pytanie Keplera o pochodzenie indywidualności i zbiorowe piękno symetrii płatków śniegu. Prześledzimy formowanie się płatków śniegu od początku w wysokich warstwach chmur po delikatne dotarcie na powierzchnię Ziemi. Płatki śniegu powstają z pary wodnej zmieniającej się bezpośrednio w lód. Nie są to zamrożone krople śniegu, to kryształy stopniowo rosnące w trakcie podróży przez chmury.

Strukturę kryształów lodu w zakresie temperatur i ciśnień występujących na Ziemi przedstawiono na ilustracji obok. Kąt między wiązaniami w wolnej cząsteczce wody wynoszący 104,5 stopnia – będący skutkiem istnienia praw teorii kwantowej – odpowiada za sześciokątną strukturę krystaliczną, która z kolei stanowi podstawę sześciokątnej symetrii płatków śniegu. Sześciokąty wyraźnie widać na fotografiach Snowflake’a Wilsona zamieszczonych na wklejce. Płatki śniegu są niedoskonałym cieniem bardziej „idealnych” form – sieci lodowej; z kolei ona sama jest konsekwencją struktury cząsteczki wody, która stanowi fizyczny przejaw fundamentalnych praw Natury odpowiedzialnych za jej powstanie – teorii kwantowych siły słabej, mocnej i elektromagnetycznej. Zatem gdy spojrzysz na płatek śniegu, zobaczysz pierwotną strukturę Wszechświata.

Mimo to, wbrew leżącej u podstaw prostoty, każdy płatek śniegu jest inny. Dlaczego? Z uwagi na indywidualną historię powstawania każdego z nich. Jak widzieliśmy w przypadku planet, galaktyk i babć, proste prawa Natury mogą rzeźbić nieskończenie wiele kształtów, ponieważ warunki wstępne i historia formowania nigdy nie są dokładnie takie same. Symetrie praw są przesłonięte historią i to właśnie zadaniem naukowca jest przeniknięcie przez zniekształcającą soczewkę historii. Wskazówką mówiącą, jak do tego może dochodzić w przypadku płatków śniegu, jest tak zwany diagram morfologii pokazany na ilustracji [na stronie 88](#). Diagram morfologii wskazuje, w jaki sposób struktura płatków śniegu zmienia się w zależności od temperatury i wilgotności.

Pionowa oś diagramu przedstawia wilgotność: zawartość pary wodnej w chmurach, w których powstają płatki śniegu. Pozioma oś przedstawia temperaturę. Duże, puszyste płatki śniegu z licznymi odgałęzieniami powstają w warunkach wysokiej wilgotności i w zakresie temperatur między –10 a –20 stopni Celsjusza. W niższych temperaturach i wilgotności płatki śniegu to małe, nierozgałęzione sześciokąty. Wyższe temperatury prowadzą do powstania igieł i graniastosłupów. Aby powstały złożone, delikatne płatki śniegu, niezbędna jest wysoka wilgotność powietrza. Diagram prezentuje zarys tego, jak płatki śniegu mogą być podobne do siebie, a mimo to niepowtarzalne. Nakładając dane w ten sposób, widzimy, jak różne procesy wzrostu kryształów preferowane są przez różne warunki i historie formowania.

Żeby lepiej to pojąć, musimy zrozumieć, w jaki sposób rosną kryształy. Proces, w którym geometria cząsteczek wody przenoszona jest na płatek śniegu, to tak zwane fasetowanie. Mały

kryształ lodu w chmurze rośnie, ponieważ sąsiadujące z nim cząsteczki wody uderzają w niego, przyklejając się poprzez wiązania wodorowe. Fasetowanie zachodzi, gdyż poszarpane, nierówne fragmenty kryształu mają więcej dostępnych miejsc, do których mogą się przyczepić inne cząsteczki wody; gładkie fragmenty z drugiej strony mają ich mniej. To oznacza, że nierówne obszary młodego kryształu będą rosły szybciej niż obszary gładkie, przez co same będą się wygładzały wraz z wypełnianiem nierównych miejsc. Fasetowanie prowadzi do powstania płaskich, sześciokątnych graniastosłupów, takich jak te oznaczone jako „pełne płatki” na diagramie morfologii. Płatki są płaskie, bo cząsteczki wody szybciej łączą się z prostokątnymi, cienkimi krawędziami zwanymi ściankami pryzmatu niż z sześciokątną powierzchnią górną lub dolną, czyli tak zwanymi ściankami podstawowymi. W warunkach niskiej wilgotności jest to dominująca metoda wzrostu, dlatego też płatki śniegu mogą pozostać w dużej mierze sześciokątne z kilkoma delikatnymi gałęziami. Jeżeli spojrzysz ponownie na fotografii Snowflake’a Bentley’a znajdujące się na wklejce, płatek śniegu w prawym górnym rogu oznaczony numerem 780 przedstawia właśnie ten typ.

Złożoność wynika z innej formy wzrostu kryształów zwanej niestabilnością rozgałęziania. Jeżeli na powierzchni kryształu pojawi się wypukłość, szczyt wypukłości ma nieco większe prawdopodobieństwo akumulacji cząsteczek wody, ponieważ wystaje on nieco bardziej w kierunku wilgotnego powietrza. To sprawia, że wypukłość zaczyna szybko rosnąć – właśnie dlatego nazywa się to niestabilnością. Rozgałęzianie rywalizuje z fasetowaniem o ograniczone zasoby cząsteczek wody i to ta rywalizacja prowadzi do powstawania takiej złożoności płatków śniegu. Rogi sześciokątnych pryzmatów charakteryzują się niestabilnością rozgałęziania – mają tendencję do szybszego rozrostu niż płaskie boki, przez co stają się one wklęsłe. Temu procesowi przeciwstawia się fasetowanie, gdyż istnieje teraz więcej miejsc dostępnych do wiązania w centrum wklęsłej powierzchni między krawędziami. W punktach znajduje się więcej cząsteczek wody, jednak będą one szybciej przyłączały się do środka powstałych krzywych. Obydwa procesy konkurują ze sobą o cząsteczki wody. Jeżeli powietrze jest wilgotne i w otoczeniu znajduje się mnóstwo dostępnych cząsteczek wody, rozgałęzianie dominuje, bo tempo wzrostu niestabilności przewyższa tempo, w którym cząsteczki wody rozpraszają się wzdłuż fasetowanej powierzchni poniżej; rogi sześciokątnych pryzmatów rosną zatem szybciej, powodując powstanie delikatnych, przypominających gwiazdę gałęzi. Jeżeli powietrze jest mniej wilgotne, tempo wzrostu gałęzi spada poniżej tempa rozpraszania i dominuje fasetowanie; kryształy ewoluują w kierunku gładszych, prostszych kształtów.

W trakcie rośnięcia płatek śniegu przejdzie przez wiele różnych obszarów chmury i doświadczy różnych warunków, przelatując przez bardziej i mniej wilgotne powietrze o zmiennej temperaturze. Każdy z tych obszarów będzie faworyzował różnego typu wzrost: czasami dominować będzie fasetowanie, a czasami przeważać będzie rozgałęzianie. Spójrz ponownie na zdjęcia Snowflake’a Bentley’a. Możesz teraz odszyfrować historię każdego płatka śniegu: wszystkie zaczynają swoje życie od małego sześciokąta; gdy są małe, zawsze wygrywa fasetowanie. Kiedy przemieszczają się w obszar wilgotnego powietrza, rozgałęzianie napędza eksplozję złożoności. Mogą się przemieszczać w mniej wilgotne obszary, gdzie pałeczkę

przejmuje gładki wzrost poprzez fasetowanie. Właśnie dlatego każdy płatek śniegu jest inny. Każdy podąża bowiem inną ścieżką przez chmury, a każdy szczegół tej ścieżki jest wpisany w ich strukturę. Płatki śniegu zachowują element leżącej u podstaw symetrii kryształu, ponieważ warunki nie zmieniają się w chmurach na przestrzeni kilku centymetrów, czyli przeciętnego rozmiaru płatka śniegu. Każdy róg zatem doświadcza dokładnie tych samych warunków, co sprawia, że wzrost jest równomierny. Jeżeli jedna strona płatka śniegu doświadcza innej historii niż druga – na przykład w przypadku kolizji – płatek śniegu traci symetrię. Oczywiście wiele płatków śniegu dociera do ziemi w zniszczonym, asymetrycznym stanie, ale im nie robimy zdjęć!

Jako fizyk muszę zauważyć, że płatki śniegu są obiektami czterowymiarowymi; ich strukturę można poznać tylko w kontekście ich historii, a ich historia wizualnie zakodowana jest w ich strukturze. Płatek śniegu można czytać jak kronikę. Dokładnie to samo można powiedzieć o żywych organizmach. Budowy manata nie da się zrozumieć bez zrozumienia historii jego ewolucji. Dlaczego manat posiada kości palców w swoich płetwach? Ponieważ wyewoluowały z nóg jego niewielkiego przodka żyjącego na lądzie. Organizmy żywe są niczym zdjęcia, tymczasowe cienie znacznie większej, czterowymiarowej opowieści; w ich budowie zakodowana jest cała historia życia na Ziemi, rozciągająca się na przestrzeni czterech miliardów lat. Nic więc dziwnego, że są takie złożone i trudne do zrozumienia. Wszak w ich budowie zawarty jest każdy zakręt i zwrot historii ich przodków.

Współoddziaływanie między prawami Natury, które są proste i głęboko symetryczne, a historią, która jest długa i zagmatwana, odpowiada za złożony świat, w którym żyjemy. Triumfem współczesnej nauki jest to, że potrafimy je od siebie oddzielić, a to z kolei doprowadziło do niezwykle istotnych odkryć. Ziarna tego podejścia są wyraźnie widoczne w pracach Keplera, wiele lat temu. „Jak to się dzieje, że kiedy zacznie śnieżyć, pierwsze cząstki śniegu zawsze przyjmują kształt małych, sześciokątnych gwiazd; musi być po temu jakiś powód, bo gdyby to się działo przypadkiem, to dlaczego zawsze spadają z sześcioma kątami, a nie z pięcioma czy siedmioma...?” – pyta. I tutaj właśnie tkwi sedno: Natura jest piękna, w bardzo głębokim sensie, i chcemy zajrzeć w to piękno u samych podstaw. Nie zgadujemy. Nie wymyślamy czegokolwiek. Pomyślmy, obserwujmy, eksperymentujmy, patrzmy uważnie, poszukujmy podobieństw i różnic w świecie naturalnym i próbujmy je zrozumieć. A przede wszystkim przyzwyczajmy się, rozkoszujmy się i cieszymy, gdy natkniemy się na nieznane, a następnie poświęćmy czas na badanie nieskończonych terytoriów nieznanego. Jeżeli przyjrzymy się im z bliska, nawet w najprostszych rzeczach znajdziemy prawdziwe skarby.

PŁATEK ŚNIEGU MOŻNA
CZYTAĆ JAK KRONIKĘ.
DOKŁADNIE TO SAMO
MOŻNA POWIEDZIEĆ
O ŻYWYCH ORGANIZMACH.

RUCH

Gdzieś w czasoprzestrzeni

Czy pamiętasz jakiś idealny letni dzień? Nie dokładnie miejsce czy czas, ale moment leniwego ciepła, zapachu pieprzu, kłującej trawy, unoszących się nasion i odganiania owadów. Wielcy artyści są w stanie przywołać zagmatwaną przeszłość i zawrzeć ją w żywych doświadczeniach obecnych, bowiem wspomnienia są niezniszczalne. Claude Monet uchwycił zapisy tysiąca dziecięcych lat w swoim dziele *Les Coquelicots* (Maki). Prezentujący wiejski krajobraz okolic Argenteuil obraz wciąż jest jednym z najbardziej ukochanych i rozpoznawanych dzieł tego malarza.

Monet malował serię podobnych obrazów w ciągu lata i jesieni 1873 roku. Dokładna data i czas tej sceny są nieznane, ale pola maków wokół Argenteuil rozkwitają na przełomie maja i czerwca, a jasne niebo i brak cieni wskazują, że obrazy przedstawiają godziny okołopołudniowe. Przyjmijmy własną *licentia poetica* i uchwycimy moment, w którym mały chłopiec spaceruje przez pole maków ze swoją matką, a Monet właśnie kładzie dokładnie dobraną kroplę czerwonej farby na płótnie. Założmy, że nastąpiło to w południe 26 maja 1873 roku, na polu w pobliżu wioski Argenteuil we Francji. Prawie 150 lat później ten dzień zniknął już z żywej pamięci i istnieje tylko na obrazie Moneta. To miejsce wciąż jest, lecz moment już minął. Można by powiedzieć, że to zdrowy rozsądek, ale czy na pewno?

NAGLE, ZZA KRAWĘDZI KSIĘŻYCA,
W DŁUGICH POWOLNYCH MOMENTACH
OGROMNEJ MAJESTATYCZNOŚCI,
WYNURZA SIĘ BŁYSZCZĄCA NIEBIESKO-
-BIAŁA KULA, JASNA, DELIKATNA SFERA
KOLORU NIEBIESKIEGO NIEBA OPASANA
Z WOLNA WIRUJĄCYMI SUKNAMI BIELI,
WZNOSZĄC SIĘ STOPNIOWO NICZYM
MAŁA PERŁA W GĘSTYM NIEBIE
CZARNEJ TAJEMNICY. DOPIERO
PO CHWILI UŚWIADAMIASZ SOBIE,
ŻE TO ZIEMIA... DOM.

EDGAR MITCHELL, APOLLO 14, ORBITA WOKÓŁ KSIĘŻYCA, LUTY 1971

W 1905 roku Albert Einstein opublikował swoją szczególną teorię względności, która zawiera słynne równanie $E = mc^2$. Wielkim pocieszeniem jest dla mnie fakt, że istnieje coś takiego jak słynne równanie; pozwala mi ono wyobrazić sobie, że widzę delikatny płomień intelektualnej głębi rozświetlający wszechobecną ciemność popularnej kultury. Szczególna teoria względności zajmuje się momentami, a właściwie zdarzeniami. Zdarzenie to coś, co wydarza się w określonym miejscu w przestrzeni i w pojedynczym momencie czasu. Kropla farby Moneta na płótnie stanowi zdarzenie; charakteryzuje ją położenie i czas, w którym ono zachodzi. Opracowana przez Einsteina teoria mówi nam, jak powinniśmy mierzyć odległość między zdarzeniami i jak myśleć o ich wspólnym związku. To jest teoria przestrzeni i czasu.

Czym jest czas? Codzienne doświadczenie mówi nam, że czas jest czymś, co przemija, a co mierzy się tykaniem zegara. Jeżeli wszyscy zsynchronizują swoje zegarki, a każdy z nich będzie mechanicznie idealny, powinniśmy oczekiwać, że na zawsze wszyscy będą się zgadzali co do upływającego czasu. Istniejemy w teraźniejszości i z łatwością definiujemy obecny moment słowem „teraz”. Skoro wszyscy zgadzamy się w tej kwestii, to wszyscy musimy się też zgadzać w kwestii tego, co znaczy słowo „teraz”. Oznacza to, że przeszłość już minęła, znikając w pamięci, tak jak płótno bieleje z wiekiem, a przyszłość jeszcze jest przed nami.

Czym jest przestrzeń? Przestrzeń odbieramy jako arenę, na której dokonują się wydarzenia; potężne pudło zawierające Ziemię, Księżyc, Słońce, planety i gwiazdy. Dwoje ludzi może zmierzyć odległość w przestrzeni między Ziemią a Księżycem o godzinie ustalonej za pomocą idealnie zsynchronizowanych zegarków, z idealnie skalibrowanymi wskazówkami i ich pomiary będą się zgadzały.

OTO MAM
NIEWIELE
PONAD
STARE WINO
I WSPOMNIENIA

WUJEK MONTY, *WITHNAIL I JA*, CAMDEN, 1987

W tym rozdziale podążymy za Einsteinem, odkrywając, że oczywiste stwierdzenia zawarte w dwóch poprzednich akapitach są nieprawdziwe: odkryjemy, że czas i przestrzeń nie są tym, czym się wydają. To doprowadzi nas do rozważenia zdumiewającej możliwości, że magiczny letni dzień Moneta może istnieć także poza jego starzejącym się płótnem. Jak pisał wielki fizyk i matematyk Hermann Weyl: „Obiektywny świat po prostu jest, ale się nie zdarza. Tylko dla wzroku mojej świadomości, czołgając się wzdłuż linii życia mojego ciała, część tego świata staje się żywa poprzez obraz w przestrzeni, który bezustannie zmienia się w czasie”.

Musimy jednak zacząć od początku i pomyśleć dokładnie, w jaki sposób idee takie jak odległości w przestrzeni i odstępy w czasie traktowane są w fizyce. Pierwsze kroki w kierunku współczesnego rozumienia czasu i przestrzeni były pierwszymi krokami wzdłuż drogi wiodącej do współczesnej nauki jako takiej. Nasza historia rozpoczyna się w XVII wieku od Galileusza, Newtona i systematycznych badań ruchu planet oraz miejsca Ziemi w Układzie Słonecznym.

Życie na rotującej, orbitującej planecie

Badanie ruchu ma długą i kontrowersyjną historię sięgającą kilka tysięcy lat wstecz. Na pierwszy rzut oka trudno sobie wyobrazić, że badania ruchu mogą być kontrowersyjne; przecież wydaje się on tak podstawową kwestią. Źródłem kontrowersji był po części fakt, że żyjemy na rotującej planecie, która mknie po orbicie wokół Słońca. To stwierdzenie było problematyczne w czasach Newtona, po części z dobrze znanych teologicznych powodów, ale także dlatego, że nikt nie odczuwał tego ruchu. Zdrowy rozsądek informuje nas, że stoimy w miejscu, a zdrowy rozsądek typu „Może i nie wiem zbyt dużo o nauce, ale wiem, co myślę i czuję” ma naprawdę negatywny wpływ na dyskurs publiczny nawet w XXI wieku – a co dopiero mówić o wieku XVII. Gdyby uczucie tego, że stoimy nieruchomo w centrum Wszechświata, na nieruchomej planecie, było wiarygodne, Galileusz i wielu innych zaoszczędziliby sobie naprawdę sporo kłopotów.

Czasami dzieje się tak, że zachwycające idee wsiąkają tak mocno w kulturę, iż przestają być zachwycające po prostu dlatego, że wydają się oczywiste. Ruch Ziemi wokół Słońca i sama skryta brutalność dynamiki nieba, którą Natura stara się przed nami ukryć, są doskonałymi przykładami tego paradoksu. Większość z nas nie myśli zbyt wiele o tym, co się dzieje z ziemią pod naszymi stopami, ponieważ zostaliśmy nauczeni radzić sobie z trudnymi ideami, po prostu intelektualnie je porzucając. Wyedukowana osoba prawdopodobnie wie, że chodzimy po powierzchni sfery o obwodzie równym na równiku około 40 000 kilometrów i masie 6 tysięcy milionów milionów milionów ton, rotującej wokół ekstrawagancko nachylonej osi w tempie 24 godzin na jeden obrót. Co więcej, ten potężny rotujący obiekt toczy się wokół Słońca z prędkością bliską 30 kilometrów na sekundę, pokonując co roku 940 milionów kilometrów. Taka osoba prawdopodobnie nie widzi nic zachwycającego w tym, że nie zauważamy tego na co dzień. To zdumiewające.

Powód, dla którego tego nie zauważamy, jest fundamentalny i aby w pełni go docenić, musimy dokładnie zbadać, co mamy na myśli, mówiąc o ruchu. Przed XVII wiekiem

powszechnie uważano, że obiekty poruszają się, gdy się je popchnie, i stoją w miejscu, gdy pozostawi się je samym sobie. Arystotelesowi zazwyczaj przypisuje się wyrażenie tego intuicyjnego poglądu, że wszystko, co się dzieje, musi mieć swoją przyczynę. Skoro zatem ruch jest czymś, co się dzieje, obejmuje zmianę położenia obiektu w jakimś przedziale czasu, musi mieć jakąś przyczynę. Po usunięciu przyczyny ruch powinien ustać. Intuicyjnie jest to rozsądne twierdzenie, ale nieprawidłowe.

Prawdą jest, że jeżeli popchniesz obiekt stojący na stole, zacznie się on poruszać, a gdy przestaniesz go popychać, obiekt się zatrzyma. Powodem jest jednak tarcie pomiędzy obiektem a stołem, a więc to stół zatrzymuje obiekt. Gdyby usunąć tarcie i popchnąć obiekt, będzie się on poruszał do momentu ponownego popchnięcia. To zasada bezwładności, która jest naprawdę niesamowita, gdy o niej pomyśleć.

Nieźrównany laureat Nagrody Nobla, fizyk Richard Feynman opisywał kiedyś, jak jego ojciec tłumaczył mu koncepcję bezwładności, gdy zauważył coś podczas zabawy wagonikiem dziecięcej kolejki i piłką.

– Wiesz tato, coś zauważyłem. Gdy ciągnę wózek, piłka toczy się do tyłu. A gdy ciągnę i nagle przestaję, to piłka toczy się do przodu. Dlaczego tak jest?

– Tego nikt nie wie – odparł ojciec. – Ogólna zasada jest taka, że przedmioty, które są w ruchu, zwykle poruszają się dalej, a te, które są nieruchome, pozostają nieruchome, chyba że je silnie popchniesz. To zjawisko nazywa się bezwładnością, ale nikt nie wie, dlaczego tak jest.

I to jest właśnie zrozumienie istoty rzeczy. Podał mi nie tylko samą nazwę zjawiska.

Lubię ten fragment, bo ilustruje on coś bardzo ważnego. Istnieją takie pytania o Naturę, na które odpowiedź brzmi: „bo tak już jest we Wszechświecie”. Muszą istnieć takie odpowiedzi, ponieważ nawet gdybyśmy wiedzieli, jak sprowadzić wszystkie prawa Natury do podstawowych zasad, wciąż musielibyśmy znać te zasady. Według naszej wiedzy prawo bezwładności wyrażone przez ojca Richarda Feynmana to jedna z takich zasad. Jedną z najtrudniejszych rzeczy we współczesnej fizyce jest odkrycie, które właściwości Wszechświata są naprawdę fundamentalne, a za którymi kryją się głębsze zasady lub prawa. Niniejsza książka w całości poświęcona jest zadawaniu pytania „Dlaczego?”. Czasami odpowiedź to: „bo tak już jest”. Może to być niepoprawna odpowiedź – czasami za czymś może stać jeszcze głębszy powód, którego dotąd nie odkryliśmy, ale z pewnością nie jest to powierzchowna odpowiedź.

Isaac Newton wyraził zasadę bezwładności w pierwszym ze swoich trzech praw ruchu, które opublikował w 1687 roku w pracy *Principia Mathematica*. Praktycznie każdy może je dzisiaj przytoczyć co do słowa, a przynajmniej pamięta, że kiedyś w szkole potrafił: „Jeśli na ciało nie działa żadna siła lub siły działające równoważą się, to ciało pozostaje w spoczynku lub porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym”.

Mamy tu do czynienia z pewną subtelnością. Jeżeli mówimy, że obiekt się porusza, musimy odpowiedzieć na pytanie: „względem czego ten obiekt się porusza?”. Newton z pewnością zastanawiał się nad tym pytaniem i prawie doszedł do właściwej odpowiedzi. Jego prace na

ten temat są pouczające i zmierzają do serca pytań o naturę przestrzeni i czasu oraz ich związku z ruchem. Newton jasno wyraził założenia stojące za tymi prawami.

„Absolutny, prawdziwy i matematyczny czas sam z siebie i ze swej wewnętrznej natury płynie jednakowo, bez związku z czymkolwiek zewnętrznym...”

To intuicyjny pogląd, że czas upływa, i każdy zgadza się co do tempa, w jakim ten czas upływa.

„Absolutna przestrzeń, w swojej własnej naturze, bez związku z czymkolwiek zewnętrznym, pozostaje zawsze podobna i nieruchoma (...). Absolutny ruch stanowi przemieszczenie ciała z jednego absolutnego miejsca w inne”.

To założenie Newtona mówiące, że istnieje swego rodzaju gigantyczne pudło, w którym wszystko się wydarza. Możemy pójść nawet trochę dalej i wyobrazić sobie serię linii przecinających pudło, na których jesteśmy w stanie określać położenie obiektów we Wszechświecie. Następnie moglibyśmy zdefiniować ruch absolutny jako ruch względem tej uniwersalnej siatki, która według naszych założeń pozostaje absolutnie nieruchoma w absolutnej przestrzeni. Ta gigantyczna siatka stanowi przykład tego, co nazywamy układem odniesienia. Aby zdefiniować ruch absolutny, Newton zakłada istnienie bardzo szczególnego układu odniesienia: układu odnoszącego się do tej uniwersalnej siatki będącej w spoczynku względem przestrzeni absolutnej, stosunku do której mierzony jest wszelki ruch.

Następnie Newton wspomniał zauważyć jeszcze jeden fakt:

(...) ale ruch i spoczynek, w popularnym znaczeniu tego terminu, są rozróżnialne od siebie tylko przez punkt widzenia, a ciała powszechnie uważane za pozostające w spoczynku nie zawsze naprawdę pozostają w spoczynku.

Newton mówi tutaj, że niemożliwe jest określenie, czy obiekt „rzeczywiście” znajduje się w ruchu w linii prostej, czy „rzeczywiście” jest nieruchomy. Możemy nie być „naprawdę nieruchomi”, jak to mówi, ale nie możemy tego stwierdzić. To jest właśnie powód, dlaczego nie czujemy, że poruszamy się wokół Słońca, gdy stoimy na powierzchni Ziemi; w skali minutowej przemieszczamy się z niemal stałą prędkością i niemal w linii prostej. Newton miał rację, gdy zauważył, że jeżeli tak jest, to nie będziemy odczuwać żadnego ruchu; faktycznie, możemy twierdzić, że pozostajemy w bezruchu, mimo iż możemy nie być – jak to mawiał – „naprawdę nieruchomi”.

Zróbmy tutaj wyraźnie filozoficzną uwagę na marginesie, która ma niezwykle ważne konsekwencje dla rozwiniętej przez Einsteina teorii względności. Skoro niemożliwe jest ustalenie, czy się poruszamy, nawet zasadniczo, to do czego potrzebna jest przestrzeń absolutna? Czy rzeczywiście nie ma żadnego szczególnego układu odniesienia, względem którego można badać cały ruch? Czy nie powinniśmy całkowicie odrzucić tej idei? Tak, właśnie tak powinniśmy zrobić, ale Newton nigdy tego nie uczynił. Wspaniałą rzeczą jest to, że jego prawa ruchu dotyczą tylko ruchu względnego, a nie polegają na jego założeniu o istnieniu szczególnego układu odniesienia, względem którego można skalibrować wszelki ruch. Udało mu się stworzyć prawidłowe równania, lecz potem ich interpretację obudował

niepotrzebnym filozoficznym багаżem przestrzeni absolutnej. Może się to wydawać zbędną pedantycznością bez znaczenia, ale nią nie jest. Zbyteczna, lecz pocieszająca myśl, że przestrzeń jest stałą areną, na której „dzieją się rzeczy”, pozytywnie szkodzi naszemu rozumieniu Natury. Odrzucenie jej pozwoliło Einsteinowi na stworzenie zupełnie nowej teorii przestrzeni i czasu, która dostarcza nam właściwszego opisu świata naturalnego niż prawa Newtona.

Nie oznacza to, że chcemy odrzucić koncepcję układu odniesienia – nic podobnego! Uświadomiłem sobie coś na temat fizyki podczas wielu lat prób zrozumienia jej na własny użytek oraz tłumaczenia jej innym. Prawdziwie głębokie idee często brzmią jak przesadna pedanteria. To jedno z nielicznych podobieństw między fizyką i filozofią. Nasz szczegółowy wstęp do idei układów odniesienia jest tutaj dobrym przykładem; może się wydawać, że byliśmy nawet zbyt szczegółowi, ale będziemy musieli uważać, jeżeli chcemy zrozumieć te tajemnicze uwagi, które dotąd czyniliśmy o szczególnej teorii względności Einsteina. Mając to na względzie, zrobmy krótką przerwę, aby dokładniej przyjrzeć się układom odniesienia. Wysiłek będzie tego wart.

Ważna uwaga: układy odniesienia

Możemy wyobrazić sobie umieszczenie linii siatki rozciągającej się w całym Wszechświecie, tak jak robił to Newton. Położenie obiektów można wtedy określać w odniesieniu do siatki. Ta siatka stanowi układ odniesienia.

Układy odniesienia to nie tylko przecinające się zestawy linii prostych. Musimy także mierzyć czas. Wyobraźmy sobie zatem sieć identycznych zegarów rozmieszczonych w całym Wszechświecie. Wszystkie zegarki mają stałe położenie względem siatki. Teraz możemy zmierzyć, gdzie i kiedy doszło do zdarzenia; doszło do niego w jakimś miejscu w przestrzeni (wykorzystajmy siatkę do precyzyjnego określenia miejsca) i w jakimś określonym momencie (wykorzystajmy zegar w pobliżu miejsca zdarzenia do precyzyjnego określenia czasu).

Nie będzie przesadą stwierdzenie, że całą fizykę można zredukować do zrozumienia związków między zdarzeniami. Właśnie dlatego staramy się ustalić ramy (i to dosłownie), które wykorzystamy do zapisania położenia zdarzeń w przestrzeni i czasie. Ostrożność jest tutaj niezbędna: musimy bardzo dokładnie określić, w jaki sposób będziemy mierzyć czas zajścia zdarzenia.

Aby zilustrować dlaczego, rozważmy konkretne zdarzenie: eksplozję fajerwerku. Moment eksplozji to czas zarejestrowany na zegarze umieszczonym obok fajerwerku podczas eksplozji. Różni się on od czasu zmierzonego przez kogoś obserwującego zdarzenie z bezpiecznej odległości, ponieważ błysk fajerwerku potrzebuje niewielkiej ilości czasu, aby dotrzeć do obserwującej go osoby. Światło pokonuje odległość jednej stopy w czasie jednej nanosekundy lub 30,48 centymetra w jednej miliardowej części sekundy, dla miłośników systemu metrycznego. Zawsze uważałem, że jeżeli istnieje stwórca, to operuje On w jednostkach imperialnych. Innym sposobem docenienia, dlaczego musimy być ostrożni, jest

fakt, że nie możemy robić żadnych założeń co do tempa, w jakim tykają zegary. Powiedzieliśmy już wcześniej, że są to identyczne zegary, więc można by pomyśleć, że beztrąsko tykają dokładnie tak samo. Ale to byłoby założenie, co odkrywamy nieco później, po prostu błędne. Dlatego też musimy jasno i precyzyjnie zdefiniować, w jaki sposób powinniśmy mierzyć czas.

Układ odniesienia to także jeden ze sposobów określania naszego punktu widzenia; naszej perspektywy we Wszechświecie. Mamy prawo stworzyć swój własny układ odniesienia, a ktoś inny ma prawo stworzyć swój własny. Ogólnie rzecz biorąc, dowolne dwa układy odniesienia mogą poruszać się względem siebie (wyobraź sobie jedną siatkę linii i zegarów przesuwającą się względem drugiej siatki linii i zegarów). Zakres możliwych układów odniesienia jest nieograniczony, jednak w swojej szczególnej teorii względności Einstein wyróżnił szczególny zestaw układów odniesienia. A dokładnie: wprowadził ideę „inercyjnego układu odniesienia”.

Pozostajesz w spoczynku w inercyjnym układzie, jeżeli obserwujesz, że wyizolowany obiekt albo znajduje się w spoczynku, albo porusza się w linii prostej ze stałą prędkością. Układy rotujące, takie jak układ, w którym aktualnie się znajdujesz na rotującej Ziemi, nie są układami inercyjnymi. Wiele rzeczy, które uważamy za oczywiste w naszym życiu, od zachowania układów burzowych do następowania przyprawów i odpływów, jest wynikiem tego, że Ziemia rotuje, a zatem nie znajdujemy się w inercyjnym układzie odniesienia, nawet jeżeli tak nam się wydaje. Zobaczmy, dlaczego tak jest, kiedy przyjrzymy się fałom oceanicznym i zachowaniom układów burzowych.

Jak już wspominaliśmy, nie ma żadnego „szczególnego” inercyjnego układu odniesienia; wszystkie inercyjne układy odniesienia są równie dobre. Jeżeli znajdujesz się w inercyjnym układzie odniesienia, możesz powiedzieć, że stoisz nieruchomo, i nie ma możliwości wykonania żadnego pomiaru, który by temu zaprzeczył. Ponieważ tkwimy w inercyjnym układzie odniesienia na powierzchni Ziemi, nie czujemy, abyśmy się gdziekolwiek przemieszczali z czasem.

Einstein wprowadził wymóg, aby wszystkie układy inercyjne były równe fundamentalnej zasadzie. Oznacza to, że identyczne eksperymenty przeprowadzone w różnych układach inercyjnych powinny zawsze dawać takie same wyniki. Inaczej mówiąc, prawa Natury nie zmieniają się, gdy zmieniamy nasz punkt obserwacji z jednego układu inercyjnego na drugi; gdyby się zmieniały, moglibyśmy stwierdzić różnice między układami inercyjnymi! Nie chciałbym zepsuć zabawy już na początku rozdziału, ale ta ostateczna demokracja między układami inercyjnymi okazuje się tak silnym ograniczeniem praw Natury, że prawa Newtona oraz prawa elektryczności i magnetyzmu nie mogą być prawdziwe. Być może nie wydaje się to zbyt poważne, ale zobaczymy w rozdziale zatytułowanym *Kolor*, że prawa elektryczności i magnetyzmu są jednym z wielkich filarów fizyki, na równi z prawami Newtona. Opisują tak wiele rzeczy, które przyjmujemy za oczywiste w codziennym życiu: działanie generatorów i silników elektrycznych, powstawanie tęczy, funkcjonowanie soczewek, włókien optycznych dostarczających Internet do twojego domu, a gdy połączymy je z teorią kwantową – strukturę atomów i cząsteczek; ta lista praktycznie się nie kończy. Wydaje się niepojęte, że układ

odniesienia, który wykorzystujemy do opisanie jednej z czterech fundamentalnych sił Natury, może być niekompatybilny z teoretycznym układem, który wykorzystujemy do opisanie ruchu. To właśnie ten konflikt zmotywował Einsteina do opracowania nowej teorii przestrzeni i czasu. Dojdziemy do tego. Na razie zbadajmy ideę opisywania świata z różnych punktów widzenia, czyli inaczej mówiąc – za pomocą różnych układów odniesienia. To pozwoli nam zrozumieć przemijanie pór roku, rotację układów burzowych oraz pływy oceaniczne.

Życie na orbitującej planecie

Pory roku

Przemijanie pór roku to łagodne doświadczenie o potężnym wydźwięku. Mógłbym wyrecytować słowa hymnów wyuczonych na pamięć kilka dekad temu, a czczących wspaniały cykl życia na Północy: „W środku mrocznej zimy mroźny wiatr wył. Ziemia twarda niczym żelazo, woda niczym kamień”. Kilka ponadczasowych głosów snuje się w ciemnej głębi zimowego śniegu pomalowanego żółtawym światłem wpadającym przez zaplamione szkło. „Orzemy pola i rozrzucamy na ziemi dobre ziarna”. Cichy jesienny las we wrześniu, wyblakła zieleń okraszona czerwienią poziomek. Zmiany zachodzące z dnia na dzień są łagodne, poczerwienienie liści i ochładzanie strumieni – delikatne, ale te sezonowe przekształcenia skrywają zdumiewającą niebiańską gwałtowność.

Uwielbiam proste pytania; pozwalają one naprawdę wiele się dowiedzieć, jeżeli nie zostaną potraktowane zbyt lekko. Są także pułapkami dla zbyt pewnych siebie. Naukowcy często opisywani są jako osoby mające naturę dziecka, gdy zastanawiają się nad Naturą, co ja odbieram jako stwierdzenie, że naukowcy nie zbywają pytań, które wydają się posiadać oczywistą odpowiedź, bez uprzedniego sprawdzenia, czy oczywista odpowiedź faktycznie ma treść i znaczenie. Być może dzieci mają lepiej rozwinięty zmysł uczciwości intelektualnej. Odpowiedzią na pytanie „Dlaczego mamy pory roku?” może być powierzchowne: „ponieważ Ziemia krąży wokół Słońca”. Ale co utrzymuje Ziemię na orbicie wokół Słońca? To pytanie również można zbyć prostą odpowiedzią: grawitacja. Jednak grawitacja to siła działająca między Ziemią i Słońcem, przyciągając je do siebie, dlaczego zatem Ziemia krąży wokół Słońca zamiast po prostu na nie spaść? To już jest głębsze pytanie.

Pory roku oczywiście mają coś wspólnego z krążeniem Ziemi wokół Słońca, które z kolei ma coś wspólnego z grawitacją. Newton jako pierwszy zapisał matematyczny model siły grawitacji. Opublikował go w 1687 roku w *Principia Mathematica*, razem z prawami ruchu. Prawo powszechnego ciążenia Newtona mówi, że istnieje siła przyciągania między wszystkimi obiektami posiadającymi masę, która jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości między nimi.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Pierwszą rzeczą, którą należy zauważyć, jest fakt, że siła grawitacji działa bezpośrednio wzdłuż linii łączącej środki Ziemi i Słońca, przyciągając je do siebie. Drugie prawo ruchu Newtona możesz pamiętać ze szkoły. Zazwyczaj zapisuje się je w postaci równania:

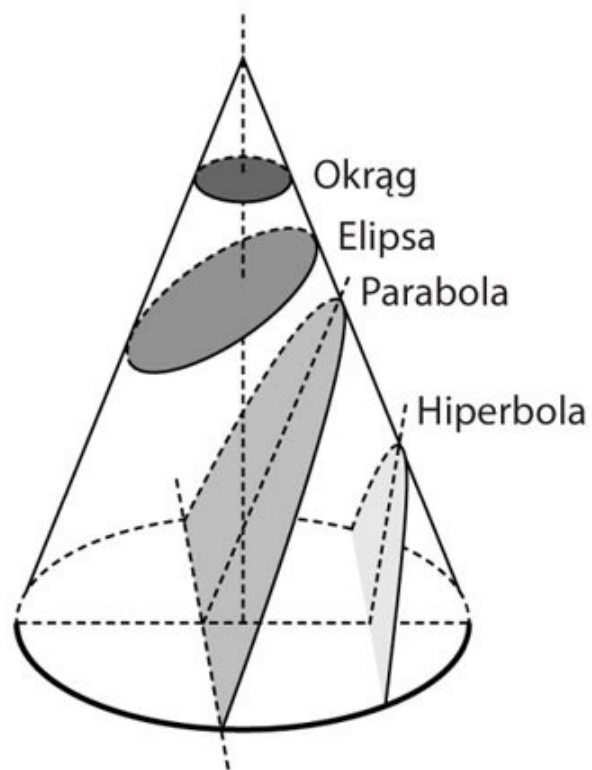
$$F = ma$$

Mówi ono, że obiekt będzie przyspieszał w kierunku, w którym działa siła, a przyspieszenie jest proporcjonalne do wartości siły oraz masy obiektu. To intuicyjnie oczywiste; jeżeli chcesz nadać przyspieszenie autobusowi, musisz go mocniej popchnąć, niż gdybyś chciał nadać przyspieszenie wózkowi na zakupy. Siła grawitacji zatem przyspiesza Ziemię prosto w kierunku Słońca. Stwierdzenie to wydaje się wskazywać, że z czasem Słońce i Ziemia powinny się do siebie zbliżać, a przecież tak się nie dzieje. Dlaczego? Ziemia również musi przestrzegać pierwszego prawa ruchu – prawa bezwładności; jeżeli nie działa na nią żadna siła, bez końca będzie poruszała się w linii prostej. Jeżeli Słońce znajduje się w pobliżu, siła grawitacji będzie działała wzdłuż linii łączącej środek Słońca ze środkiem Ziemi. Skoro $F = ma$, spowoduje to odchylenie Ziemi z jej prostej linii tak, aby przyspieszała w kierunku Słońca zgodnie z kierunkiem działającej na nią siły. Aczkolwiek będzie kontynuowała swój ruch ku „linii prostej”, ponieważ żadne siły nie działają na nią w tym kierunku. Ziemia zatem przyspiesza w kierunku Słońca, ale także porusza się w kierunku odchylonym o kąt prosty względem tego przyspieszenia. Dzięki temu Słońce pozostaje na orbicie wokół Słońca na zawsze. Można więc powiedzieć, że Ziemia bezustannie spada w kierunku Słońca, ale bezustannie je mija, gdyż ma także prędkość skierowaną pod kątem prostym względem siły, która sprawia, że spada na Słońce.

W analizie orbit kryje się mnóstwo pięknej subtelności. Newton odkrył rodzinę wszystkich ścieżek, którymi obiekty będą podążać pod wpływem siły proporcjonalnej do kwadratu odległości między nimi. Owe krzywe są znane jako krzywe stożkowe, ponieważ odpowiadają one kształtom, które otrzymamy po przekrojeniu stożka pod różnymi kątami (zob. ilustracja na następnej stronie).

Czy to nie piękne? Być może teraz zauważysz, że orbita kołowa to bardzo szczególny przypadek – istnieje ona tylko wtedy, gdy stożek przetniemy w płaszczyźnie równoległej do podstawy stożka. W przypadku kąta ostrego orbity są eliptyczne, a pod większymi kątami otrzymujemy orbity paraboliczne lub hiperboliczne.

Orbita Ziemi wokół Słońca jest elipsą. Największe zbliżenie, znane jako peryhelium, zachodzi blisko początku roku kalendarzowego w okolicach 3 stycznia, gdy Ziemia znajduje się 147 milionów kilometrów od Słońca. Sześć miesięcy później nasza orbita zabiera nas 5 milionów kilometrów dalej od Słońca. Najodleglejszy punkt orbity, znany jako aphelium, Ziemia osiąga w okolicach 3 lipca. Konkretnie szczegóły orbity – kąt przecięcia stożka – określane są przez to, co fizycy nazywają warunkami początkowymi. Nasz opis ruchu Ziemi podzieliliśmy na dwie części: ruch Ziemi w linii prostej bez Słońca oraz odchylenie spowodowane przez siłę grawitacyjną, jeżeli gdzieś w pobliżu umieścimy Słońce. Ale przecież nic takiego nie zaszło! Jednak w tym teoretycznym przykładzie warunkami początkowymi byłyby początkowa prędkość Ziemi względem Słońca, względne położenia Ziemi i Słońca, gdy pojawiło się Słońce, oraz masa Słońca.

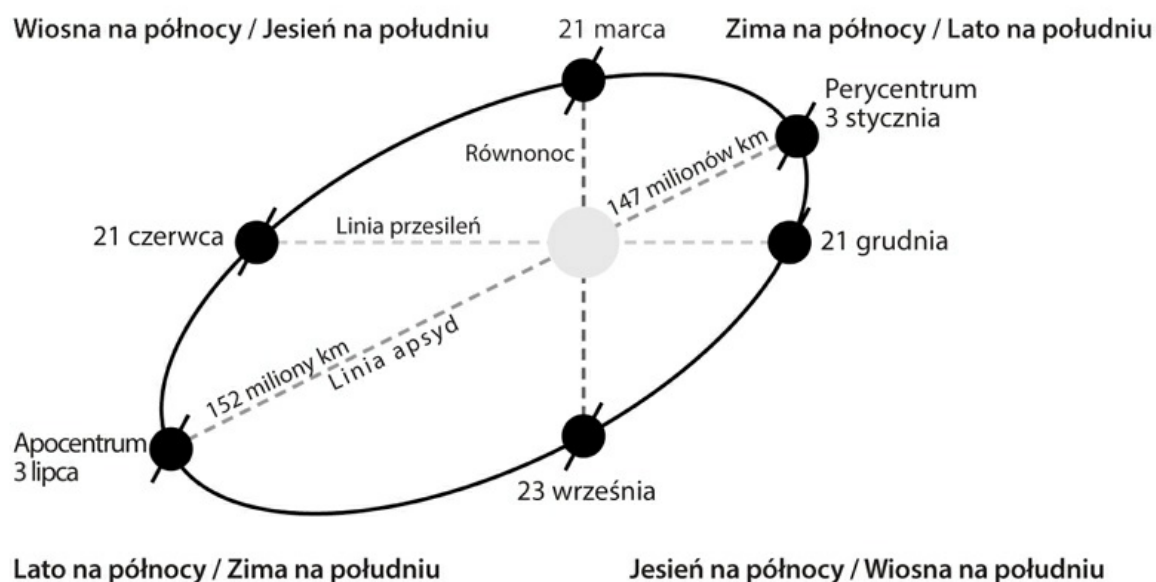


Krzywa stożkowa to krzywa powstała wskutek przecięcia płaszczyzną powierzchni stożkowej, której kierującą jest okrąg. Cztery podstawowe krzywe stożkowe to okrąg, elipsa, parabola i hiperbola, zależnie od kąta przecięcia.

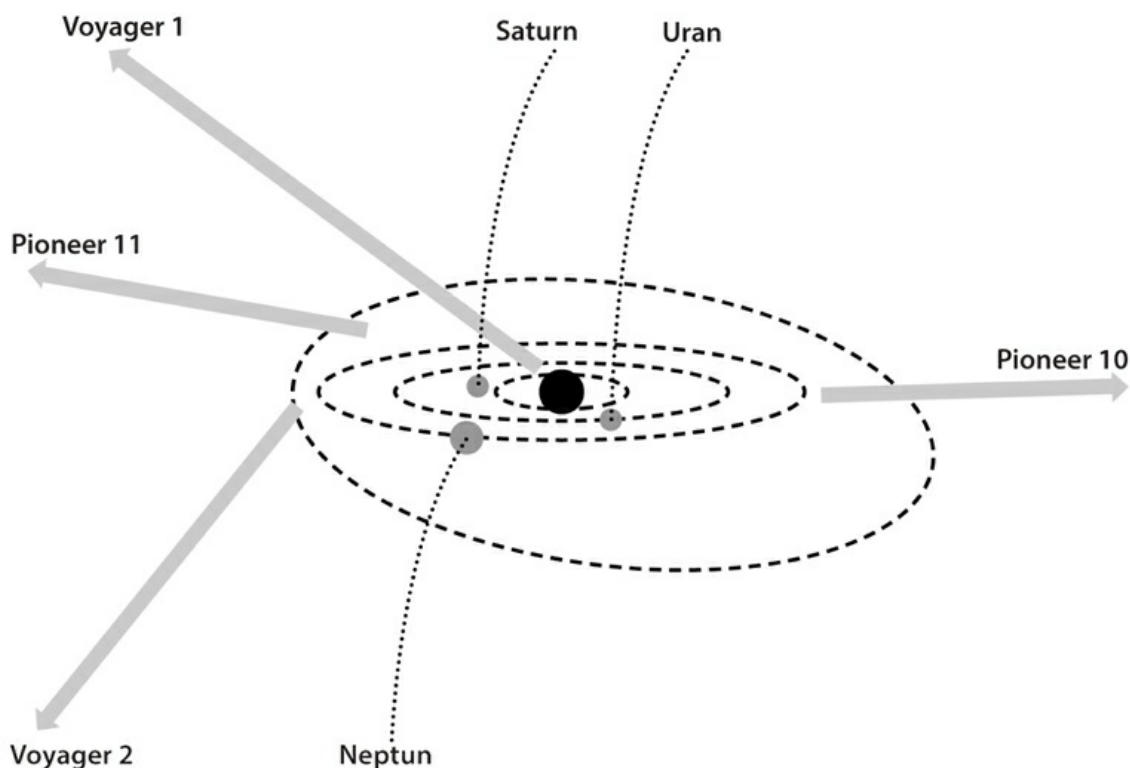
ZMIANY ZACHODZĄCE
Z DNIA NA DZIEŃ SĄ
ŁAGODNE, POCZERWIENIENIE
LIŚCI I OCHŁADZANIE
STRUMIENI – DELIKATNE,
ALE TE SEZONOWE
PRZEKSZTAŁCENIA
SKRYWAJĄ ZDUMIEWAJĄCĄ
NIEBIAŃSKĄ GWAŁTOWNOŚĆ.

Czy już widzisz, dlaczego szczegóły orbity nie zawierają masy Ziemi? To zadanie dla zainteresowanego czytelnika. Wszystkie planety poruszają się po orbitach eliptycznych. Niektóre komety poruszają się po orbitach parabolicznych lub hiperbolicznych, co oznacza, że odwiedzają wnętrze Układu Słonecznego tylko raz, a następnie uciekają w przestrzeń kosmiczną. Kometa Halleya porusza się po orbicie eliptycznej, w przeciwnym razie nie powracałaby co 76 lat. Zbudowaliśmy pięć sond, które poruszają się po trajektoriach hiperbolicznych od Słońca, co oznacza, że uciekną w przestrzeń międzygwiazdową i nigdy nie powrócą. Są to: Pioneer 10 i 11, Voyager 1 i 2 oraz New Horizons. Wszystkie te różne ścieżki są konsekwencją prawa grawitacji i praw ruchu Newtona oraz określonych warunków początkowych, które zainicjowały cały ten ruch.

Orbita Ziemi po części tłumaczy łagodne zmiany pór roku. Aby zobaczyć, dlaczego nie jest to cała odpowiedź, rozważmy klimat w Tasiilaq, w południowo-wschodniej Grenlandii, jednym z miejsc, w których kręciliśmy serię *Siły Natury*. Tasiilaq to odizolowana osada znajdująca się około 100 kilometrów na południe od koła podbiegunowego. Dwa tysiące mieszkańców miasteczka doświadcza ekstremalnych zmian pogody. Rzadko kiedy jest tutaj ciepło, temperatury latem rosną do około 10 stopni Celsjusza w przeciętne lipcowe popołudnie. Zimy z kolei są srogie. Średnia wysoka temperatura w grudniu to -4 stopnie Celsjusza, ale regularnie zbliża się do -30 stopni Celsjusza. To jednak nic w porównaniu z północną Grenlandią, gdzie rejestrowano już temperatury -70 stopni Celsjusza. Porównajmy to z najniższą temperaturą kiedykolwiek zarejestrowaną na Ziemi, na Antarktydzie 10 sierpnia 2010 roku, gdzie odnotowano -93 stopnie Celsjusza. To się nazywa mróz.



Orbita Ziemi wokół Słońca jest elipsą, a Słońce znajduje się w jednym z jej ognisk. Oś rotacji Ziemi jest nachylona pod kątem 23,5 stopnia względem płaszczyzny jej orbity i właśnie to nachylenie odpowiada za pory roku.



Ta ilustracja przedstawia obecne położenie czterech sond, które opuszczają Układ Słoneczny po trajektoriach ucieczki – naszych pierwszych wysłanników do gwiazd. W tej skali najbliższa Słońcu gwiazda znajduje się około 100 metrów dalej, a Voyager 1 będzie potrzebował około 70 000 lat na pokonanie tej odległości (widok z 10 stopni nad płaszczyzną ekliptyki).

Zauważ, że zima jest najostrzejsza w Tasiilaq w styczniu, kiedy Ziemia znajduje się najbliżej Słońca, a najcieplejsza, gdy Ziemia jest najdalej od Słońca. Dzieje się tak, gdyż zima na półkuli północnej nie ma nic wspólnego z odległością między Ziemią a Słońcem; natomiast ma wiele wspólnego z osią rotacji Ziemi nachyloną pod kątem 23,5 stopnia względem płaszczyzny jej orbity wokół Słońca, jak przedstawiono na rysunku na poprzedniej stronie. W styczniu biegun północny i praktycznie cała Grenlandia skierowane są w stronę przeciwną do Słońca i doświadczają niemal bezustannej nocy. To dlatego jest tak zimno. Dlaczego oś Ziemi jest nachylona? Dobre pytanie.

Formowanie Ziemi i Księżyca

Cztery i pół miliarda lat temu, gdy uformowała się Ziemia, nie było Księżyca. Nasza planeta była nieprzyjazną, stopioną kulą skały krążącą wokół Słońca. Młody Układ Słoneczny był chaotycznym miejscem charakteryzującym się tłocznymi orbitami i częstymi kolizjami.

Dzisiaj Ziemia krąży po astronomicznej autostradzie praktycznie oczyszczonej z odłamków, co jest dobrą informacją, gdy przemieszczasz się z prędkością 30 kilometrów na sekundę. Oczyszczona orbita to jedna z trzech definicji używanych przez Międzynarodową Unię Astronomiczną (IAU) do klasyfikowania planet. Aby oczyścić swoją orbitę, Ziemia musiała przetrwać burzliwy okres kolizji i bliskich spotkań, gdy mniejsze ciała były albo wyrzucane z orbit, albo dodawane do masy planety wskutek zderzenia.

Nie wszystkie obiekty, które Ziemia spotykała jako młoda planeta, były małe. Naukowcy uważają, że w tych czasach wokół Słońca krążyło wiele protoplanet, tocząc się po zatłoczonych orbitach, a Ziemia doświadczyła wielu istotnych kolizji. Bezpośrednie dowody na te zderzenia z planetami dawno już zostały starte z powierzchni Ziemi, ale jedno szczególne pozostawiło niezatarty ślad.

Hipoteza Potężnego Zderzenia mówi, że 4,5 miliarda lat temu doszło do kolizji nowo powstałej Ziemi z planetą o rozmiarach Marsa. Doprowadziła ona do połączenia dwóch obiektów. Uderzająca w Ziemię planeta została nazwana Teja na cześć greckiej bogini, która wydała na świat Selenę, bogini księżyca. Naukowcy uwielbiają grecką mitologię, a w tym przypadku wybór patronki nie jest przypadkowy. Symulacje komputerowe wskazują, że kolizja doprowadziła do tego, iż duże ilości materiału zarówno z Tei, jak i Ziemi znalazły się na orbicie wokół uszkodzonej większej planety, a z czasem owe odłamki połączyły się pod wpływem grawitacji w Księżyc. Dowody wspierające tę teorię są silne, chociaż jak zawsze w nauce należy zachować zdrowy sceptycyzm. Bez sceptycyzmu nie ma mowy o postępie. Symulacje komputerowe z pewnością pasują do szczegółów spinu i orbity układu Ziemia-Księżyc, ale także mamy fizyczne dowody wspólnego pochodzenia układu w skałach księżycowych przywiezionych przez astronautów z misji Apollo. W szczególności obfitość izotopów tlenu ^{16}O , ^{17}O oraz ^{18}O w skałach księżycowych jest niemal identyczna jak ta na Ziemi. Dla tych, którzy potrzebują trochę powtórki wiedzy z chemii, izotopy to atomy tego samego pierwiastka chemicznego o różnej liczbie neutronów w jądrze. Najbardziej prawdopodobnym powodem tego podobieństwa jest fakt, że skały mają wspólne pochodzenie – kolizję 4,5 miliarda lat temu. Księżyc posiada również znacznie mniej żelaza w swoim jądrze niż Ziemia. To informacja zgodna z modelami komputerowymi opisującymi takie zderzenie. Aby uzyskać właściwe spiny i orbity, niezbędne jest zderzenie pod kątem, a przy takiej kolizji bogate w żelazo jądra zderzających się planet mają tendencję do zlewania się w jedno, pozostawiając pozbawione żelaza skały z warstw zewnętrznych, z których z czasem

formuje się księżyc.

Hipoteza Potężnego Zderzenia jest w stanie wytłumaczyć skład chemiczny Ziemi i Księżyca oraz szczegóły ich orbit i spinów. Oprócz tego tłumaczy pochodzenie osi rotacji Ziemi nachylonej o 23,5 stopnia względem płaszczyzny Układu Słonecznego, która z kolei odpowiada za pory roku (zob. s. 119). Dla mnie to zachwycające; niewiele jest pewników w nauce, ale założyłbym, że nie byłoby nas tutaj dzisiaj, gdyby oś rotacji Ziemi nie była nachylona. Księżyc prawdopodobnie powstał w zdarzeniu, które nachyliło oś obrotu Ziemi, a jej obecność stabilizuje orientację osi Ziemi, zaś rozsądny poziom stabilności w okresach geologicznych jest jednym z warunków ewolucji złożonego życia. Nie byłoby ludzi bez Księżyca; a co najmniej ewolucja podążyłaby inną ścieżką, bo przecież powiedzieć, że droga do powstania ludzkości była zawiła, to jak nic nie powiedzieć. W pewnym sensie jest to powierzchowna obserwacja. Istnieje olbrzymia liczba przypadkowych zdarzeń w naszej przeszłości, które mogły skończyć się inaczej, a zmiana któregośkolwiek z nich sprawiłaby, że nas by tu nie było. Nie powinniśmy wpadać w pułapkę przywiązywania szczególnej wagi do pojedynczych zdarzeń; pozostawimy to usypiającym narratorom słabych filmów dokumentalnych. Głębszym, niezaprzeczalnym faktem, na który warto zwrócić uwagę, jest to, iż mamy dużo szczęścia, że tu jesteśmy. Nasze istnienie nie może mieć jakiegoś większego znaczenia w kosmosie, bowiem zbytnio zależy od serii przypadkowych zdarzeń rozciągających się aż do okresu formowania Układu Słonecznego i jeszcze wcześniej. Czy fakt, że masz szczęście, że żyjesz, sprawia, że czujesz się bez znaczenia albo wartościowy? Pozostawię to tobie. W swoim eseju *Kilka myśli o ropusze zwyczajnej* George Orwell rozmyśla nad prostym i dostępnym dla każdego zachwytem z dostrzegania takich rzeczy jak przemijanie pór roku, i właśnie o tym jest ta książka: „Istotne jest, że przyjemności związane z wiosną dostępne są dla każdego i nic nie kosztują”, pisze. „Ileż to razy przystawałem, by poobserwować gody ropuch lub parę zajęców bijących się w młodej kukurydzy. Myślałem wtedy o wszystkich ważnych osobach, które pozbawiłyby mnie tej radości, gdyby mogły. Ale na szczęście nie mogą”.

„Bomby atomowe układane są w stosy w fabrykach, policja przemierza miasta, kłamstwa potokiem wylewają się z głośników, ale Ziemia wciąż krąży wokół Słońca i ani dyktatorzy, ani biurokraci, niezależnie od tego, jak się z tym nie zgadzają, nie są w stanie temu zapobiec”.

Nie potrzebujesz pozwolenia, aby zająć się nauką, aby myśleć bez założeń o tym, co Natura chce ci powiedzieć. Koniec końców Natura jest bardziej wiarygodnym przewodnikiem po prawdzie niż opinie tych wszystkich ludzi, którzy mogą się pochwalić niebywałym szczęściem.

CZY FAKT, ŻE MASZ
SZCZĘŚCIE, ŻE ŻYJESZ,
SPRAWIA, ŻE CZUJESZ
SIĘ BEZ ZNACZENIA
ALBO WARTOŚCIOWY?
POZOSTAWIĘ TO TOBIE.

Życie na orbitującej planecie

Burze

Przemijanie pór roku jest łagodnym przypomnieniem, że żyjemy na planecie krążącej po orbicie wokół Słońca. Choć poruszamy się na orbicie z prędkością bliską 30 km/s, nie możemy tego stwierdzić, bo w dużym przybliżeniu przemieszczamy się w linii prostej ze stałą prędkością, tak więc mamy wrażenie, że stoimy nieruchomo. To właśnie dlatego nie czujemy, że lecimy przez przestrzeń z ogromną prędkością na skalistej kuli. Ale jest tu jedno ważne zastrzeżenie: oprócz tego także rotujemy, bowiem Ziemia obraca się raz dziennie wokół swojej osi, a to ma konkretne fizyczne konsekwencje, których doświadczamy w skali godzin, a nie miesięcy.

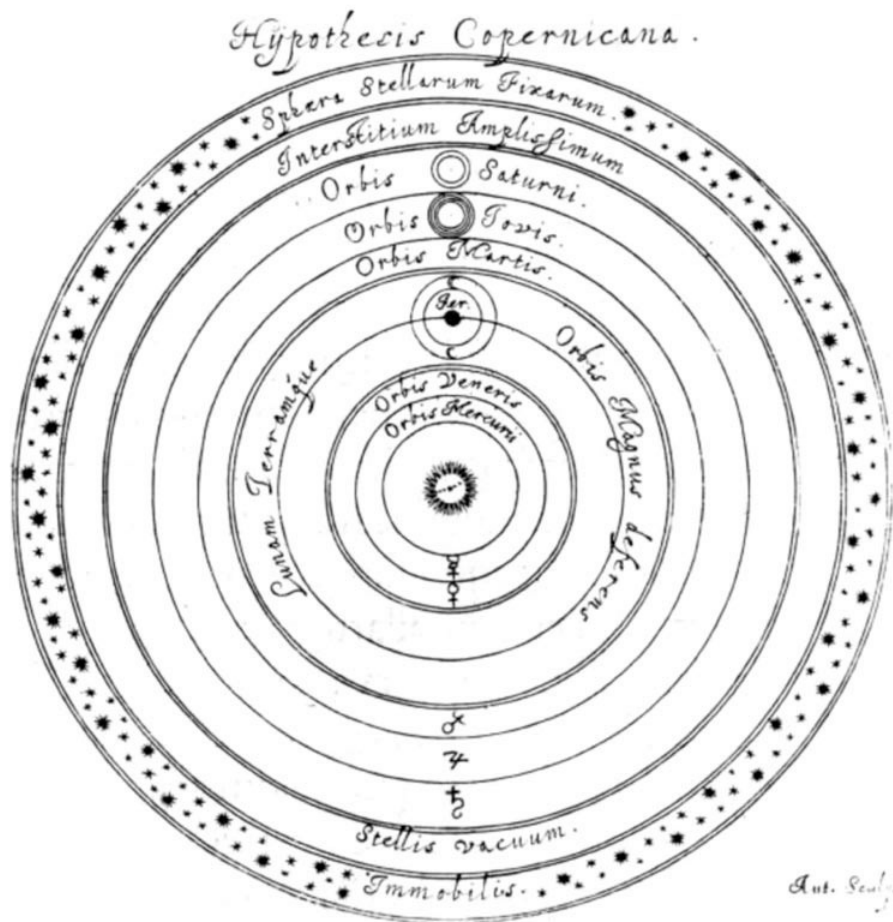
Skąd wiemy, że rotujemy?

Nie trzeba być szczególnie spostrzegawczym, aby zauważyć, że coś się kręci. Słońce wstaje na wschodzie i zachodzi na zachodzie, przemierzając niebo. Gdy Słońce zachodzi, gwiazdy podążają za nim. Oczywiście jest, że coś kulistego się tu dzieje.

Na podstawie dostępnych dowodów możemy wywnioskować dwie możliwości. Pierwsza i prawdopodobnie najbardziej naturalna mówi, że Ziemia jest nieruchoma, a Słońce i gwiazdy krążą wokół niej raz dziennie. Druga możliwość mówi, że to my rotujemy, a nie Słońce i gwiazdy. Kopernik opisał rotującą Ziemię poruszającą się po orbicie wokół nieruchomego Słońca w pracy *De revolutionibus* opublikowanej w 1543 roku. Jego główną motywacją był niesmak spowodowany nieeleganckim wytłumaczeniem obserwowanego ruchu planet względem gwiazd stworzonym przez greckiego astronoma Ptolemeusza w II wieku. Obserwowane na przestrzeni miesięcy planety nie zakreślają ładnych, kołowych łuków na niebie. Od czasu do czasu zakreślają pętle, odwracając kierunek swojego ruchu względem gwiazdnego tła. Teraz wiemy, że dzieje się tak, gdy Ziemia wyprzedza planetę, poruszając się po orbicie wokół Słońca. Jeżeli nie przyjmujesz do wiadomości, że Ziemia krąży po orbicie, musisz wymyślić jakiś inny mechanizm tłumaczący pętle zakreślane przez planety, a model z Ziemią w centrum proponowany przez Ptolemeusza, choć prawidłowo przewiduje ruch planet, jest niesamowicie zagmatwany. Z drugiej strony, jeżeli przyjmujesz, że Ziemia porusza się wokół Słońca, musisz także znaleźć wytłumaczenie na istnienie dnia i nocy, które jest niezależne od rocznego ruchu Ziemi po orbicie wokół Słońca. To właśnie dlatego Kopernik zaproponował teorię, że Ziemia rotuje wokół własnej osi w tempie jednego obrotu na 24 godziny.

Model Kopernika nie przekonywał wielu astronomów i filozofów przyrody w jego czasach. Sporo można wyczytać z krytyki wyrażonej przez jednego z największych astronomów obserwacyjnych tej epoki, Tycho Brahe: „(...) taki szybki ruch nie może charakteryzować

Ziemi, ciała bardzo ciężkiego, gęstego i nieprzejrystego, a może należeć do samego nieba, którego forma i delikatna, stała materia lepiej nadają się do wiecznego ruchu, niezależnie od jego prędkości”.



Ta ilustracja stworzonego przez Kopernika układu heliocentrycznego przedstawia Słońce, orbity planet i firmament gwiazd stałych.

Tutaj ponownie widzimy, jak trudno było zaakceptować fakt, że żyjemy na poruszającej się planecie, skoro tak wyraźnie czujemy, iż stoimy w miejscu.

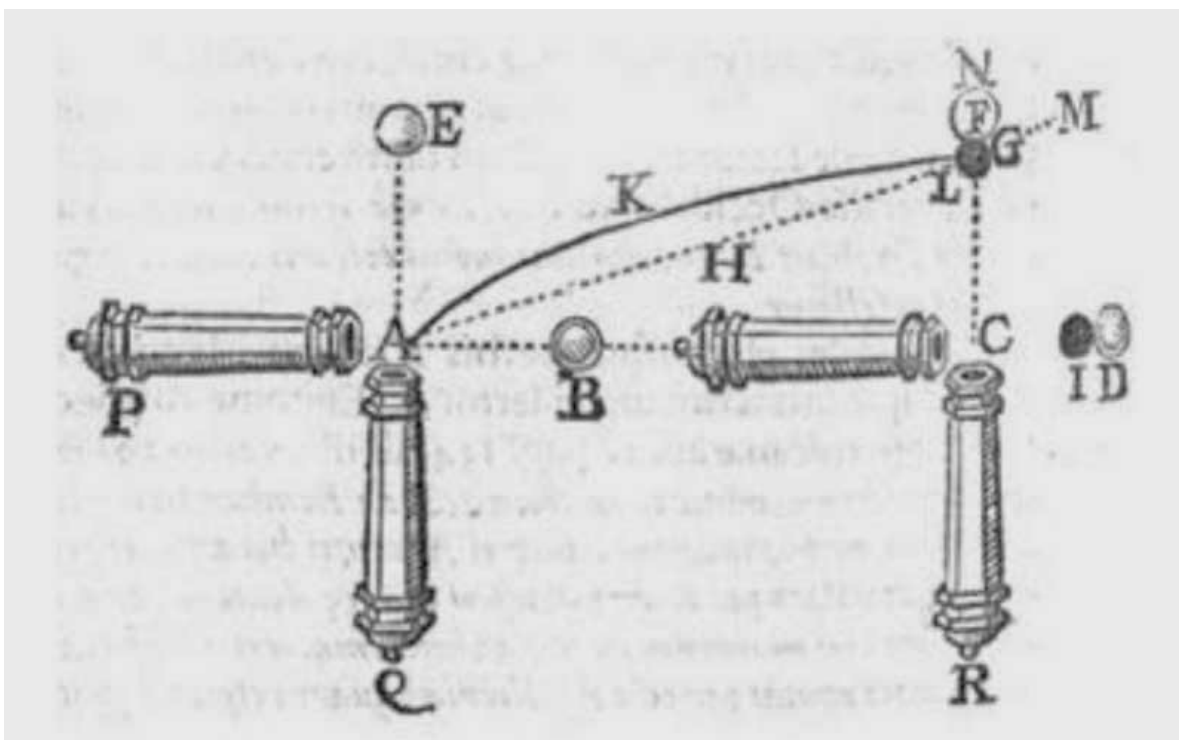
Prawie 150 lat po Koperniku włoski ksiądz i astronom Giovanni Riccioli wyraził bardziej naukowy sprzeciw wobec rotującej Ziemi Kopernika niż raczej filozoficzne oświadczenie, że to jakoś nie pasuje. Przeprowadził on piękną analizę ruchu pocisków na rotującej planecie w swojej *Almagestum Novum*, pracy opublikowanej w 1651 roku, gdy młody Isaac Newton miał zaledwie dziewięć lat. Riccioli zajął się wyłożeniem dowodów za i przeciw ruchowi Ziemi, które zawarł w formie 77 precyzyjnie skonstruowanych argumentów. Argument nr 18 to analiza ruchu kuli armatniej na rotującej planecie. Riccioli twierdził, że kula armatnia wystrzelona w kierunku północnym (na półkuli północnej) powinna poruszać się po ścieżce odkształconej przez rotację Ziemi. Opisał to tak:

Jeżeli kula zostanie wystrzelona wzdłuż południka w kierunku bieguna (a nie na wschód czy zachód), dzienny ruch sprawi, że kula zostanie zniesiona [to znaczy trajektoria lotu kuli zostanie odchylona], skoro wszystko jest równe: ponieważ równoległe do szerokości geograficznej w pobliżu biegunów, Ziemia porusza się wolniej, podczas gdy równoległe w pobliżu równika, Ziemia porusza się szybciej.

Riccioli nie mógł znaleźć żadnych eksperymentalnych dowodów, które pozwoliłyby mu wykazać, że kule armatnie są odchylane podczas lotu na północ, dlatego też doszedł do wniosku, iż Ziemia się nie obraca. Prawdopodobnie bardziej prawidłowo byłoby powiedzieć, że wzmocnił swoje przekonanie, iż Ziemia się nie obraca. Ale nie o to tutaj chodzi. Riccioli nie miał dostępu do wystarczająco dobrych danych, aby dostrzec wpływ rotacji Ziemi na lecącą kulę armatnią, która *jest* odchylana w locie właśnie z powodu obrotu Ziemi. Riccioli jednak nie ograniczył się do tego. Stwierdził, że ten sam efekt powinien być obserwowalny w przypadku obiektów spadających pionowo na ziemię – to punkt, który poetycko umieścił w argumencie nr 10 *Nowego Almagestu*:

Gdyby anioł opuścił metalową sferę o wielkiej wadze, zawieszoną na łańcuchu, trzymając jednocześnie drugi koniec łańcucha nieruchomo, łańcuch rozciągnąłby się na całą długość prostopadle do Ziemi. Jednak według Kopernika powinien się odgiąć łagodnie ku wschodowi.

Ponownie prawidłowo, a przy zatrząsieniu wież do wyboru w północnych Włoszech Riccioli wspiał się na szczyt Torre degli Asinelli w Bolonii i upuszczał stamtąd różne ciężary. Poszukiwał odkształcenia na próżno, po raz kolejny przekonując się, że Ziemia się nie kręci. Znowu problemem nie były jego przewidywania teoretyczne (które są prawidłowe), lecz jakość danych eksperymentalnych.



Ilustracja z wydanego w 1651 roku *Nowego Almagestu* Ricciolego przedstawia wpływ, jaki rotująca Ziemia powinna mieć na pociski. Riccioli tłumaczy oczekiwane zakrzywienie ścieżki tak: Znajdująca się bardziej na południu armata porusza się szybciej niż bardziej północny cel (E). Ponieważ Ziemia porusza się wolniej w celu (E), będzie ona podążała po zakrzywionej ścieżce i wyładuje na prawo od celu w (G). Efekt taki nie powinien być obserwowany, jeżeli kula zostanie wystrzelona w kierunku rotacji Ziemi we wschodnim miejscu docelowym (C). W tym przypadku armata i cel poruszają się z tą samą prędkością względem siebie i dlatego też kula armatnia będzie leciała tak, jakby Ziemia była całkowicie nieruchoma. Ten ostatni fragment wywodu Ricciolego jest nieprawidłowy, ale z pewnością znajdował się on na właściwym tropie.

Dla tych, którzy próbowali znaleźć na Ziemi eksperymentalny dowód kopernikańskiego Układu Słonecznego ze Słońcem w środku, eksperyment Ricciolego był podstawowym celem. Pisząc w 1679 roku, Newton podzielił się „własną chęcią odkrycia ruchu dziennego Ziemi” ze swoim współczesnym rywalem na polu fizyki, Robertem Hooke. Hooke postanowił spróbować wykonać ten eksperyment, co skończyło się demonstracją w Royal Society 22 stycznia 1680 roku. Przy tak niewielkim marginesie – współczesne obliczenia odchylenia dla ośmiometrowego spadku to 0,3 mm – eksperyment się nie powiódł, a dokumenty Royal Society nie wskazują, aby Hooke podjął kolejną próbę.

Do dzisiaj eksperymenty takie jak ten zaproponowany przez Ricciolego i wykonany na szczycie Torre degli Asinelli są stosunkowo trudne do przeprowadzenia, aczkolwiek z pewnością nie jest to niemożliwe^[9], nie musimy jednak uciekać się do badań laboratoryjnych, aby bezpośrednio zaobserwować fizyczny wpływ rotacji Ziemi, ponieważ mamy od tego sondy kosmiczne i pogodę.

Ziarniste czarno-białe zdjęcie [na stronie 7](#) wklejki z fotografiami zajmuje historyczne

miejsce w archiwum meteorologii. Satelity TIROS były niewielkimi rotującymi bębniami o nieco ponad metrowej średnicy, wyposażonymi w dwie szerokokątne kamery telewizyjne, magnetowid do zapisu zdjęć oraz dwuwatowy nadajnik. 10 września 1961 roku TIROS-3 spojrział na Ocean Atlantycki z niskiej orbity okołoziemskiej i zaobserwował huragan Esther na kilka godzin, zanim jego powstanie zauważono na Ziemi.

Pół wieku później jakość kosmicznych zdjęć pogody na Ziemi jest wprost niesamowita. Wysokiej rozdzielczości fotografie pozwalają nam śledzić powierzchnię Ziemi i obserwować formowanie się rozległych układów pogodowych w czasie rzeczywistym. Są one czymś powszechnym i dzięki temu wiemy, jak wyglądają układy burzowe. Najoczywistszą ich cechą jest rotacja, a powodem ich rotacji jest rotacja Ziemi, jak zresztą przewidywał Riccioli. Siła, która działa na układy pogodowe, zmuszając je do rotacji, to siła Coriolisa, nazwana tak na cześć francuskiego matematyka Gasparda-Gustave'a de Coriolisa, który jako pierwszy opublikował pełny matematyczny opis stanowiący część analizy fizyki wirów wodnych w 1835 roku.



Trajektoria kuli wprowadzonej w ruch na rotującym dysku.

Siła Coriolisa to tak zwana siła pozorna, choć jej wpływ na układy pogodowe jest bardzo realny. Nazywa się ją siłą pozorną, bo nie jest ona fundamentalną siłą Natury. Nie jest to grawitacja, nie jest to elektromagnetyzm i nie jest to silne ani słabe oddziaływanie jądrowe. Jej źródłem jest fakt, że powierzchnia Ziemi NIE jest inercyjnym układem odniesienia. Dlaczego Ziemia nie jest inercyjnym układem odniesienia? Ponieważ jeżeli stoimy na powierzchni Ziemi, bezustannie zmieniamy kierunek ruchu, wykonując pełen okrąg raz dziennie. Z pewnością nie poruszamy się w linii prostej, a zatem nie jesteśmy inercyjnym

układem odniesienia.

W jaki sposób może to prowadzić do „magicznego” pojawienia się siły? Wyobraź sobie, że siedzisz w pociągu poruszającym się ze stałą prędkością i kładziesz na stole przed sobą piłeczkę do krykieta. Piłka pozostanie dokładnie tam, gdzie ją położysz. Dzieje się tak, ponieważ pociąg jest inercyjnym układem odniesienia i nie ma żadnego eksperymentu, który moglibyśmy wykonać, a który powiedziałby nam, czy się poruszamy, czy nie. Wszyscy będziemy mieli uczucie, że siedzimy spokojnie w przedziale pociągu przesuwanym się gładko przez stację ze stałą prędkością, i będziemy odczuwać, że to stacja przesuwa się obok nas. To nie jest błąd percepcji; mamy pełne prawo stwierdzić, że to nie my się poruszamy, lecz stacja. Gdy jednak pociąg przyspieszy, wyjeżdżając ze stacji, piłka zacznie toczyć się w naszą stronę. Jak powinniśmy zinterpretować to, co się dzieje?

Drugie prawo ruchu Newtona mówi nam, że $F = ma$. Ze swojej perspektywy w pociągu będziesz widział, że piłka przyspiesza w twoją stronę na stole, i stwierdzisz, że to przyspieszenie spowodowane jest działaniem siły na piłkę. Ta siła to właśnie siła pozorna. Pojawia się, *ponieważ nie znajdujesz się już w inercyjnym układzie odniesienia, gdyż pociąg przyspiesza*. Może się to wydawać subtelnym punktem, ale umożliwia on określenie, czy znajdujemy się w układzie inercyjnym, czy też nie. Jeżeli obiekty w twoim świecie nie pozostają w stanie spoczynku ani nie poruszają się ruchem jednostajnym w linii prostej, a powodem nie jest jedna z fundamentalnych sił Natury, możesz stwierdzić, że nie znajdujesz się w układzie inercyjnym, i to właśnie tu abstrakcja staje się konkretem. Siła pozorna jest bardzo rzeczywista z punktu widzenia osoby znajdującej się w przyspieszającym układzie odniesienia. Gdybyś położył głowę na stoliku w momencie, gdy pociąg zacząłby przyspieszać, piłka do krykieta uderzyłaby cię w głowę, a złamany nos z pewnością nie jest złamany tylko pozornie. Siła Coriolisa, która napędza rozległe układy burzowe na powierzchni naszej planety, to kolejny bardzo mocny przykład siły pozornej.

Pochodzenie siły Coriolisa nie jest takie proste jak przyspieszający pociąg, czy chociażby tak proste jak opisany przez Ricciolego eksperyment z kulą armatnią; dlatego też nie nazywa się dzisiaj siłą Ricciolego. Poniżej wytłumaczenie.

Ziemia to trójwymiarowy obiekt sferyczny, który komplikuje rzeczy, zatem rozważmy, co się dzieje z obiektem, który porusza się wkoło na płaskim rotującym dysku. Argumenty będą te same, ale łatwiejsze do przedstawienia. Wyobraź sobie rotujący dysk z dwóch różnych perspektyw. Jedna z nich należy do obserwatora oglądającego wszystko z daleka – powiedzmy w inercyjnym układzie odniesienia. Druga z kolei należy do obserwatora siedzącego na krawędzi rotującego dysku i rotującego razem z nim. To nasze miejsce, gdy siedzimy na powierzchni obracającej się planety.

Teraz wyobraź sobie, że rotujący obserwator decyduje się rzucić piłką prosto w kierunku środka dysku. Z jego perspektywy piłka zaczyna lecieć w kierunku, w którym została rzucona, ale moment później zaczyna skręcać zgodnie z kierunkiem rotacji. Co się dzieje? Najlepiej to zrozumieć, patrząc z perspektywy obserwatora patrzącego z daleka (zob. rysunek na [s. 132](#)).

Z odległej perspektywy piłka porusza się wkoło razem z dyskiem, zanim zostanie rzucona.

W momencie rzucenia utrzymuje swoją początkową prędkość w kierunku rotacji. Ponownie obserwujemy prawo bezwładności. Nikt nie pchnął piłki w kierunku, w którym obraca się dysk, czyli w kierunku stycznym do dysku, więc po prostu kontynuuje ona lot po swoim torze. Jednak zbliżając się do środka, okazuje się, że porusza się za szybko w kierunku stycznym względem wewnętrznych części dysku. Jest tak, ponieważ punkty bliżej środka mają mniejszą odległość do pokonania podczas każdego okrążenia, zatem muszą poruszać się wolniej niż punkty bliżej krawędzi dysku. W związku z tym piłka wyprzedza dysk i skręca w kierunku rotacji. Z perspektywy odległego obserwatora na piłkę nie działa żadna siła. Zakrzywioną ścieżkę można wytłumaczyć rotacją dysku.

Obserwatorowi kręcącemu się razem z dyskiem wydaje się, że na piłkę działa jakaś siła zgodnie z pierwszym prawem Newtona, gdyż piłka nie porusza się po linii prostej względem obserwatora. To właśnie siła Coriolisa. Działa ona pod kątem prostym do kierunku ruchu piłki, odkształcając go po zakrzywionej ścieżce. Na powierzchni Ziemi siła Coriolisa zawsze popycha obiekty poruszające się na półkuli północnej w prawo, a obiekty na półkuli południowej w lewo, jeżeli patrzeć na Ziemię zorientowaną biegunem północnym do góry. Na równiku siła Coriolisa nie pcha ani w prawo, ani w lewo, aczkolwiek próbuje delikatnie podnosić obiekty z powierzchni! Taka złożoność charakteryzuje rotującą trójwymiarową sferę w przeciwieństwie do dysku, ale zasada jest taka sama.

Teraz już wiemy, dlaczego układy burzowe wirują na powierzchni Ziemi. Duże masy powietrza nie poruszają się po liniach prostych ze względu na siłę Coriolisa. Cyklon jest regionem niskiego ciśnienia. Powietrze o wyższym ciśnieniu wokół niego opada do środka w celu wyrównania ciśnienia. Na półkuli północnej poruszające się powietrze doświadcza siły Coriolisa skierowanej w prawo (patrzac z góry), a tym samym będzie rotować w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu wskazówek zegara wokół obszaru niskiego ciśnienia. Na półkuli południowej cyklon rotuje w kierunku zgodnym z kierunkiem ruchu wskazówek zegara, ponieważ powietrze opadające ku centrum niżu odchylane jest w lewo. To właśnie dlatego huragany tworzące się co roku na Oceanie Atlantyckim i zagrażające Karaibom oraz południowo-wschodnim stanom USA zawsze rotują przeciwnie do kierunku wskazówek zegara, a cyklony tropikalne (nazwa huraganów tworzących się na półkuli południowej) niszczące wyspy Pacyfiku zawsze rotują w przeciwnym kierunku.

W przypadku antycyklonów jest odwrotnie. Powietrze wypływa na zewnątrz z centralnego obszaru wysokiego ciśnienia i odchyła się wskutek działania siły Coriolisa w prawo na półkuli północnej, indukując ruch zgodny ze wskazówkami zegara.

Oprócz tworzenia charakterystycznych spirali układów burzowych widocznych z przestrzeni kosmicznej, siła Coriolisa także wzmacnia siłę burz. Im silniejsze odchylenie prądu powietrza wokół obszaru wysokiego ciśnienia, tym szybciej będzie on rotował. To jeden z powodów, dla których najsilniejsze burze w Układzie Słonecznym występują na szybciej rotujących planetach. Jowisz jest nie tylko najmasywniejszą planetą, ale również najszybciej rotującą – pełen obrót wokół własnej osi wykonuje w zaledwie 9,8 godziny. Najślynniejszym układem burzowym w Układzie Słonecznym jest Wielka Czerwona Plama,

wirująca burza przemierzająca gazowego olbrzyma co najmniej przez ostatnie dwieście lat, choć prawdopodobnie znacznie dłużej. Jej rozmiary, pozwalające jej pochłonąć całą Ziemię, to 20 000 kilometrów długości i 12 000 kilometrów szerokości. W jej centrum prędkość wiatru dochodzi do 700 km/h. Siła Coriolisa generowana przez rozmiar i tempo rotacji Jowisza jest istotnym czynnikiem stojącym za siłą i rozmiarami Wielkiej Czerwonej Plamy oraz wielu innych układów burzowych istniejących w burzliwych chmurach Jowisza. Wielka Czerwona Plama to antycyklon (wysokie ciśnienie) na półkuli południowej Jowisza i tak jak na Ziemi rotuje ona w kierunku przeciwnym do wskazówek zegara. Prawa Natury są uniwersalne.

Powód wirowania burz na Ziemi i w całym Układzie Słonecznym sam w sobie jest interesujący, ale zajęliśmy się siłą Coriolisa z jeszcze głębszego powodu. Pojawia się ona w naszym opisie fizyki, gdy próbujemy wytłumaczyć rzeczywiste zjawisko naturalne z różnych perspektyw – inaczej mówiąc, z różnych układów odniesienia. Zapamiętaj tę myśl, bo jeszcze do niej wrócimy.

Przypomnij sobie, że rozpoczęliśmy ten rozdział, zastanawiając się nad naturą przestrzeni i czasu i wskazując na raczej wspaniałe założenia, iż zdarzenia w naszej przeszłości mogą istnieć poza naszymi wspomnieniami. Ten rozdział jest swego rodzaju przygodą podróżnika; nasze wytłumaczenia zjawisk naturalnych posłużą nam do zilustrowania czegoś, co musimy poznać na naszej drodze ku względności. Wytłumaczymy zatem jeszcze jedno zjawisko fizyczne, które wymaga od nas przeskakowania między różnymi układami odniesienia: klasyczny problem fizyki – przyływy oceaniczne.

Życie na orbitującej, rotującej planecie

Przypływy

Przypływy i odpływy odpowiadają za dramatyczną, powtarzającą się i gwałtowną transformację linii brzegowej na Ziemi. Już nawet przy niewielkiej dozie cierpliwości i na wygodnym składanym krześle możesz oddać się obserwowaniu zmian krajobrazu. Nie jest to z pewnością skala geologiczna. Zatoka Fundy na wschodnim wybrzeżu Kanady charakteryzuje się największą zmianą poziomu wody: 56 stóp, jak podaje Kanadyjskie Biuro Hydrograficzne w Burntcoat Head. Z przyjemnością pozostawię ten wynik w stopach, celebrując odmienność kulturową.

Pochodzenie przypływów to bardzo stara zagadka. Związek przypływów z cyklem księżycowym znany jest od ponad 2000 lat, jednak rozpoznanie schematu i przewidywanie wysokiego, niskiego i wiosennego poziomu nie wymaga zrozumienia leżącego u jego podstaw mechanizmu. Jeżeli chcesz po prostu żeglować, nie musisz wiedzieć, dlaczego tak się dzieje; wystarczy, że będziesz wiedział kiedy. Wraz z pojawieniem się heliocentrycznego modelu Układu Słonecznego w XVI wieku próby zrozumienia natury przypływów cieszyły się dużym zainteresowaniem ówczesnych astronomów, ponieważ zajmowały się ziemskim zjawiskiem, które wydawało się mieć związek z ruchem Ziemi, Księżyca i Słońca. Johannes Kepler był przekonany, że przypływy są skutkiem oddziaływania sił przyciągania ze strony Księżyca wywieranym na ziemskie oceany, ale nie był w stanie opisać mechanizmu, który tłumaczyłby tę siłę. Galileusz nie zgadzał się z nim i w coraz bardziej napiętym dialogu proponował kontrargument mówiący, że przypływy są wynikiem rotacji Ziemi i krążenia wokół Słońca: „Pośród wszystkich wielkich ludzi, którzy zastanawiali się nad tym zdumiewającym efektem, jestem bardziej zdumiony Keplerem niż innymi. Pomimo swojego otwartego i bystrego umysłu i faktu, że rozumie on ruchy związane z Ziemią, skłania się ku dominacji Księżyca nad wodami, co jest taką dziecinadą”.

„Dziecinada” to słowo, którego zamierzam używać trochę częściej. W eseju napisanym w 1616 roku, a zatytułowanym *Rozprawa o przypływach i odpływach morza* Galileusz porównał ruch oceanów Ziemi do ruchu wody w wazonie. Wnioskował, że ponieważ woda ulega odkształceniom spowodowanym przez zmiany orientacji i przyspieszenia wazonu, tak samo oceany są odkształcane w swoim ruchu przez orientację i przyspieszenie Ziemi. Galileusz proponował mechanizm dodatniego i ujemnego przyspieszenia tłumaczący naprzemienne przypływy i odpływy – teorię, którą nazwano „wielką pomyłką”. Na ironię zakrawa fakt, że Galileusz oraz Kepler w części mieli rację. Poniżej wytłumaczenie pochodzenia przypływów i odpływów.

Kepler miał rację w tym sensie, że przypływy spowodowane są wpływem grawitacyjnym Księżyca na Ziemię. Oczywiście nie opisał tego zjawiskami tymi słowami, gdyż Newton jeszcze nie opublikował swojej teorii powszechnego ciążenia. Galileusz miał rację, twierdząc,

że Ziemia przyspiesza. Nie wiedział tylko w jakim kierunku.

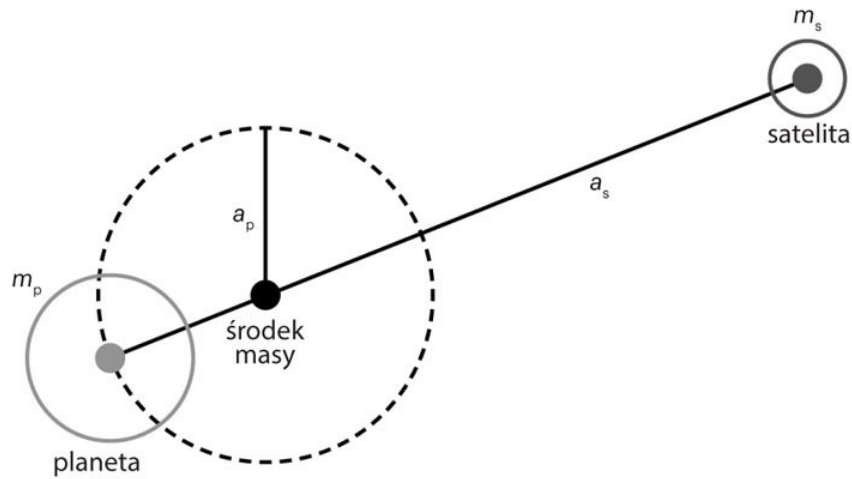
Przyjmijmy zatem, że przyływy mają coś wspólnego z Księżycem; jego orbitę można opisać precyzyjnie w ten sam sposób, w jaki opisujemy orbitę Ziemi wokół Słońca. Księżyc przyciągany jest w kierunku Ziemi przez jej grawitację, ale bezustannie w nią nie trafia, ponieważ kontynuuje swój ruch w linii prostej zgodnie z zasadą bezwładności.

Teraz musimy wprowadzić trzecie i ostatnie prawo ruchu Newtona. Mówi ono:

Każdej akcji towarzyszy reakcja równa co do wartości i kierunku, lecz przeciwnie zwrócona.

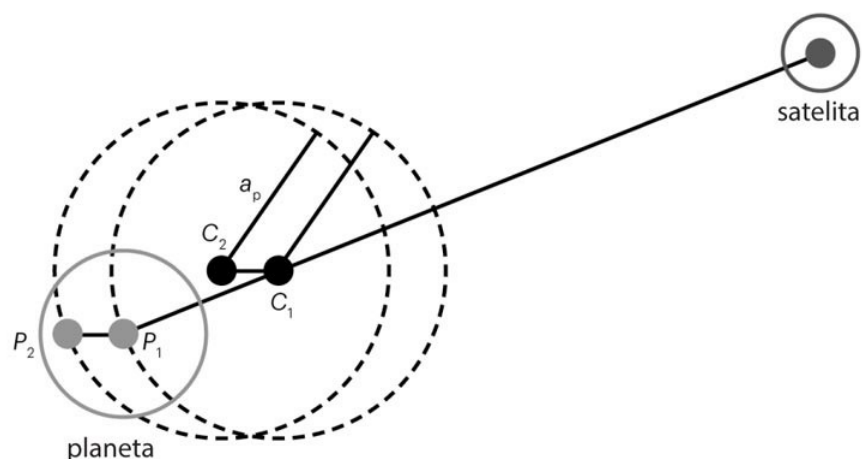
Oznacza to, że siły zawsze chodzą parami. Jeżeli Ziemia wywiera przyciąganie grawitacyjne na Księżyc, to Księżyc wywiera równe i przeciwnie zwrócone przyciąganie grawitacyjne na Ziemię. A zatem Ziemia musi opadać w kierunku Księżyca, przyspieszana przez siłę grawitacji działającą wzdłuż linii łączącej ich środki. Dlaczego Ziemia nie przemieszcza się w kierunku Księżyca? Z tego samego powodu, z którego Księżyc nie przemieszcza się w kierunku Ziemi – bo na niego opada i nie trafia. Ziemia także musi znajdować się na orbicie! Ale wokół czego? Odpowiedzią jest stwierdzenie, że trochę zbyt swobodnie używaliśmy języka, mówiąc, że Księżyc krąży wokół Ziemi. Tak jest w pewnym przybliżeniu, ale w rzeczywistości Księżyc krąży wokół punktu nieco oddalonego od środka Ziemi, tak zwanego środka masy układu Ziemia-Księżyc. Aby zrozumieć, co tu się dzieje, wyobraź sobie dwa księżyce o takiej samej masie krążące wokół siebie po orbitach kołowych. Wszystko jest idealnie symetryczne, a oba obiekty okrążają punkt oddalony o równą odległość od ich środków. To właśnie jest środek masy układu. Jeżeli jeden z księżyców jest masywniejszy od drugiego, środek masy znajduje się bliżej masywniejszego księżycy i obydwa będą krążyły wokół tego punktu. Ziemia jest 81 razy masywniejsza od Księżyca, zatem środek masy, wokół którego krążą obiekty, znajduje się bardzo blisko środka Ziemi, ale nie dokładnie na środku; odległość środka masy od środka Ziemi wynosi 4700 kilometrów, czyli około $1/81$ odległości między Ziemią a Księżycem. Dlatego też z grubsza rozsądne, choć niedokładne, jest stwierdzenie, że Księżyc krąży wokół Ziemi. Oczywiście jest to rozsądne w powierzchowny sposób, bo nie podejmuje problemu tego, jak Ziemia może przyspieszać w kierunku Księżyca – a przecież musi – i wciąż w niego nie trafiać!

Fakt, że Ziemia znajduje się na orbicie wokół środka masy układu Ziemia-Księżyc, jest istotny podczas próby zrozumienia przyływów i odpływów. Kluczem jest tutaj przełączanie perspektywy – lub układu odniesienia – tak jak to robiliśmy, analizując pochodzenie siły Coriolisa i jej wpływ na układy burzowe. Ponownie przeskakujemy między układami odniesienia, poszukując sił pozornych – fizycy zawsze to robią, ponieważ jest to niesamowicie przydatne i wiemy, jak to robić! (Zob. rysunek poniżej).



Środek masy.

Wyobraźmy sobie, co się dzieje z punktu widzenia obserwatora siedzącego w środku Ziemi. Jest to punkt, który krąży wokół środka masy układu Ziemia-Księżyc. Możemy założyć, że środek Ziemi okrąży środek masy po orbicie idealnie kołowej. W rzeczywistości orbita jest niemal idealnie kołowa. Ten układ odniesienia nie jest inercyjny, ponieważ rotuje, a tym samym będziemy oczekiwać obecności sił pozornych. Ale których? Tym razem nie jest to siła Coriolisa, która pojawia się, gdy obiekty przemieszczają się w rotujących układach odniesienia, lecz siła odśrodkowa. Jak ona działa? Z punktu widzenia obserwatora siedzącego w środku Ziemi siła grawitacji przyspiesza Ziemię w kierunku środka Księżyca w linii prostej, zgodnie z prawem powszechnego ciążenia Newtona. Mimo to Ziemia nie zbliża się do Księżyca – pozostaje w stałej odległości od środka masy układu Ziemia-Księżyc, jeżeli orbita jest kołowa. To musi oznaczać, że obserwator znajdujący się w środku Ziemi doświadcza siły działającej z tą samą siłą co przyciąganie grawitacyjne Księżyca, ale skierowanej w przeciwnym kierunku, przez co obydwie siły się znoszą. Ta siła, równa co do wartości i przeciwnie skierowana do siły grawitacyjnej, to właśnie siła odśrodkowa. To ta sama znajoma siła, którą odczuwamy, siedząc na szybko obracającej się karuzeli w wesołym miasteczku. Jesteśmy wyrzucani na zewnątrz, a jeżeli to właściwa karuzela, małe pojazdy, w których siedzimy, unoszą się w górę i na zewnątrz wraz ze wzrostem prędkości. Siła za to odpowiadająca to siła odśrodkowa.



Przypływy i odpływy.

Wspaniale, ale jak to się ma do przypływów i odpływów? Jesteśmy już w połowie drogi, więc być może powinieneś teraz zrobić sobie przerwę na herbatę i wrócić tutaj z nowymi siłami. Swoją drogą zawsze bawi mnie tłumaczenie przypływów i odpływów, bowiem jest ono naprawdę wspaniałe, jeżeli poświęci się odpowiednio dużo czasu na jego zrozumienie. Wyobraź sobie, że gdy ci to opowiadam, w moim głosie pojawia się coś z Joe Pesciego grającego w *Chłopcach z ferajny*. Trochę kocham, a trochę nienawidzę telewizji. Szczerze mówiąc, przez większość czasu ją uwielbiam, ale czasami uważam ją za medium powierzchowne. Nie lada wyczynem jest znalezienie sposobu wystarczająco szczegółowego, obrazowego i ciekawego przeanalizowania jakiejś idei w programie telewizyjnym o długości pojedynczego wykładu uniwersyteckiego. Jak pewnie się domyślasz, często uczestniczę w „kreatywnych debatach” nad tym, co właściwie oznacza „wystarczająca szczegółowość”. Zazwyczaj zajmujemy się wielkimi pytaniami o początek Wszechświata lub początek życia na Ziemi, a ponieważ odpowiedzi na te pytania są spekulacjami, zawsze mamy trochę miejsca na machanie rękami. Jednak w programie o przypływach i odpływach nie ma miejsca na machanie rękami, bowiem powód ich powstawania jest znany. Wydaje mi się, że przypływy to dobry przykład zjawiska, które warto tłumaczyć. Choć gdy to mówię, na twarzy pojawia mi się gorzki uśmiech. „Wystarczający poziom szczegółowości” jest w tym przypadku bardzo dobrze zdefiniowany. Jego definicja to *pełne* wytłumaczenie. To pułapka czyhająca na niczego niespodziewającego się wydawcę telewizyjnego, który zapragnie stworzyć serial telewizyjny o prostych pytaniach mających swoje odpowiedzi, a nie o trudnych, które ich nie mają.

Pora na resztę wytłumaczenia przypływów i odpływów. Przypomnij sobie, że Ziemia porusza się po orbicie wokół środka masy układu Ziemia-Księżyc. W środku Ziemi przyciąganie grawitacyjne ze strony Księżyca jest idealnie równoważone przez siłę pozorną zwaną siłą odśrodkową. Teraz wyobraź sobie punkt na powierzchni Ziemi znajdujący się dokładnie pod Księżycem. On także będzie poruszał się po orbicie i będzie musiał poruszać

się w kółko, zaś promień tego okręgu będzie taki sam jak punkt w środku Ziemi, ponieważ Ziemia jest skalistą kulą, a punkt na powierzchni bezpośrednio pod Księżycem nie może się poruszać w inny sposób niż środek. To oznacza, że siła odśrodkowa odczuwana w punkcie na powierzchni pod Księżycem musi być dokładnie taka sama jak odczuwana przez środek Ziemi. Ale – i to jest kluczowa kwestia – przyciąganie grawitacyjne Księżyca na powierzchnię Ziemi bezpośrednio pod nim jest silniejsze od tego działającego na środek Ziemi, gdyż powierzchnia Ziemi znajduje się bliżej Księżyca niż jej środek. Obie siły nie będą się idealnie znosić! Na powierzchnię bezpośrednio pod Księżycem działało będzie nieco za duże przyciąganie grawitacyjne, i właśnie to dodatkowe przyciąganie odkształca oceany i unosi fale tuż pod Księżycem.

Teraz rozważ sytuację po drugiej stronie Ziemi. Ponownie siła odśrodkowa musi być ta sama, ponieważ każdy punkt na powierzchni Ziemi musi krążyć precyzyjnie po okręgu o tym samym promieniu, tyle że teraz jesteśmy dalej od Księżyca niż środek Ziemi, a więc odczuwamy słabsze przyciąganie grawitacyjne od Księżyca. Oznacza to, że siła odśrodkowa, która zawsze skierowana jest od Księżyca, będzie nieznacznie za duża, a to także doprowadzi do odkształcania oceanów od powierzchni i unoszenia poziomu wody. Dlatego na Ziemi występują dwa przypiływy dziennie – jeden pod Księżycem, a jeden po drugiej stronie planety.

Siły pływowe są wynikiem nierównowagi między przyciąganiem grawitacyjnym Księżyca oraz siłą odśrodkową, która istnieje z uwagi na fakt, że Ziemia krąży wokół środka masy układu Ziemia-Księżyc. Choć zazwyczaj postrzegamy je z uwagi na duże odkształcenie powierzchni oceanów, są one na tyle silne, że skorupa Ziemi również odkształca się na mierzalną odległość, przesuwając skały codziennie o około pół metra. Nie jest to znaczące przesunięcie, ale systemy GPS muszą uwzględniać zmiany pola grawitacyjnego Ziemi spowodowane przez pływy skał, a geologowie monitorują wpływ tych pływów na linie uskoku Ziemi i ich potencjał do wzbudzania trzęsień ziemi i erupcji wulkanicznych.

Nasze wytłumaczenie rotujących układów burzowych oraz przypiływów i odpływów jest według mnie całkiem zgrabne, ponieważ stanowi ucieleśnienie jednego z głównych tematów tej książki: pozornie złożone i niemające ze sobą nic wspólnego zjawiska naturalne można wytłumaczyć przy wykorzystaniu prostego, fundamentalnego układu – w tym przypadku praw ruchu i grawitacji Newtona. Nie sądzę, abyśmy potrzebowali dodatkowego powodu poszukiwania wytłumaczenia tych rzeczy, poza tym, że jest to po prostu fajne i interesujące. Jednak wytłumaczenie pływów i rotacji układów burzowych ułatwiło nasze skakanie między różnymi układami odniesienia, czyli spoglądanie na zjawiska fizyczne z różnych punktów widzenia. Kwestia ta stanowi wstęp do czegoś głębszego. Jak już pisaliśmy na początku tego rozdziału, Albert Einstein wyniósł twierdzenie, że prawa Natury *muszą* przyjmować tę samą formę we wszystkich układach odniesienia, do poziomu zasady fundamentalnej. Nasz Wszechświat już taki jest. Wdrożenie tego wymogu zmusiło go do odrzucenia praw Newtona i napisania na nowo naszego intuicyjnego obrazu czasu i przestrzeni, wielkiej areny, którą tak często łatwo brać za pewnik.

Szczególna teoria względności Einsteina

Temat ruchu jest zaskakująco bogaty. Subtelności są widoczne nawet w dziele *Principia* Newtona. Po ogólnym rozprawieniu się z ruchem obiektów i opracowaniu wielu narzędzi, które współcześni fizycy biorą za chleb powszedni, uwaga Newtona skupiła się na ruchu planet wokół Słońca oraz na próbach wytłumaczenia odwiecznych pytań o przyływy czy przemijanie dni, miesięcy i lat. Wiedział on, że zrozumienie czasu i przestrzeni jest niezbędne, dlatego dokładnie opisał swoje założenia o istnieniu absolutnej przestrzeni i absolutnego czasu. Fakt, że Newton uważał, iż niezbędne jest stwierdzenie absolutnego czasu *jako założenie*, pozostaje dla mnie przykładem jego błyskotliwości jako fizyka. Newton traktował to założenie, tak jak my teraz traktujemy prawo bezwładności: jako aksjomat zgodny z obserwacjami prowadzonymi w tym czasie, ale nieudowodnialny na podstawie pierwszych zasad. To niesamowite, że udało mu się zidentyfikować takie założenie i uważał je za istotne, mimo iż w XVII wieku, a zapewne także dzisiaj, zdaniem wielu ludzi „nie trzeba mówić”, że niewiele da się powiedzieć o czasie ponad to, że jest absolutny i że tyka. W ten sposób wracamy do naszych początkowych rozważań o polu maków Moneta, które prawdopodobnie zniknęłyby wraz z upływem lat. Dopiero teraz możemy zacząć badać to kuszące „prawdopodobnie”.

Dlaczego Einstein zastąpił prawa ruchu Newtona?

Centralnym elementem naszych rozważań o ruchu był inercjalny układ odniesienia. Jeżeli już znudził cię ten termin, pamiętaj, że proponowałem grę w picie. Jeżeli pójdziesz tą ścieżką, odkryjesz związek między starym winem a wspomnieniami.

Przypominam, iż koncepcja mówi, że niemożliwe jest stwierdzenie, w którym inercjalnym układzie odniesienia się znajdujemy; wszystkie one są sobie absolutnie równe, a określenie „w spoczynku” jest zawsze względne. Mówiąc prościej, oznacza to, że nie jesteś w stanie z całą pewnością stwierdzić, czy się poruszasz, czy nie. Jeżeli przyspieszasz, to zupełnie inna bajka, bo pojawiają się wtedy siły pozorne. Albert Einstein bardzo głęboko analizował tego typu problemy – według mnie głębiej niż ktokolwiek inny. Einstein to prawdziwy, archetypowy geniusz bez skarpetek i z dziwną fryzurą. Na późniejszych etapach życia wyglądał nieziemsko, jakby wraz ze swoimi teoriami zamieszkiwał abstrakcyjną przestrzeń pozaziemską. To oczywiście frazes; Einstein był wielkim fizykiem, ale nie odkrył żadnej Cudownej Drogi wiodącej do zrozumienia, bowiem nic takiego nie istnieje. Pracował ciężko, myślał intensywnie i uczył się dodawać. Mimo to jego teorie względności są z pewnością jednymi z największych osiągnięć ludzkości. Ponad sto lat po ich opublikowaniu wciąż stanowią podstawy współczesnej fizyki.

Einstein odkrył swoją szczególną teorię względności, wyprowadzając twierdzenie, że wszystkie inercyjne układy odniesienia są równe na poziomie zasady, aksjomatu,

fundamentalnej właściwości naszego Wszechświata. To było jego światło przewodnie. Aby zrozumieć, dlaczego to było tak istotne dla Einsteina, musimy powrócić do idei, o której mówiliśmy w rozdziale pierwszym – do symetrii.

Twierdzenie, że wszystkie inercyjne układy odniesienia są sobie równe, jest stwierdzeniem symetrii. Jak sobie przypominasz, symetria w matematyce i fizyce oznacza procesy, których wynikiem jest brak zmiany. Kwadrat ma szczególną symetrię w tym sensie, że możemy zmienić nasz punkt widzenia, obracając kwadrat o 90 stopni, a wszystko wciąż będzie wyglądało dokładnie tak samo. Podobne pytania możemy zadać o prawa fizyczne, takie jak prawa ruchu Newtona. Czy prawa pozostają takie same, gdy zmienimy perspektywę? Jedną z takich symetrii odnosi się do pytania: czy prawa Natury wyglądają tak samo we wszystkich inercyjnych układach odniesienia?

Można na to spojrzeć w jeszcze inny sposób. Prawa fizyki opisują realne obiekty i ich zachowanie. Prawa Newtona, jak już widzieliśmy, mówią, że tocząca się kulka będzie toczyła się w linii prostej, chyba że zadziała na nią jakaś siła. Jeżeli pojawia się jakaś siła, to, co się stanie, opisywane jest równaniem $F = ma$. Wyobraźmy sobie, że obserwujemy toczącą się kulkę i decydujemy się zmienić naszą perspektywę, przeskakując do innego inercyjnego układu odniesienia. Wybieramy układ odniesienia przemieszczający się w kierunku toczącej się kulki i sprawdzamy, jak zmienia się nasz opis obserwowanej sytuacji. Dobrze zapamiętaj, że „nasz opis obserwowanej sytuacji” to innymi słowy „prawa Natury”, a zatem chcemy wiedzieć, w jaki sposób zmieniają się prawa Natury. Widzimy więc, że kulka wciąż się porusza w linii prostej, bowiem nie działają na nią żadne siły, ale jej prędkość wydaje się inna. Jeżeli lecimy w kierunku kulki z prędkością 20 m/s, a ona toczy się w naszą stronę z prędkością 10 m/s, to nasz zdrowy rozsądek poinformuje nas, że widzimy kulkę toczącą się w naszą stronę z prędkością 30 m/s. Tak długo jak jesteśmy w stanie zrozumieć zmianę prędkości, dodając prędkość w ten sposób, wciąż możemy korzystać z praw Newtona i wszystkie nasze przypuszczenia się potwierdzą. Nasz opis fizyki sytuacji pozostaje niezmienny przez naszą zmianę perspektywy. To symetria praw Newtona: pozostają one takie same, gdy przeskakujemy z jednego inercyjnego układu odniesienia do drugiego i uwzględniamy zmiany prędkości wszystkich obiektów w prosty i intuicyjny sposób.

Odrobina żargonu: uwzględnianie zmiany prędkości w ten sposób nazywamy transformacją Galileusza na cześć... Galileusza. W świecie fizyków możemy powiedzieć, że prawa Newtona pozostają niezmiennicze względem transformacji Galileusza – oto symetria praw Newtona.

Teraz pomyślmy o naszych opisach burz i przyptywów. Uwzględniają one sytuacje, w których prawa Newtona nie są takie same, gdy przeskakujemy do innego układu odniesienia. W rotującym układzie odniesienia tocząca się kulka zatacza łuk i nie porusza się w linii prostej na skutek działania siły Coriolisa. Uwzględniamy ten fakt, zmieniając drugie prawo ruchu Newtona w rotującym układzie odniesienia. Nie przyjmuje już ono formy $F = ma$, lecz zmienia się w $F + F_{\text{cor}} = ma$, gdzie F_{cor} to siła Coriolisa. Podobnie gdy myśleliśmy o źródle przyptywów i odpływów, przeskakiwaliśmy do rotującego układu odniesienia na Ziemi krążącej wokół środka masy układu Ziemia-Księżyc i widzieliśmy, że $F = ma$ zmienia

się w $F + F_{\text{odś.}} = ma$, gdzie $F_{\text{odś.}}$ to siła odśrodkowa. W obu przypadkach prawa Newtona *nie* wyglądają tak samo w rotujących układach, gdyż pojawiają się w nich „siły pozorne”. Możemy powiedzieć, że prawa Newtona nie są niezmiennicze, kiedy przechodzimy z inercyjnego układu odniesienia do rotującego układu odniesienia. Co ciekawe, siła odśrodkowa oraz siła Coriolisa są zawsze obecne, jednak w przypadku przyływów siła Coriolisa jest nieistotna, podczas gdy dla cyklonów i antycyklonów nieistotna jest siła odśrodkowa.

Poświęciliśmy trochę czasu, aby opisać te kwestie, ponieważ są one absolutnie centralne dla współczesnej fizyki – i aby zrozumieć, dlaczego Einstein stworzył swoją teorię względności.

Einstein jako pierwszy na poważnie wziął pod uwagę bardzo istotny i – przynajmniej na pierwszy rzut oka – dość nietypowy fakt. W przeciwieństwie do praw Newtona, prawa elektryczności i magnetyzmu nie są niezmiennicze względem transformacji Galileusza. Ne wyglądają one tak samo we wszystkich inercyjnych układach odniesienia, jeżeli zmienimy wszystkie prędkości w ten sam sposób, który wykorzystywaliśmy do praw Newtona, aby uwzględnić zmianę perspektywy. Oznacza to, że prawa Newtona oraz prawa elektryczności i magnetyzmu nie są zgodne ze sobą. W takiej sytuacji znalazł się Einstein w 1905 roku.

Powód, dla którego prawa elektryczności i magnetyzmu stwarzają problem, jest prosty, ale najpierw warto przypomnieć trochę historii. W XIX wieku badania elektryczności i magnetyzmu stanowiły najnowocześniejszą część fizyki. Nazwiska wielu naukowców zostały upamiętnione w języku, którego używamy współcześnie, mówiąc o elektryczności: od André-Marie Ampère’a pochodzi nazwa ampera, jednostki prądu elektrycznego, a nazwa „wolt” wzięła się od nazwiska Allesandra Volty. Największy przełom eksperymentalny przypada na okres między 1831 a 1832 rokiem, kiedy to w serii eksperymentów przeprowadzonych w Royal Institution oraz Royal Society w Londynie Michael Faraday odkrył indukcję elektromagnetyczną, tym samym wynajdując generator elektryczny, który jest odpowiedzialny za podstawy współczesnego świata.

W latach sześćdziesiątych XIX wieku szkocki fizyk James Clerk Maxwell odkrył zunifikowany teoretyczny opis wszystkich zjawisk elektrycznych i magnetycznych. Równania Maxwella są jednym z największych osiągnięć ludzkiego umysłu. Einstein później opisywał prace Maxwell jako „najbardziej doniosłe i najbardziej owocne w fizyce od czasów Newtona”. Owe równania są tak piękne, że nie jestem w stanie się powstrzymać, aby ich wam nie pokazać. Pal licho wszystkich, którzy uważają, że równania powodują spadek liczby sprzedanych książek popularnonaukowych. Oto i one:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \qquad \nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t},$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \qquad \nabla \times \mathbf{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}.$$

E oraz B oznaczają odpowiednio pole elektryczne i magnetyczne, podstawowe składniki Maxwellowskiego opisu zjawisk elektrycznych i magnetycznych. Gdy zapisane są w tej notacji, równania wymagają tylko dwóch innych liter: t do oznaczenia czasu oraz c do oznaczenia prędkości światła. To klucz, który otworzył drzwi Einsteinowi. Prędkość światła wchodzi do równań Maxwella jako stała – fundamentalna liczba nieulegająca zmianom. To jeden z aksjomatów – podstawowych składników naszego Wszechświata. To prędkość, co do której wszystko się zgadza, niezależnie od układu odniesienia. To twierdzenie szokujące, które wygląda jak katastrofa dla fizyki. Jakim cudem ma sens twierdzenie, że wszyscy się zgadzają co do prędkości światła niezależnie od układu odniesienia, w którym się znajdują? Przypomnij sobie nasz przykład z przeskakiwaniem między różnymi układami odniesienia i obserwowaniem toczącej się kulki. Jedyne, co musieliśmy zrobić, to dodać wszystkie prędkości w intuicyjny sposób zakodowany w transformacjach Galileusza i wszystko było w porządku. Maxwell zdemolował ten obraz.

Wyobraź sobie kogoś trzymającego latarkę. Światło opuszcza latarkę z prędkością światła: 299 792 458 metrów na sekundę. Teraz wyobraź sobie kogoś innego obserwującego tę sytuację z innego inercyjnego układu odniesienia, lecącego w kierunku latarki z prędkością równą połowie prędkości światła. Moglibyśmy oczekiwać, że będziemy w stanie opisać sytuację w dowolnym układzie odniesienia, jeżeli oddamy prędkości zgodnie z transformacjami Galileusza. Osoba lecąca w kierunku latarki doszłaby do wniosku, że światło mija ją z prędkością 450 000 000 metrów na sekundę – czyli $c + \frac{1}{2}c$. Równania Maxwella mówią jednak, że tak nie jest. Mówią natomiast, że każdy z obserwatorów zmierzy prędkość światła i wyniesie ona dokładnie 299 792 458 metrów na sekundę. Prędkość światła nie ulega zmianie niezależnie od tego, jak by na nią spojrzeć. Jest stała – to fundamentalna właściwość Natury.

Jeżeli wydaje się to dziwne, to właśnie takie jest. Nie potrafię tego wytłumaczyć inaczej, niż mówiąc, że nasz Wszechświat już tak jest skonstruowany. Równania Maxwella są prawidłowe. Stwierdzenie, że prędkość światła jest stała we *wszystkich inercyjnych układach odniesienia*, ma tę samą moc co zasada bezwładności. Jest takie, jakie jest, bo tak.

Błyskotliwość Einsteina – nazwijmy ją geniuszem – polegała na przyjęciu równań Maxwella bez zastrzeżeń i założeniu, że podczas przeskakiwania pomiędzy inercyjnymi układami odniesienia prędkość światła pozostanie taka sama. Nie możemy dodawać prędkości w ten sposób, w który dotychczas to robiliśmy; to po prostu nieprawidłowe. Transformacje Galileusza są błędne, a tym samym prawa Newtona, które charakteryzuje symetria

reprezentowana przez transformacje Galileusza, także są błędne.

Gdzieś w czasoprzestrzeni

Teraz możemy zebrać te wszystkie fakty w jedno. Einstein przebudował fizykę od samych podstaw, obstawiając przy dwóch aksjomatach znanych jako postulaty Einsteina. Pierwszy z nich znamy bardzo dobrze:

Prawa fizyki są takie same we wszystkich inercyjnych układach odniesienia.

Drugi postulat to ten, który wynika z przyjęcia równań Maxwella za prawdziwe:

Prędkość światła w próżni jest taka sama we wszystkich inercyjnych układach odniesienia.

Gdybyśmy pisali podręcznik do fizyki, teraz przesłilibyśmy do wyprowadzenia wszystkich konsekwencji tych dwóch postulatów, po drodze odkrywając skarby takie jak $E = mc^2$ – stwierdzenie, że masa i energia są zamienne. Jednak to nie jest podręcznik. Tutaj chcemy zbadać bardzo konkretną konsekwencję dwóch postulatów Einsteina: wniosek, że przestrzeń i czas nie są tym, czym się nam wydają.

Powróćmy do początku: do momentu, w którym Monet usiadł na polu maku tuż za Argenteuil i wypełniwszy płuca zapachami późnowiosennego popołudnia, nałożył delikatną kroplę czerwonej farby na płótno. Położenie w przestrzeni i czasie kropli czerwonej farby znane jest w języku względności jako *zdarzenie*. Ponieważ żyjemy w trójwymiarowej przestrzeni, potrzebujemy trzech liczb do określenia położenia namalowanego maku na płótnie. Owe liczby mogą być szerokością i długością geograficzną sztalugi na polu maku oraz wysokością płótna nad poziomem morza. Te trzy liczby określają, *gdzie* zaszło zdarzenie. Potrzebujemy także czasu i daty, by określić, *kiedy* nastąpiło zdarzenie: południe 26 maja 1873 roku. Zdarzenie w przestrzeni i czasie ma cztery współrzędne; trzy z nich określają położenie w przestrzeni, a jedna określa położenie w czasie.

Teraz rozważmy inne zdarzenie. Gdy słońce zachodzi, Monet wkłada częściowo ukończone płótno pod ramię, wraca do swojego pokoju we wsi i zamyka drzwi. Kliknięcie zamka stanowi kolejne zdarzenie, na różnej długości, szerokości geograficznej i wysokości nad poziomem morza oraz w innym czasie, liczonym według jego zegarka. Jest teraz ósma wieczorem 26 maja 1873 roku.

Wyobraźmy sobie, że Monet zdecydował się zmierzyć odległość dzielącą sztalugę od jego drzwi i wyszło mu, że to dokładnie dwa kilometry, i że obydwa miejsca znajdują się dokładnie na tej samej wysokości nad poziomem morza. To z kolei jest odległość w przestrzeni między oboma zdarzeniami. Różnica w czasie wynosi 8 godzin według zegarka Moneta.

Newton, i każdy inny przed Einsteinem, poparłby zdroworozsądkowy pogląd, że dowolny

obserwator, który zdecydowałby się zmierzyć odległość między sztalugą Moneta a jego drzwiami oraz odstęp czasu pomiędzy nałożeniem farby a kliknięciem zamka w drzwiach, zgodziłby się z Monetem, zakładając, że ich linijki oraz zegarki były dokładne i zsynchronizowane. Einstein odkrył, że jeżeli dołoży swoje dwa postulaty, sytuacja wygląda inaczej. Różni obserwatorzy nie zgodziliby się co do przestrzennej odległości i różnicy czasu między tymi zdarzeniami. Bądźmy dokładni. Wyobraźmy sobie, że przedsiębiorcza francuska dama z dostępem do futurystycznych samolotów przelatuje obok Moneta 26 maja 1873 roku z prędkością równą połowie prędkości światła. Zmierzona przez nią różnica czasu między położeniem farby na płótnie a kliknięciem zamka wyniesie 9 godzin i 14 minut, a odległość między sztalugą na polu maku a drzwiami będzie miała 1,73 kilometra. Różnica ta nie ma nic wspólnego ze sposobem mierzenia czasu i odległości lub z wykorzystywanymi urządzeniami pomiarowymi. Co więcej, ani Monet, ani lotnik się nie mylą; każdy z nich ma prawo do twierdzenia, że jego pomiary są prawidłowe. Einstein odkrył, że w rzeczywistości nie ma czegoś takiego jak absolutny czas czy absolutna przestrzeń. Powtórzmy raz jeszcze, ponieważ to bardzo dziwne. Z punktu widzenia lotnika czas Moneta płynie wolniej niż jej, co oznacza, że Monet starzeje się wolniej niż ona oraz Monet, idąc do domu, pokonuje 1,73 kilometra. W drugą stronę jest tak samo. Gdyby Monet spojrzał w górę i dostrzegł przelatujący samolot, zobaczyłby, że zegarek lotniczki tyka wolniej niż jego, i doszedłby do wniosku, że ona starzeje się wolniej od niego. Uznałby, że jej samolot jest 0,866 razy krótszy, niż jej się wydaje. Prawdopodobnie nie kontynuowałby malowania pola maków, gdyby to się stało, ale ważne jest, że to nie czysta teoria; ten efekt jest prawdziwy. Natura naprawdę skonstruowana jest w ten sposób. Spowolnienie poruszających się zegarów jest znane pod pojęciem dylatacji czasu, a skrócenie poruszających się obiektów nazywa się skróceniem Lorentza.

Jeżeli nie boisz się odrobiny matematyki, wyprowadzenie wyniku, że zegarek Moneta obserwowany przez lotniczkę tyka wolniej, i o ile wolniej, znajdziesz [na stronie 173](#). Wniosek wynika bezpośrednio z dwóch postulatów Einsteina, a sam argument jest stosunkowo prosty i nie wymaga matematyki wykraczającej poza twierdzenie Pitagorasa. Jeżeli wystarczy ci na to nasze słowo bez analizy [strony 173](#), przyjmij je i czytaj dalej!

Powodem, dla którego teoria Einsteina przewiduje, że odległości w przestrzeni i przedziały czasu nie są takie same w różnych układach odniesienia, są jego dwa postulaty – wymóg, że prawa Natury są takie same we wszystkich inercyjnych układach odniesienia oraz że prędkość światła jest stała we wszystkich inercyjnych układach odniesienia. Te dwa postulaty wskazują, że poruszające się zegary tykają wolniej, czego dowodzimy [na stronie 173](#). Mówiąc bardziej precyzyjnie, Einstein musiał wymienić transformacje Galileusza, które mówią nam, jak przełączać się pomiędzy różnymi układami inercyjnymi, na nowy zestaw równań znany jako transformacje Lorentza. Transformacje Lorentza pozostawiają taką samą prędkość światła, zgodną z drugim postulatem, ale za bardzo wysoką cenę – odległości w przestrzeni i przedziały czasu podlegają zmianie w transformacji Lorentza: poruszające się linijki ulegają skróceniu, a poruszające się zegary ulegają spowolnieniu!

Gdzie zatem się znajdujemy? Odkryliśmy, że czas i przestrzeń nie są takie, jakie się nam wydają, jeżeli przyjmiemy, że prędkość światła musi pozostać stała dla wszystkich

obserwatorów. Nie ma czegoś takiego jak absolutna przestrzeń, ponieważ obserwatorzy poruszający się z różnymi prędkościami względem siebie nie zgadzają się co do odległości między zdarzeniami. Wygodny obraz Wszechświata jako wielkiego pudła, w którym każda gwiazda, planeta i galaktyka posiada dobrze zdefiniowane położenie, nie może być prawdziwy, gdyż odległości między gwiazdami, planetami i galaktykami nie mogą być zdefiniowane w unikatowy sposób. Podobnie zresztą nie ma czegoś takiego jak absolutny czas, bo nie jest możliwe zdefiniowanie odstępu czasu między zdarzeniami w unikatowy sposób.

To naprawdę zabawne i dziwne, ale także stanowi poważny problem dla fizyki. Problem leży w pierwszym postulacie Einsteina: *prawa fizyki są takie same we wszystkich inercyjnych układach odniesienia*. Prawa fizyki są narzędziami, które wykorzystujemy do przewidzenia wyniku rzeczywistych eksperymentów; są one opisem Natury. Jeżeli muszą być takie same we wszystkich układach inercyjnych, muszą w takim razie składać się z wartości takich samych we wszystkich inercyjnych układach odniesienia. Jednak prawa fizyczne, których uczymy się w szkole, dotyczą odległości mierzonych za pomocą linijki i czasów mierzonych za pomocą zegarów. Pomyśl o drugim prawie ruchu Newtona, $F = ma$, które opisuje, jak szybko obiekt o masie m przyspiesza w odpowiedzi na działanie siły F . Przyspieszenie jest mierzone w metrach na sekundę do kwadratu – to wartość, która obejmuje zmianę odległości w określonym przedziale czasu. Ale skoro odkryliśmy, że przedziały odległości i przedziały czasu nie są takie same we wszystkich układach odniesienia, okazuje się, że prawa Newtona też nie są takie same! To wygląda na katastrofę.

Na szczęście nią nie jest, ponieważ Einstein znalazł wyjście z tego problemu. Odkrył, że choć odległość w przestrzeni pomiędzy dwoma zdarzeniami oraz przedział czasu pomiędzy tymi zdarzeniami zmieniają się, istnieje wartość, która się *nie* zmienia podczas przechodzenia między układami inercyjnymi: odległość w przestrzeni *oraz* czasie, rozważana jednocześnie w bardzo szczególny sposób.

Jeżeli oznaczymy odległość między sztalugą Moneta i drzwiami jako Δx , a różnicę czasu między położeniem czerwonej farby na płótnie a kliknięciem zamka jako Δt , wtedy „odległość” $\Delta s^2 = c^2\Delta t^2 - \Delta x^2$ nie ulega zmianie. Zarówno lotniczka, jak i Monet zgadzają się co do Δs , choć nie zgadzają co do Δt oraz Δx . Wartość Δs jest znana jako odległość w czasoprzestrzeni między dwoma zdarzeniami. Prędkość światła c weszła do równania w subtelny sposób, mnożąc różnicę czasu Δt . Dlaczego? To, co możemy powiedzieć od razu, to że jakaś prędkość musi tam istnieć, aby możliwe było określenie odległości w czasoprzestrzeni. Załóżmy, że mierzymy różnicę czasu Δt w sekundach, a odległości między zdarzeniami Δx w metrach. Nie możemy po prostu odjąć czegoś w sekundach od czegoś w metrach – to tak jak odjąć pięć jabłek od dziesięciu pomarańczy. Jeżeli jednak pomnożymy różnicę w czasie w sekundach przez prędkość, która mierzona jest w metrach na sekundę, to otrzymamy obiekt $c\Delta t$ mierzony w metrach i możemy beztrząsco pójść dalej i odjąć od niego Δx . Ten argument nie informuje nas, jaką wartość powinno przyjmować c , ale mówi nam, że musi to być jakaś prędkość.

Na uniwersyteckim kursie fizyki przeslibyśmy teraz do rozważenia, w jaki sposób energia i pęd traktowane są w szczególnej teorii względności, a także do wykazania, że ta szczególna prędkość może być interpretowana jako prędkość cząstek bezmasowych. Przypadkowo, z tego, co wiemy, fotony są bezmasowe, a tym samym podróżują ze szczególną prędkością c – i właśnie dlatego nazywamy ją prędkością światła.

Fakt, że odległości między zdarzeniami w czasoprzestrzeni są takie same dla wszystkich, wskazuje, że powinniśmy odbudować nasze prawa Natury, bazując na wartościach takich jak Δs , i dokładnie to zrobił Einstein, zamieniając prawa Newtona i wartości znane dla fizyków, takie jak energia i pęd, na wersje czasoprzestrzeni. To stąd właśnie pochodzi $E = mc^2$. Wydaje mi się, że to całkiem satysfakcjonujące, iż Natura zbudowana jest w ten sposób. Zdarzenia, jak by nie patrzeć, tworzą opowieść o naszym życiu. Nie rozkładamy naszych wspomnień na oddzielne czynniki przestrzenne i czasowe. Pamiętam idealny letni dzień w sierpniu 1972 roku, gdy żółte słońce unosiło zapachy trawnika, a przesunięte dopplerowsko pszczoły tłumiły głuchy szum miasta. Rozłożyliśmy dmuchany basen w ogrodzie rodziców i bawiliśmy się w wodzie do upadłego. Pamiętam to zdarzenie, a nie moment o określonej szerokości geograficznej, długości geograficznej i znaczniku czasu.

Istnieje obrazowy sposób wizualizacji tych idei znany pod nazwą diagramu czasoprzestrzennego. Aby go narysować, musimy przedstawić położenie zdarzeń w przestrzeni na osi poziomej, a położenie zdarzeń w czasie na osi pionowej, tak jak to pokazano [na stronie 162](#). Pominęliśmy dwa wymiary przestrzenne dla przejrzystości, ponieważ nie są istotne w naszych rozważaniach, a ciężko na kartce narysować czterowymiarowy diagram. Narysujmy zatem moje życie w formie diagramu czasoprzestrzennego. Podczas rysowania diagramu czasoprzestrzennego istotne jest precyzyjne ustalenie układu odniesienia, w którym się znajdujemy. W tym przypadku Oldham Royal Infirmary – szpital, w którym się urodziłem 3 marca 1968 roku – będzie naszym układem odniesienia (załóżmy, że jest to układ inercyjny). Oznacza to, że ustalamy siatkę linii i zegarów w Oldham pozostających w spoczynku względem szpitala. Uruchamiamy stopery w Oldham w momencie moich narodzin, a ponieważ urodziłem się w tym szpitalu, współrzędne zdarzenia moich narodzin to $x = 0$, $ct = 0$, gdzie x to odległość od Oldham Royal Infirmary, a t to czas mierzony przez stoper Oldham w położeniu 0. Oznaczmy to zdarzenie „3 marca 1968” i umieścimy je na początku diagramu czasoprzestrzennego.

Teraz możemy dodać kolejne zdarzenia. W sierpniu 1972 roku byłem cztery kilometry od Oldham Royal Infirmary w przydomowym basenie. Czas na zegarze Oldham wskazuje w tym punkcie 4,5 roku. 3 marca 1989 roku byłem we Florencji we Włoszech, w autobusie po koncercie z moim zespołem Dare, z którym robiliśmy support dla szwedzkiej grupy rockowej Europe. Dokładnie. To 21 lat na zegarze w Oldham oraz jakieś 2000 kilometrów od Oldham Royal Infirmary. Jeszcze jedno. 2 września 2009 roku byłem w jednym z moich ulubionych krajów, w Etiopii, filmując program *Wonders of the Solar System* przy jeziorze lawowym Erta Ale z moim przewodnikiem z plemienia Afar.

Mógłbym tak zaznaczyć każde zdarzenie w moim życiu, odmierzając czas na zegarach

Oldham i mierząc odległość od Oldham Royal Infirmary. Powstała w ten sposób linia na diagramie czasoprzestrzennym to moja tak zwana linia świata. Przedstawia ona każdy moment mojego życia w lokalizacjach mierzonych za pomocą zegarów z Oldham i linijek z Oldham. Przypomnijmy sugestywny cytat z Hermanna Weyla: „Tylko dla spojrzenia mojej świadomości, podróżującej wzdłuż tej linii życia mojego ciała, wycinek tego świata staje się żywy niczym ulotny obraz w przestrzeni, który bezustannie zmienia się w czasie”. To właśnie miał na myśli.



Ja i mój przydomowy basen tego gorącego, słonecznego dnia w sierpniu 1972 roku oraz podczas nagrania w Etiopii 2 września 2009 roku.

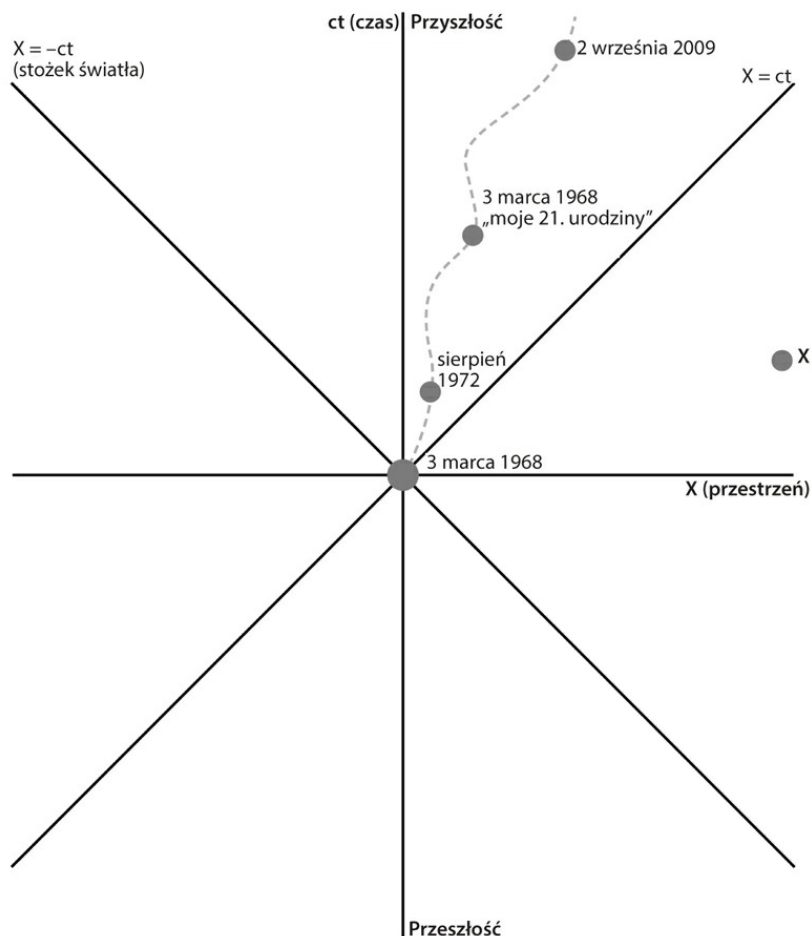


Diagram czasoprzestrzenny mojego życia z perspektywy Alberta siedzącego w szpitalu Oldham Royal Infirmary.

Istnieje jeszcze jedna cecha diagramu czasoprzestrzennego, o której musimy wspomnieć: linie przekątne przechodzące przez 3 marca 1968 roku. To tak zwany stożek światła, a stożki światła odgrywają bardzo ważną rolę we względności. Aby zrozumieć, czym one są, wyobraź sobie, że ktoś postanawia wyemitować strumień światła w przestrzeń kosmiczną z Oldham w momencie moich urodzin – być może aby je uczcić, kto wie? Po jednej sekundzie światło przebyło odległość równą jednej sekundzie świetlnej. Oznaczmy punkt w czasoprzestrzeni, do którego dotarł promień światła, jako zdarzenie w położeniu 1 sekundy $\times c$ na osi czasu oraz 1 sekundy $\times c$ na osi przestrzeni. Po dwóch sekundach promień świetlny dociera do punktu położonego dwie sekundy świetlne od początku diagramu i tak dalej. Ten stożek światła jest więc linią świata dla promienia światła o początku w początku diagramu – w zdarzeniu moich narodzin. Rozciąga się ona na całym diagramie czasoprzestrzennym pod kątem 45 stopni. Moja linia świata wije się gdzieś wewnątrz stożka światła, tak jak musi, ponieważ nic nie podróżuje z prędkością większą od prędkości światła. Aby to dostrzec, spójrz na zdarzenie oznaczone dużym „X” na diagramie. To coś, co wydarzyło się daleko stąd. Wyobraźmy sobie, że to zdarzenie to jakiś młody obcy na planecie oddalonej od nas o 50 lat świetlnych,

pływający w swoim basenie, i że według zegarów z Oldham to zdarzenie nastąpiło w tym samym czasie co moja przygoda w basenie w 1972 roku. Mówimy zatem, że te dwa zdarzenia są jednocześnie w układzie odniesienia Oldham. Musiałbyś podróżować szybciej od światła, aby się tam dostać, jeżeli byłeś tutaj w dniu moich urodzin – 50 lat świetlnych w 4,5 roku, a to jest niemożliwe, nic bowiem nie przemieszcza się szybciej niż światło. Być może słyszeliście to już wiele razy i zastanawialiście, dlaczego tak jest. „Podróż z prędkością większą od prędkości światła jest niemożliwa i niepożądana, bo co chwilę zrywa kapelusz z głowy”, powiedział Woody Allen. Za moment dowiemy się, dlaczego jest to niemożliwe.

Stożek światła w górnej części diagramu znany jest jako stożek światła przyszłości od mojego urodzenia, ponieważ zaznacza region czasoprzestrzeni, który teoretycznie mogę odwiedzić lub na który mogę wpłynąć. Nie mogę wpłynąć na zdarzenia znajdujące się poza moim stożkiem światła, bo aby tam dotrzeć, musiałbym podróżować szybciej niż światło.

W dolnej połowie diagramu także znajduje się stożek światła, który przedstawia czas przed moimi narodzinami. Ten stożek to z kolei stożek światła przeszłości w stosunku do moich urodzin. Linie świata moich rodziców muszą zawierać się w stożku światła przeszłości, bowiem na niego wpływały. Co więcej, każda z linii świata wszystkich moich przodków, rozciągająca się aż do początków życia na Ziemi 4 miliardy lat temu, musi zawierać się w stożku światła przeszłości. Żadne przeszłe zdarzenia spoza stożka światła przeszłości nie mogły mieć wpływu na moje narodziny, ponieważ żaden sygnał spoza nich nie dotarłby od nich do Oldham przed 3 marca 1968 roku, nie podróżując szybciej od światła.

Zadajmy teraz pytanie: Jak ten diagram wygląda z punktu widzenia naszej francuskiej lotniczki przelatującej nad nami ze stałą prędkością? Wiemy już, że zauważyłaby, iż zegarki w Oldham tykają wolniej, a linijki w Oldham ulegają skróceniu, zatem umieściłaby zdarzenia z mojej linii świata w innych miejscach na swoim diagramie czasoprzestrzennym. Dla uproszczenia wyobraźmy sobie, że lotniczka zgadza się zsynchronizować swoje zegarki z zegarkami w Oldham w momencie moich narodzin i zgadza się, że moje narodziny w Oldham Royal Infirmary także nastąpiły w położeniu zerowym na jej osi przestrzeni. Innymi słowy, początki obu diagramów znajdują się w $t = 0$.

Chociaż obserwator siedzący spokojnie w Oldham Royal Infirmary nie zgodzi się z lotniczką co do różnicy czasu i odległości przestrzennych między zdarzeniami na mojej linii świata, zgodzi się z nią co do odległości w czasoprzestrzeni między tymi zdarzeniami, zgodnie z $\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2$. Oznacza to, że Δx oraz Δt muszą zmieniać się w bardzo określony sposób, tak aby Δs zawsze pozostawało takie samo. Diagram czasoprzestrzenny lotniczki pokazano na ilustracji na [s. 167](#). Zauważ, że stożki światła się nie zmieniają, zgodnie z drugim postulatem Einsteina – zarówno lotniczka, jak i obserwator w Oldham muszą się zgodzić co do prędkości światła. Teraz spójrzmy na położenie zdarzenia przedstawiającego moje dwudzieste pierwsze urodziny. Wiemy, że zegary lotniczki będą tykały w innym tempie niż zegar w Oldham, a linijki lotniczki będą innej długości niż linijki w Oldham. Ale wiemy również, że niezależnie od różnicy czasu i odległości między 3 marca 1968 roku a moimi dwudziestymi pierwszymi urodzinami muszą one przestrzegać reguły, iż wartość Δs^2 między tymi

zdarzeniami pozostaje taka sama. Zaznaczyliśmy wszystkie możliwe położenia moich dwudziestych pierwszych urodzin na diagramie czasoprzestrzennym lotniczki za pomocą krzywej. Rzeczywiste położenie, które ona zaznaczy, zależy od tego, z jaką prędkością i w którym kierunku przelatuje nad Oldham. Założyliśmy, że lotniczka przelatuje z prędkością bliską prędkości światła w kierunku dodatnich wartości x w Oldham. Natychmiast nasuwa się tutaj coś interesującego. Moje dwudzieste pierwsze urodziny zawsze pozostaną w stożku światła przyszłości moich urodzin. Musi tak być, ponieważ moje urodziny spowodowały moje dwudzieste pierwsze urodziny! Mielibyśmy problem, gdyby z czyjegoś punktu widzenia moje urodziny wyleciały ze stożka światła moich urodzin i nie mogły na nie wpływać!

Jak na razie jest dobrze. Teraz jednak spójrzmy na zdarzenie oznaczone „X” – mały obcy w swoim basenie – znajdujące się poza stożkiem światła moich urodzin. To zdarzenie musi także utrzymywać odległość w czasoprzestrzeni od 3 marca 1968 roku, ale by to zrobić, musi się poruszać po innej krzywej. Co ważne, nie musi pozostawać w mojej przyszłości. Dla pewnych prędkości względnych między lotniczką a Oldham zdarzenie wydaje się, z jej perspektywy, znajdować w mojej przeszłości! To wymaga wykrzyknika. Kolejność w czasie moich urodzin i zdarzenia X została odwrócona z perspektywy lotniczki. Czy piękna teoria Einsteina odpowiada za nonsens? Czy faktycznie prawdą może być, że kolejność zdarzeń w czasie w czasoprzestrzeni nie jest taka sama dla wszystkich obserwatorów? Tak, to prawda, ale to nie jest problem, ponieważ zdarzenie X zawsze pozostaje poza moimi stożkami światła przyszłości i przeszłości. Oznacza to, że moje narodziny nie mogły wpłynąć na to zdarzenie, a ono nie mogło wpłynąć na moje narodziny. Te dwa zdarzenia są rozłączne przyczynowo. A zatem tak naprawdę nie ma znaczenia, jaką ustalimy kolejność tych zdarzeń (nazywanych zdarzeniami rozdzielonymi przestrzennie), gdyż nie mogą one, nawet hipotetycznie, mieć ze sobą nic wspólnego. Znajdźmy konkretny przykład, aby lepiej wyjaśnić tę sytuację.

Wyobraźmy sobie, że dokładnie w momencie moich narodzin w moim układzie odniesienia na Słońcu dochodzi do potężnej eksplozji. Słońce znajduje się osiem minut świetlnych stąd, co oznacza, że eksplozja nie może wpłynąć na nic na Ziemi przez co najmniej osiem minut, których potrzebuje promień światła, aby przebyć odległość ze Słońca na Ziemię. Zdarzenia te są rozdzielone przestrzennie, dlatego astronauta przelatujący w naszym otoczeniu z dużą prędkością może zauważyć eksplozję przed lub po moich narodzinach. Zmieniłaby się kolejność zdarzeń w czasie. Ale kogo to obchodzi? Jaką to robi różnicę? Żadną, ponieważ te dwa zdarzenia nie mogą mieć na siebie żadnego wpływu.

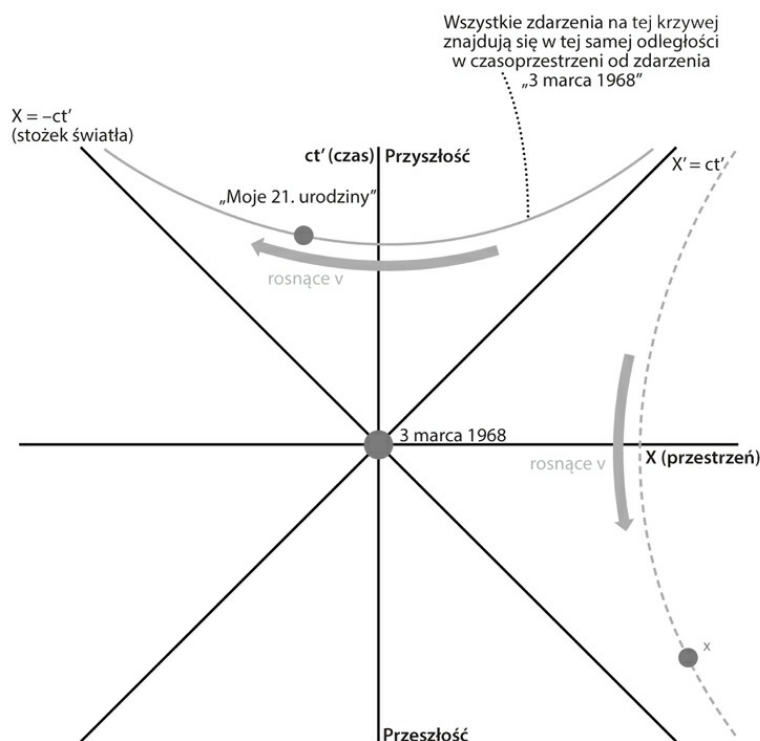


Diagram czasoprzestrzenny z perspektywy lotnika przelatującego z dużą prędkością w kierunku dodatniej osi x względem mnie. Oznaczyłem osie jako ct' oraz x' , aby podkreślić, że współrzędne czasu i przestrzeni zdarzeń są inne w układzie odniesienia lotnika. Zdarzenie na początku układu – moje narodziny – oznaczone 3 marca 1968 pozostają w tym miejscu ponieważ uzgodniliśmy, że oba układy odniesienia mają swój początek w $t = t' = 0$. Wszystkie zdarzenia na tej krzywej znajdują się w tej samej odległości w czasoprzestrzeni od zdarzenia „3 marca 1968”.

Zauważmy jednak, że po ośmiu minutach fala uderzeniowa eksplozji może uderzyć w Ziemię i zniszczyć Oldham, co – używając kolokwialnego języka – może namieszać mi w planach. Moje narodziny to zdarzenie i eksplozja na Słońcu to zdarzenie, a moje narodziny znajdują się poza stożkiem światła eksplozji, a tym samym nie mogą być przez nią powstrzymane. Moja śmierć osiem minut później to kolejne zdarzenie, i to zdarzenie *jest* w stożku światła eksplozji. Nikt już nie zobaczy odwrócenia kolejności w czasie tych zdarzeń. Zdarzenia znajdujące się we wspólnych stożkach światła przyszłości lub przeszłości nazywane są zdarzeniami rozdzielonymi czasowo i ich kolejność nie może ulec zmianie.

To całkiem zdumiewające, że wszystko działa, choć w dość osobliwy sposób. Wciąż jednak mamy jeden problem. Pomyśl ponownie o zdarzeniu moich narodzin – 3 marca 1968 roku – oraz o zdarzeniu X. W układzie odniesienia szpitala Oldham zdarzenie X znajduje się w mojej przyszłości. W innym układzie odniesienia zdarzenie X zachodzi jednocześnie z moimi narodzinami, a w układzie odniesienia lotniczki znajduje się ono w mojej przeszłości. Zdarzenia zachodzące jednocześnie w jednym układzie odniesienia nie są jednocześnie w innym. O ile to nie stanowi problemu, jak już widzieliśmy, powstaje interesujące pytanie: Jeżeli nie ma wyraźnego rozróżnienia pomiędzy przyszłością a przeszłością, i rzeczywiście zdarzenie może znajdować się w czyjejś przyszłości według jednego obserwatora i w przeszłości według drugiego, to co właściwie znaczą pojęcia „przyszłość” i „przeszłość”? W momencie, w którym się urodziłem, zdarzenie X nastąpiło czy nie? Według mnie – nie. Według lotniczki – nastąpiło. To wskazuje, że w teorii względności zdarzenia istnieją w czasoprzestrzeni wykraczającej poza nasze lokalne pojęcie przeszłości, teraźniejszości i przyszłości.

Podkreślmy to jeszcze mocniej. Przypomnij sobie, że zdarzenie „X” oznacza małego obcego bawiącego się w basenie na planecie oddalonej 50 lat świetlnych od Ziemi. W układzie odniesienia Oldham to zdarzenie nastąpiło w tym samym czasie co mój letni dzień w 1972 roku. Teraz spójrz na ilustrację [na stronie 167](#), która przedstawia, jak to zdarzenie widzi lotniczka podróżująca z dużą prędkością względem mnie. Istnieją układy odniesienia, w których dzień pływania w basenie małego obcego znajduje się w mojej przeszłości, a całe moje życie, włącznie z moim dniem w basenie, jest w przyszłości. Mój letni dzień jeszcze nie nadszedł. Znajduje się gdzieś w czasoprzestrzeni, w jego przyszłości, aczkolwiek w regionie czasoprzestrzeni jemu niedostępnym. Z mojej perspektywy mój dzień w basenie w 1972 roku jest w mojej pamięci. Wspominam go niezwykle przyjemnie. Ale z pewnością już minął, prawda?

Jeżeli przyjmiemy teorię względności Einsteina bez zastrzeżeń, nie ma sensu stwierdzenie, że przeszłość już się wydarzyła, a przyszłość dopiero się wydarzy. Zdarzenie rozdzielone przestrzennie może znajdować się w czyjejś przyszłości z jednej perspektywy oraz w czyjejś przeszłości z innej. Nie ma to znaczenia w tym sensie, że takie zdarzenia nie mają na siebie wpływu, przy założeniu, że nic nie porusza się szybciej od światła. Dlatego właśnie prędkość światła jako uniwersalne ograniczenie prędkości jest tak ważna w teorii względności. Chroni przyczyny i skutki. Jednak to zachowanie prowokuje pytanie o to, czy wszystkie zdarzenia, które mogą się zdarzyć i zdarzyły się w historii Wszechświata, na swój sposób „gdzieś tam są”. To koncepcja znana jako Wszechświat Blokowy. Czasoprzestrzeń można przedstawić jako czterowymiarowy obiekt, po którym się przemieszczamy, napotykając zdarzenia na naszej linii świata. Jesteśmy zmuszeni do poruszania się po tym obiekcie z prędkością światła, co z naszej osobistej perspektywy oznacza, że musimy przemieszczać się w przyszłość z prędkością 1 sekundy na sekundę^[10]. Musisz się starzeć z powodu geometrii czasoprzestrzeni.

Musimy tutaj podkreślić, że choć Wszechświat Blokowy stanowi konsekwencję względności, niekoniecznie jest prawidłowy. Wiemy, że względność nie jest w pełni zgodna

z teorią kwantową, a większość fizyków ma nadzieję i oczekuje, iż teoria kwantowa czasoprzestrzeni w pewnym momencie zostanie opracowana. Nie wiemy jednak, czy to pozwoli na stworzenie bardziej intuicyjnego obrazu przeszłości i przyszłości. Musimy zawsze pamiętać, że teorie fizyczne takie jak względność są modelami rzeczywistości, które produkują przewidywania zgadzające się z doświadczeniem – test, który szczególna i ogólna teoria względności zdają śpiewająco od ponad stu lat. Czy Wszechświat Blokowy jest naprawdę rzeczywisty, czy też stanowi artefakt modelu Einsteina? Kto wie? Jednak uważam, że jego implikacje są co najmniej warte rozważenia. Z drugiej strony we Wszechświecie Blokowym nie ma miejsca na wolną wolę. Wszystkie zdarzenia z naszej przyszłości „istnieją” i tylko czekają, aż natkniemy się na nie, podążając po naszej linii świata. Szczerze mówiąc, osobiście nie interesuje mnie, czy mam wolną wolę, czy nie. Nie ma to dla mnie żadnego znaczenia. Druga strona tej monety jest za to cudowna. We Wszechświecie Blokowym ciągle istnieje przeszłość. Mój idylliczny letni dzień w 1972 roku, z moją Mamą, Tatą i siostrą, istnieje nie tylko w mojej pamięci. Nigdzie nie minął, choć nie mogę go już nigdy odwiedzić. On wciąż gdzieś jest; ci wszyscy ludzie, te wszystkie momenty, zawsze i na zawsze, są gdzieś w czasoprzestrzeni. To wspaniałe.

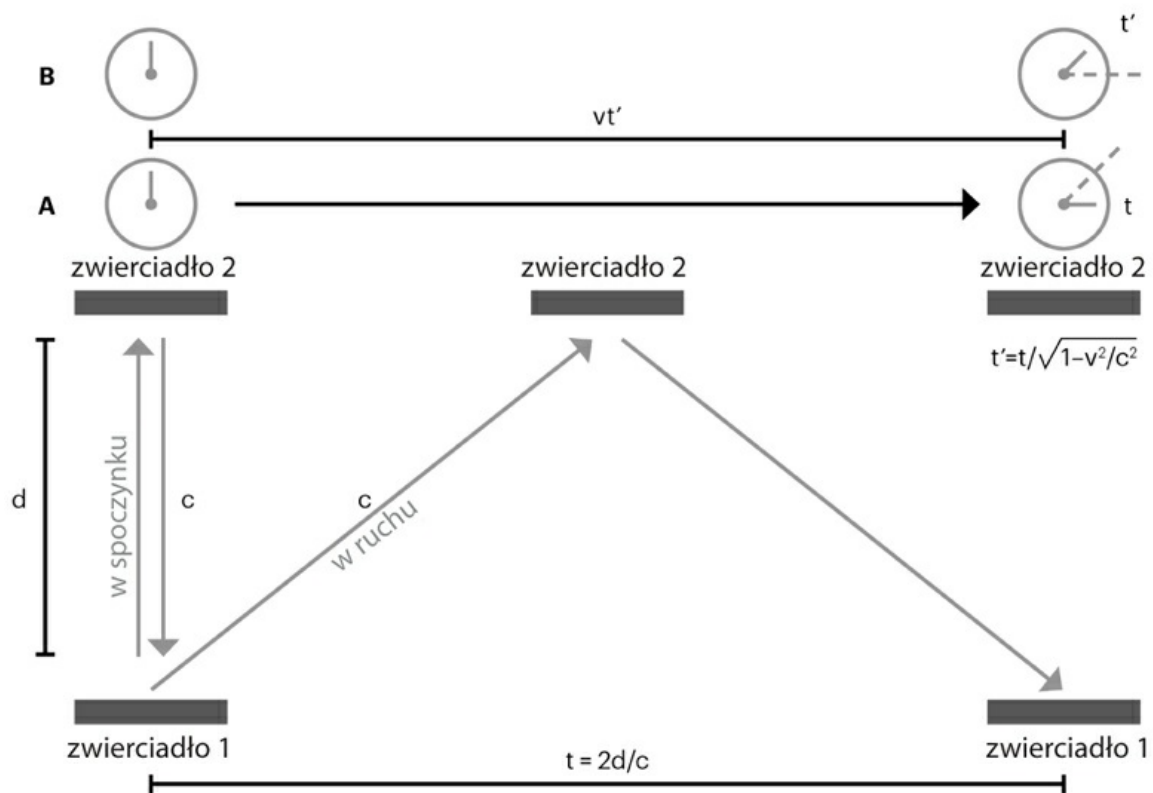
Obliczanie czasoprzestrzeni

Monet i lotniczka

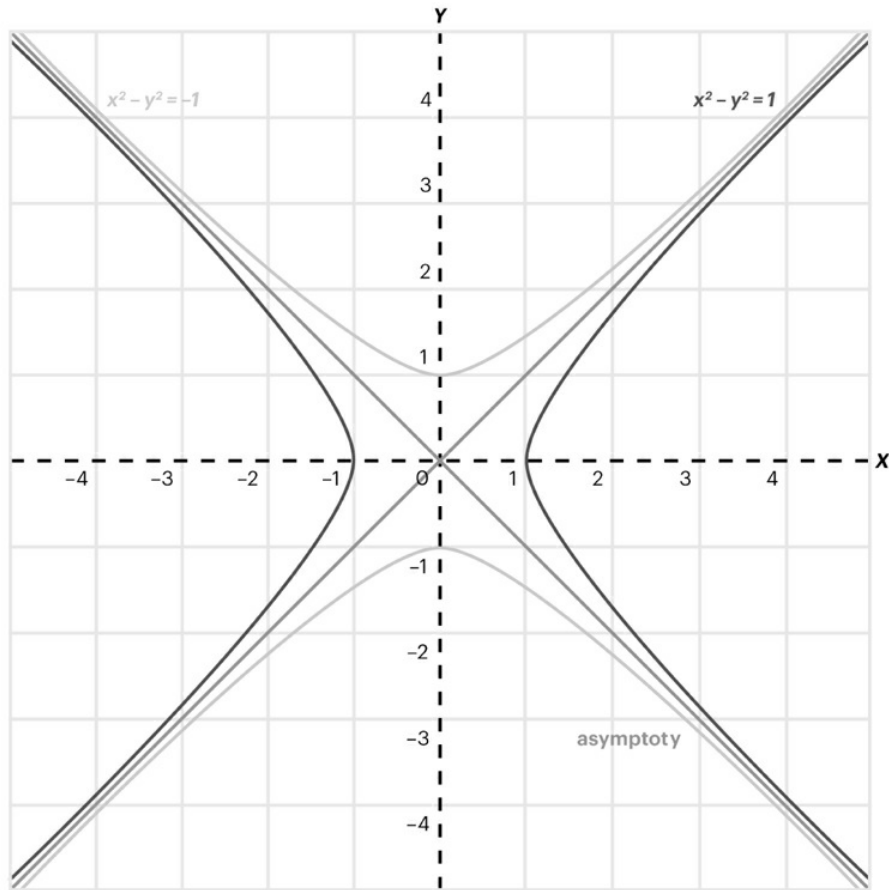
Możemy wykorzystać dwa postulaty Einsteina, aby wykazać, dlaczego lotniczka i Monet odmierzają inne przedziały czasu pomiędzy dowolną parą zdarzeń. To z pewnością jedna z najdziwniejszych myśli, jakie kiedykolwiek wyszły z ludzkiej głowy. Co jeszcze dziwniejsze, wielokrotnie potwierdzono, że jest ona prawidłowa. Argument jest tutaj zaskakująco prosty. Najpierw wyobraźmy sobie szczególny typ zegara – na końcu wykażemy, że argument ten musi działać dla każdego rodzaju zegara, ale na razie rozważmy „zegar świetlny”. Zegar świetlny składa się z dwóch równoległych luster, od których odbija się na zmianę promień światła. Załóżmy, że oba lustra dzieli odległość d . Jeżeli światło podróżuje z prędkością c , to będzie potrzebowało czasu $t = 2d/c$, aby przebyć odległość z jednego lustra do drugiego i z powrotem, co potwierdza ktoś trzymający zegar (a formalnie możemy powiedzieć: „ktoś pozostający w spoczynku względem zegara”). Osobę trzymającą zegar (nie wysilajmy swojej wyobraźni) nazwijmy „osobą A”. Teraz wprowadźmy drugą osobę: „osobę B”. Jeżeli osoba A oraz osoba B pozostają w spoczynku względem siebie, to zgodzą się co do odstępów czasu między tyknięciami zegara świetlnego (nazwijmy tyknięciem zegara czas, w jakim światło wykonuje podróż w obie strony, tj. $t = 2d/c$). Przed Einsteinem i zgodnie ze zdrowym rozsądkiem powiedzielibyśmy, że zegar potrzebuje czasu t , aby tyknąć jeden raz, niezależnie od tego, co on robi albo kto dokonuje pomiaru. Ale to błąd, co zaraz wykażemy.

Aby zobaczyć, że czas nie jest absolutny, umieścimy osobę A i jej zegar w pociągu (Einstein często używał pociągów do tłumaczenia swoich teorii), a osobę B na peronie. Teraz rozważmy, jak osoba B rozumie zegar. Górna ilustracja przedstawia ścieżkę pokonywaną przez światło w czasie potrzebnym do jednego tyknięcia zegara.

Według osoby B zegar przemieszcza się o odległość równą vt' w czasie jednego tyknięcia, gdzie v to prędkość pociągu, a t' to czas tyknięcia. Na tym etapie powstrzymamy się przed powiedzeniem, że t' (czas jednego tyknięcia zegara świetlnego według osoby B) jest równy t (czas tyknięcia zegara według osoby A). Na rysunku widzimy ścieżkę, którą promień światła pokonuje, przemieszczając się w górę i w dół. Oczywiście, światło pokonuje większą odległość według osoby B niż według osoby A. Wykorzystując twierdzenie Pitagorasa, wiemy, że odległość, którą światło pokonuje według osoby B, wynosi $2\sqrt{(vt'/2)^2 + d^2}$, podczas gdy dla osoby to po prostu $2d$ (zauważ, że wynosiłaby tylko $2d$ dla osoby B, jeżeli $v = 0$, tj. gdyby pociąg się nie poruszał). Fakt, że światło pokonuje dłuższą drogę według osoby B, nie jest niczym szczególnym, ponieważ pociąg się porusza. Następny krok jest już jednak szokujący.



Monet i lotniczka



Hiperbola

Drugi postulat Einsteina mówi, że prędkość światła w próżni jest taka sama we wszystkich inercjalnych układach odniesienia. Oznacza to, że osoba B musi się zgadzać, iż światło porusza się z prędkością c . Jeżeli światło porusza się z prędkością c według osoby A oraz osoby B, i skoro światło pokonuje dłuższą drogę według osoby B niż według osoby A, to światło musi potrzebować dłuższego czasu na pokonanie drogi w obie strony według osoby B niż według osoby A. Warto to przeczytać jeszcze raz i pomyśleć o tym, ponieważ to bardzo zaskakujące.

Właśnie dowiedliśmy, że jeżeli drugi postulat Einsteina jest prawdziwy, znaczy to, że zegar świetlny tyka wolniej według osoby B (znajdującej się na peronie) niż według osoby A (znajdującej się w pociągu). Skoro już postanowiliśmy przywołać Pitagorasa i odrobinę algebry do zapisania, jak dużą odległość pokonuje światło między tyknięciami dla osoby B, możemy z łatwością zapisać, jak bardzo zegar zwalnia według osoby B. Czas jednego tyknięcia według osoby B to odległość, jaką światło pokonuje między tyknięciami, podzielona przez prędkość światła c , czyli $t' = 2\sqrt{(vt'/2)^2 + d^2/c^2}$. Zauważ, że czas, który nas interesuje (t'), znajduje się po obu stronach tego równania, a to znaczy, że musimy poprzestawiać wyrazy równania, wykorzystując do tego podstawy algebry. Podniesienie do drugiej potęgi obu stron równania daje nam $t'^2 = 4(vt'/2)^2/c^2 + 4d^2/c^2$, po przestawieniu wyrazów otrzymujemy $t'^2(1 -$

$v^2/c^2) = 4d^2/c^2$. Teraz możemy napisać, czym jest t' wyrażone przez v , d oraz c . Jest to po prostu $t' = 2d/c / \sqrt{1 - v^2/c^2}$. A skoro $t = 2d/c$, to możemy napisać, że $t' = t / \sqrt{1 - v^2/c^2}$. I to jest nasza ostateczna odpowiedź. Tak długo jak v jest mniejsze od c , pierwiastek kwadratowy ma sens, a t' jest zawsze większe od t , co oznacza, że osoba na peronie musi dojść do wniosku, iż osoba w pociągu trzyma zegar, który tyka wolniej, niż gdyby ów zegar się nie poruszał. Swoją drogą czynnik $1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ pojawia się bardzo często we względności i znany jest pod nazwą czynnika Lorentza lub czynnika gamma oznaczanego symbolem γ .

Zanim jednak zaczniemy twierdzić, że świat jest wspaniały, powinniśmy przekonać się, że wynik, który przed chwilą otrzymaliśmy, nie jest tylko jakąś osobliwą cechą zegarów świetlnych. Najpierw wyjaśnijmy sobie, dlaczego za przykład przyjęliśmy zegar świetlny. Zrobiliśmy to, ponieważ mogliśmy w tym przypadku bezpośrednio odnieść się do postulatu Einsteina mówiącego o tym, że prędkość światła jest taka sama we wszystkich układach odniesienia. Gdybyśmy rozważali zegary z wahadłami, wtedy nie moglibyśmy skorzystać z tego postulatu tak prosto. Jednak przy większym nakładzie pracy bylibyśmy w stanie wykonać takie obliczenia, wykorzystując do tego zegary wahadłowe, uderzenia serca lub dowolny inny typ zegara, i otrzymalibyśmy ten sam wynik. Widzicie zatem, że musi to być prawda, jeżeli drugi postulat Einsteina jest prawidłowy:

Prawa fizyki są takie same we wszystkich inercyjnych układach odniesienia,

lub mówiąc bardziej kolokwialnie: „nie można stwierdzić, kto się porusza, a kto pozostaje w spoczynku”. Załóżmy, że spowalnianie zegarów świetlnych jest osobliwą cechą zegarów świetlnych i nie odnosi się do innych zegarów. Gdyby była to prawda, osoba A (w pociągu) zauważyłaby, że jej zegar świetlny tyka wolniej niż jej zegarek naręczny. Taka obserwacja pozwoliłaby jej jednak stwierdzić, że się porusza – a to stanowiłoby sprzeczność z pierwszym postulatem Einsteina. Jedynym sposobem, aby ten postulat został utrzymany, jest powiedzenie, że jeżeli zegar świetlny osoby A tyka wolniej według osoby B, to także wolniej tykać musi jej zegarek naręczny. Pora przyznać, że świat jest dużo bardziej zdumiewający, niż mamy prawo przypuszczać. Wykazaliśmy, że jeżeli obydwa postulaty Einsteina są prawdziwe, dwoje ludzi pozostających w ruchu względem siebie starzeje się w różnym tempie.

Na zakończenie możemy obliczyć przedział czasu między dwoma zdarzeniami omawianymi w tekście: czas między Monetem kładącym plamę farby na płótnie i przekręceniem zamka w drzwiach. Według zegarka Moneta przedział czasu wynosił osiem godzin. Jednak zgodnie z wzorem, który właśnie wyprowadziliśmy, przedział czasu między tymi samymi dwoma zdarzeniami zmierzony przez lotniczkę wynosi $8 \text{ godzin} / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ godziny.

Hiperbola

Odległość między dwoma zdarzeniami w czasoprzestrzeni $\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2$. Fizycznie, dla dowolnych dwóch zdarzeń, choć odległość w przestrzeni Δx oraz odległość w czasie Δt

ulegają zmianom mierzone przez obserwatorów znajdujących się w różnych układach odniesienia, to muszą się one zmieniać tak, aby odległość w czasoprzestrzeni Δs pozostała stała. Matematycznie jest to równanie krzywej o nazwie hiperbola. Rozważmy konkretny przykład, zakładając, że odległość w czasoprzestrzeni między dwoma zdarzeniami to 1 jednostka. Istnieją dwie wersje tej „jednostkowej hiperboli”, których równania to $x^2 - y^2 = 1$ oraz $x^2 - y^2 = -1$. Przedstawiono je na dolnej ilustracji [na stronie 173](#). Jeżeli $x^2 - y^2$ równe jest 1, mamy do czynienia z dwiema krzywymi: jedna płaszczyzna w górnej części i jedna w dolnej. To sytuacja pasująca do zdarzeń „rozdzielonych czasowo”, tj. przyczynowo ze sobą powiązanych. Dla takich zdarzeń odległość w przestrzeni Δx^2 zawsze wynosi mniej niż odległość, jaką światło może pokonać w przedziale czasu między zdarzeniami $c^2\Delta t^2$. Przedział czasoprzestrzeni Δs^2 będzie zatem zawsze dodatni. Jeżeli zdarzenia nie są ze sobą przyczynowo związane, to znaczy, że odległość między nimi w przestrzeni Δx^2 jest większa niż odległość, jaką światło może pokonać w przedziale czasu między nimi $c^2\Delta t^2$, a wtedy mamy do czynienia z krzywą $x^2 - y^2 = -1$. Takie zdarzenia nazywamy „rozdzielonymi przestrzennie”. Jak zauważamy w tekście, istotny jest fakt, że gdy zmieniamy układ odniesienia, zdarzenia przesuwają się po diagramie czasoprzestrzennym na tych czterech krzywych, lecz nigdy nie przeskakują między nimi: zdarzenia powiązane przyczynowo (rozdzielone czasowo) *zawsze* zachowują tę samą kolejność zdarzeń, ale zdarzenia niezwiązane przyczynowo (rozdzielone przestrzennie) nie muszą zachowywać kolejności.

PIERWIASTKI

Ćma i płomień

Jak zaczęło się życie? Wydaje mi się, że to jedno z dwóch najciekawszych pytań w nauce i najważniejsze pytanie w historii ludzkiej myśli. Ludzkość budowała katedry, toczyła wojny, imperia powstawały i upadały, podczas gdy niezliczeni demagodzy poszukiwali powszechnej akceptacji swoich domysłów.

Jak zaczął się Wszechświat? Wydaje mi się, że to kolejne interesujące pytanie naukowe, ale o nim jak na razie wiemy mniej. Istnieją teorie, które wskazują, że Wszechświat może być wieczny i że nie ma żadnego początku. Jeżeli tak było, wtedy Wszechświat istnieje od zawsze i mamy odpowiedź: Wszechświat się nie zaczął. Czy to jest wystarczająca odpowiedź, czy nie, to zależy od ciebie. Mnie by to wystarczyło.

Niezależnie od tego, co się stało na początku czasu, wiemy, że 13,8 miliarda lat temu, gdy część Wszechświata, którą możemy obserwować dzisiaj, zawierająca ponad 350 miliardów dużych galaktyk, o średnicy ponad 90 miliardów lat świetlnych, była ściśnięta na obszarze mniejszym niż jeden atom. W tak ekstremalnych warunkach fizycznych nie mogło istnieć żadne życie, więc nawet jeżeli Wszechświat istniał w jakiejś formie przed Wielkim Wybuchem, z pewnością można stwierdzić, że nie było w nim żadnych złożonych struktur fizycznych. Obserwowalny Wszechświat musiał zatem być pozbawiony życia w pewnym momencie swojej przeszłości, a życie musiało się gdzieś w nim spontanicznie pojawić w ciągu ostatnich 13,8 miliarda lat. Słowo „spontanicznie” warto tutaj zdefiniować, ponieważ pojawia się ono dość często w rozmowach o początkach życia. Mówiąc, że życie pojawiło się spontanicznie, zakładamy, że życie to proces fizyczny, który powstał w wyniku działania praw Natury. Jeżeli powiemy, że Ziemia uformowała się spontanicznie, mamy na myśli, że nikt jej nie zbudował; mówiąc, że organizmy żywe pojawiły się spontanicznie, mamy na myśli dokładnie to samo.

Pierwsze jądro atomowe uformowało się w pierwszej minucie po Wielkim Wybuchu, a pierwsze atomy powstały w dużej liczbie, gdy Wszechświat miał 380 000 lat. Pierwsze gwiazdy zapłonęły jakieś 100 milionów lat później i to one stworzyły pierwsze atomy węgla. Mało prawdopodobne jest, aby bogata chemia życia zaczęła się spontanicznie bez węgla, tlenu i kilku innych pierwiastków cięższych od atomów wodoru i helu, które istniały jeszcze przed gwiazdami. Życie mogło powstać gdziekolwiek we Wszechświecie po tym czasie i być może tak było; tego nie wiemy.

Ziemia powstała 4,54 miliarda lat temu z pierwotnego obłoku otaczającego młode Słońce. Z dużą pewnością można założyć, że na Ziemi nie było życia we wczesnych latach po jej powstaniu; panowały na niej zbyt gwałtowne i zmienne warunki. Istnieją solidne dowody na to, że życie istniało na Ziemi około 3,5 miliarda lat temu, a prawdopodobnie dużo wcześniej – omówimy te dowody później. Dlatego też założymy, że Ziemia była kiedyś globem bez życia, a organizmy żywe pojawiły się gdzieś w pierwszym miliardzie lat po jej uformowaniu.

Nic, co stwierdziliśmy w tych pierwszych akapitach, nie jest kontrowersyjne z perspektywy nauki, ale zrobimy tu jedno założenie, które jest co najmniej podważalne. Założymy, że życie rozpoczęło się na Ziemi, a nie dotarło na nią z przestrzeni kosmicznej. Skoro nie odkryliśmy jeszcze życia na planetach innych niż Ziemia, jest to rozsądne rozwiązanie, aczkolwiek możliwe, że życie powstało na Marsie lub na kometach w zewnętrznych rejonach Układu Słonecznego i zostało dostarczone na Ziemię na obiektach, które w nią uderzały. Ta teoria nazywana jest pansperią. Choć brzmi to nieprawdopodobnie, to testowalna teoria, a tym samym zajmuje ugruntowaną pozycję w sferze nauki.

Z pewnością możliwe jest odkrycie życia na Marsie w nadchodzących kilku dekadach, a jeżeli marsjańskie mikroby będą dzieliły z nami cechy biochemiczne oraz kod genetyczny, to być może będziemy zmuszeni rozważyć wspólne pochodzenie na którejś z tych dwóch planet lub nawet gdzie indziej w Układzie Słonecznym. Takie odkrycie z pewnością utrudniłoby nam poszukiwanie źródła życia, ponieważ znacznie łatwiej jest badać głęboką historię naszej własnej planety niż historię innego globu. Jedyną drogą do odkrycia są badania naukowe i właśnie to jest jeden z powodów, dla których wysyłamy sondy na Marsa i do potencjalnie przyjaznych dla życia księżyców Jowisza i Saturna. Nie trzeba jednak mówić, że nie powinniśmy przestawać poszukiwać początków życia na Ziemi, jednocześnie budując sondy do poszukiwania go poza Ziemią.

Zakładając, że życie powstało na Ziemi, musiało być tak, że podstawowe chemiczne składniki życia istniały na naszej planecie jeszcze przed powstaniem organizmów żywych, a gdzieś i kiedyś chemia stała się biologią. Nie mamy precyzyjnej definicji tego, czym jest „stawanie się biologią”, ale warto podkreślić, że biologia to tylko słowo oznaczające (bardzo) złożoną chemię. Organizmy żywe są zbudowane z tego samego zestawu pierwiastków chemicznych co obiekty nieożywione i przestrzegają tych samych praw Natury. W tym sensie możemy stwierdzić, że Ziemia jest naszym przodkiem oraz twórcą i chcielibyśmy się dowiedzieć, jak, gdzie i kiedy nastąpiło przejście z geochemii do biochemii.

Chemia to nauka zajmująca się ruchem elektronów

Organizmy żywe są zbudowane z prostych składników oddziałujących ze sobą w złożony sposób. W pewnym sensie to oczywiste, ponieważ wszystko we Wszechświecie jest zbudowane z prostych składników oddziałujących ze sobą w złożonych interakcjach. W rozdziale pierwszym widzieliśmy, że na głębokim poziomie subatomowym istnieją tylko trzy składniki codziennej materii: kwarki górne, kwarki dolne i elektrony. Na wyższym poziomie mamy protony i neutrony, a na jeszcze wyższym 92 naturalnie występujące pierwiastki chemiczne obecne na Ziemi. Nikt poza studentami chemii czy Tomem Lehrerem nie zna na pamięć wszystkich nazw pierwiastków, ale jestem przekonany, że praktycznie każdy czytelnik tej książki wie, iż można je ułożyć w tabeli zwanej układem okresowym. Każdy pierwiastek ma inną liczbę protonów w jądrze atomowym oraz równą jej liczbę elektronów je otaczających; wodór ma 1 proton i 1 elektron, węgiel ma 6 protonów i 6 elektronów i tak dalej. Procesy chemiczne i biochemiczne polegają na dzieleniu się i transferze elektronów między pierwiastkami, co pozwala na tworzenie i rozkład cząsteczek.

Wszystkie pierwiastki powyżej liczby atomowej 92, uranu, zostały stworzone w laboratoriach, zazwyczaj w procesie bombardowania ciężkich jąder atomowych neutronami lub zmuszania lżejszych pierwiastków do fuzji. Najcięższy pierwiastek nosi nazwę Ununoctium i ma 118 protonów i 176 neutronów w swoim jądrze. To egzotyczne jądro jest bardzo niestabilne i żyje krócej niż jedną milisekundę.

Układ okresowy to nie tylko obrazowe ułożenie pierwiastków; to klucz do zrozumienia, jak i dlaczego pierwiastki reagują ze sobą, tworząc cząsteczki. Kolumny pionowe zwane grupami zawierają pierwiastki o podobnych właściwościach chemicznych. Dzieje się tak, ponieważ wszystkie pierwiastki w danej grupie mają tę samą liczbę elektronów na zewnętrznej powłoce, a to właśnie te elektrony są dostępne do dzielenia czy przekazywania innym atomom; to właśnie one pozwalają na całą chemię. Budowę atomu tlenu i wodoru analizowaliśmy bardziej szczegółowo w rozdziale pierwszym. Wodór posiada pojedynczy elektron. Tlen ma osiem elektronów, z czego dwa znajdują się blisko jądra i nie odgrywają żadnej roli w reakcjach chemicznych. Pozostałych sześć jest zlokalizowanych na zewnętrznej powłoce, a dwa z nich są pozostawione same sobie. Tlenowi przydałyby się dwa dodatkowe do wypełnienia swojej zewnętrznej powłoki, i przyjmie je od innych atomów, zważając na połowiczną szansę. To dlatego wodór i tlen będą się ze sobą łączyć w H_2O . Mam świadomość, że ten antropomorficzny język jest mało naukowy, ale szczerze mówiąc, nie obchodzi mnie to. Mam nadzieję, iż dzięki temu udaje mi się przekazać wam, że to ułożenie elektronów wewnątrz atomów różnych pierwiastków chemicznych odpowiada za całą chemię.

Siarka ma 16 elektronów, z czego 10 krąży bardzo blisko jądra, a sześć na powłoce zewnętrznej, tak jak w przypadku tlenu. Oznacza to, że siarka, tak jak tlen, pochwyci dwa elektrony od innych atomów, jeżeli będzie miała okazję. W obecności wodoru stworzy

cząsteczkę siarkowodoru H_2S , który był jednym ze składników pierwotnej atmosfery Ziemi. Węgiel ma cztery elektrony na swojej zewnętrznej powłoce i dzieli się nimi wszystkimi podczas tworzenia związków takich jak dwutlenek węgla CO_2 . Pod węglem w układzie okresowym znajduje się krzem, który także ma cztery elektrony na zewnętrznej powłoce i tworzy podobne związki, na przykład dwutlenek krzemu SiO_2 , i tak dalej. Jak już pisaliśmy w rozdziale pierwszym, elektrony są ułożone w ten bardzo ustrukturyzowany sposób wokół jądra atomowego zgodnie z teorią kwantową, która stanowi element fundamentalnego zestawu praw Natury. Ważne jest tutaj, że różne atomy mogą się dzielić lub przekazywać sobie elektrony i to właśnie te procesy napędzają formowanie się cząsteczek. Chemia polega na ruchu elektronów, a ruch elektronów może prowadzić do złożoności.

Potwory Frankensteina

Wszystkie dyskusje o historycznych szczegółach powstania współczesnego naukowego poglądu na świat są przynajmniej częściowo subiektywne, a akademicy poświęcają swoje całe kariery na badanie tego zagadnienia. Gdyby dzisiejszego fizyka poprosić o zidentyfikowanie pierwszej współczesnej teorii naukowej, prawdopodobnie wskaże na *Principia* Newtona opublikowane w 1687 roku, nie tylko dlatego, że fizyka Newtona wciąż jest wykorzystywana i nauczana w ramach kursu fizyki XXI wieku. Jeżeli zechcesz wysłać sondę na Plutona, obliczenia nawigacyjne wykonasz na podstawie praw Newtona. *Principia* stanowią kompletny i samowystarczalny model geometrii i dynamiki Układu Słonecznego, ze Słońcem w centrum i Ziemią krążącą wokół niego wraz z pozostałymi planetami. Gdyby w 1687 roku istniał jeszcze ktoś, kto twierdziłby, że Ziemia zajmuje wyjątkowe fizyczne miejsce, stacjonarne względem gwiazd, to musiałby się zamknąć po przeczytaniu *Principia*.

Przejście z etapu burzliwych debat o kosmosie z Ziemią w samym jego środku do niemal powszechnego przyjęcia naszego przypadkowego miejsca w fizyce było procesem stosunkowo szybkim po tym, jak Kopernik i inni otwarli intelektualne tamy w XVI wieku. Łatwo tutaj przeoczyć filozoficzne, intelektualne i teologiczne burze towarzyszące łączeniu astronomii obserwacyjnej z fizyką teoretyczną.

Newton urodził się w 1643 roku, zaledwie rok po śmierci Galileusza, a jak wiemy, Galileusz napotkał dość silny opór, wspierając teorię Ziemi poruszającej się po orbicie. Pisałem już o swoim zachwycie pięknym tekstem Keplera pt. *Podarek, czyli o sześciokątnych płatkach śniegu*; to wyraźnie współczesny głos wypełniony mądrością, ciekawością i ostrożnym podejściem do badania Natury, który rezonuje od stuleci. Galileusz charakteryzował się podobną pewnością i obyciem ze słowem. Tutaj, pisząc do Keplera w 1610 roku, we wspaniale zadziorny sposób komentuje lobby obstające przy Wszechświecie z Ziemią w centrum:

Mój drogi Keplerze, chciałbym, abyśmy mogli się śmiać ze zdumiewającej głupoty powszechnego motłochu. Co możesz powiedzieć o głównych filozofach tej akademii, którzy są wypełnieni upartością żmii i nawet nie chcą spojrzeć ani na planety, ani na księżyc czy na teleskop, choć oferowałem im taką możliwość po tysiącokroć? Naprawdę, tak jak żmija nieruchomieje, tak ci filozofowie zamykają oczy na światło prawdy.

Galileusz czułby się na Twitterze jak w domu.

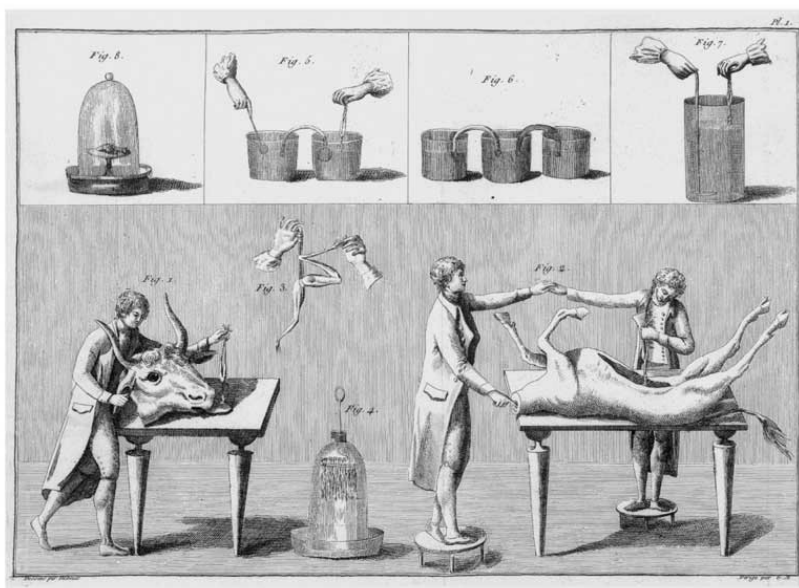
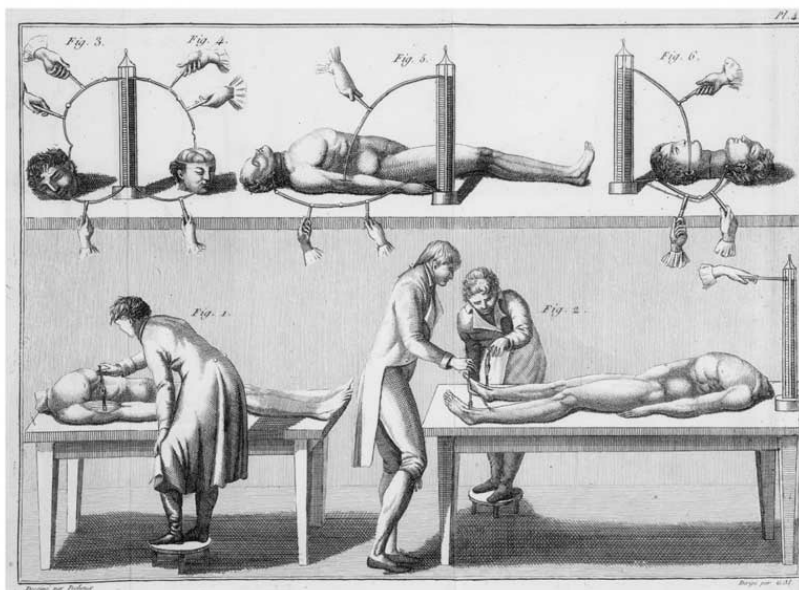
Degradacja naszego miejsca w fizycznym centrum wszystkiego została powszechnie przyjęta pod koniec XVII wieku i tak już pozostało do dziś. Całość naszego obserwowalnego wszechświata to nieistotna kieszonka szerszego kosmosu, który rozciąga się poza widzialny horyzont i jest wyobraźalnie nieskończony; wydaje mi się, że społeczeństwo pogodziło się ze swoją fizyczną nieistotnością. Trudno jest patrzeć na zdjęcie przedstawiające ultragłębokie

pole Hubble'a, zawierające ponad 10 tysięcy galaktyk na fragmencie nieba, jaki przestłonisz wyciągniętym przed siebie kciukiem, i wciąż czuć się ważnym. Ale nasza duchowa degradacja to zupełnie inna sprawa. Mówiąc „duchowa degradacja”, mam na myśli uświadomienie sobie, że nasze istnienie nie ma większego znaczenia niż nasze fizyczne położenie we Wszechświecie. Z pewnością tak jest, jeżeli życie stanowi nieunikniony skutek działania tego samego zestawu praw Natury, które odpowiadają za istnienie gwiazd i planet. Ziemia musi być jednym z niezliczonych miliardów światów w Drodze Mlecznej. Nie oznacza to jednak, że nasza cywilizacja nie jest czymś, co powinniśmy celebrować i o czego przetrwanie należy walczyć – mam wrażenie, że cywilizacje są niezwykle rzadkie, nawet jeżeli życie występuje we Wszechświecie powszechnie.

Możemy założyć, że obecnie w Drodze Mlecznej istnieje tylko kilkanaście cywilizacji – być może jesteśmy jedyni? – a to sprawia, że Ziemia jest rzadkim i cennym zjawiskiem naturalnym. Wartość zależy od oceniającego wartość i choć nieracjonalne byłoby przypisywanie jakiegoś uniwersalnego znaczenia naszemu chwilowemu istnieniu w nieskończonym kosmosie, nie widzę żadnych przeciwwskazań do użycia tego słowa. Inteligencja nadaje znaczenia Wszechświatowi, nawet jeśli tylko na skalę lokalną i ograniczoną czasowo. Nasze istnienie oczywiście znaczy coś dla mnie i dla ciebie i nie przyjmuję twierdzenia, że nasza fizyczna nieistotność i czasowa ulotność dewaluuje nasze życie w jakimkolwiek stopniu.

To obszar, w którym filozofia i teologia wciąż wykazują pewną dominację, ale nauka nieuchronnie dociera na to intelektualne bezludzie, ponieważ rozważanie pochodzenia życia to rozważanie pochodzenia ludzkości, z całym bagażem intelektualnym, który ją charakteryzuje. Czy możliwe jest, że moje uczucia, moja moralność, moje nadzieje, obawy i miłość zostaną wytłumaczone w jakimś przyszłym biologicznym dziele na miarę *Principia*, równie pewnie co ruchy planet wytłumaczone przez Newtona? Czy moja wolna wola jest tylko iluzją wynikającą z działania deterministycznych praw fizyki? Czy cienie na ścianach platońskiej jaskini sprawiły, że wydało mi się, iż jestem szczególny, tak jak kiedyś zrobiły to rotujące gwiazdy na niebieskich sferach? To pytania o innej skali emocjonalnej niż pytania o fizyczne położenie we Wszechświecie, i oczywiście jest, że pozostają one bez odpowiedzi w umysłach wielu, choć to akurat jest nieistotne w tym sensie, że o szczerości teorii naukowej nie decyduje się w referendum.

Myślę, że nasza współczesna wiedza o biologii i badania naukowe nad pochodzeniem życia muszą stanowić istotną część wszelkich poważnych debat filozoficznych o znaczeniu i wartości życia ludzkiego. Mimo to, zważając na olbrzymią instynktowną siłę naszych własnych doświadczeń, prawdopodobnie nie jest paradoksem fakt, że miejsce pojedynczego człowieka we Wszechświecie wciąż jest tematem głębokiej debaty, a fizyczna lokalizacja i znaczenie naszej planety już nie.



Ryciny przedstawiają Giovanniego Aldiniego i jego współpracowników przeprowadzających eksperymenty na zwłokach ludzkich i zwierzęcych, mających na celu próbę ich ożywienia.

Naukowe dążenia do wytłumaczenia pochodzenia życia stały się modne pod koniec XIX wieku. Postępy chirurgii, której pionierem byli anatomicy i chirurdzy tacy jak John Hunter, uskrzydłone odkryciami z zakresu elektryczności i magnetyzmu zapoczątkowanymi przez Faradaya i jego współczesnych, połączyły się we wspólne poszukiwanie „zasady vitalnej” – ożywczej siły oddzielającej materię żywą od nieożywionej. Już w 1780 roku Luigi Galvani „ożywił” nogi żab, przepuszczając przez nie prąd elektryczny – to podejście, które osiągnęło niesławny zenit w rękach Giovanniego Aldiniego, bratanka Galvaniego, w dniu 17 stycznia 1803 roku. Aldini wystarał się o zwłoki skazanego mordercy George’a Forstera, prosto

z szubienicy w więzieniu Newgate, i próbował je ożywić na scenie przed zszokowaną publicznością. Gazeta „Newgate Calendar” relacjonowała to tak:

Przy pierwszym przyłożeniu łuków do twarzy szczęki zmarłego zaczęły drgać, przyczepione do niej mięśnie okropnie się wygięły, a lewe oko się otworzyło. Ramiona na przemian podnosiły się i opadały, pięści zaciskały i uderzały brutalnie o stół, na którym leżało ciało, oddychanie zostało sztucznie przywrócone (...) zapalona świeca umieszczona przy ustach została kilkakrotnie zgaszona (...). Żywołność mogłaby być w pełni przywrócona, gdyby wiele dalszych okoliczności nie spowodowało, że to niewłaściwe.

Rosnąca fascynacja i niepokój otaczające naukowe zapędy w tak wrażliwe obszary została uchwycona w powieści *Frankenstein, czyli współczesny Prometeusz* autorstwa Mary Shelley. Pisarz zazwyczaj wie, że jego praca się powiodła, gdy jej recenzje są spolaryzowane; oznacza to, że operuje na niepewnym gruncie intelektualnym. Poeta i powieściopisarz sir Walter Scott pozytywnie wypowiadał się o powieści, aczkolwiek ówczesne plotki mówiły, że być może to on sam był jej autorem – Shelley opublikowała swoje dzieło anonimowo. Krytyk piszący dla „Quarterly Review” opisał je jako „tkankę okropnego i przerażającego absurdu”. Muszę to zapamiętać i starać się napisać coś, co także mogłoby otrzymać taką notę.

Dzisiaj potwór Frankensteina to stwór z horrorów klasy B, jednak w powieści Shelley ożywiona postać jest wymownym i poruszającym głosem.

A czym byłem ja? Nie miałem najmniejszego pojęcia, jak powstałem ani kto jest moim stwórcą (...). Ani ojciec nie czuwał przy mnie w latach dzieciństwa, ani matka nie obdarzała mnie uśmiechem i pieszczotą (...).

Dwa wieki później, przy całej naszej współczesnej medycynie, biologii ewolucyjnej i genetyce, z których możemy czerpać, wciąż nie jesteśmy w stanie znaleźć miejsca między naszym pragnieniem odkrycia powodu naszego istnienia a naukowym konsensusem, że taki powód nie istnieje poza nieuchronnym działaniem praw Natury na młodej i aktywnej planecie. Najbardziej interesujące pytania to te, które wymagają pogodzenia stanowisk pozornie niedających się pogodzić.

O powstawaniu gatunków

Ramy wnioskowania o sensie życia na Ziemi

Czterdzieści lat po publikacji *Frankensteina*, w listopadzie 1859 roku *O powstawaniu gatunków* Karola Darwina dostarczyło nam koncepcyjnych ram do naukowego badania pochodzenia życia, tak jak ogólna teoria względności Einsteina dostarczyła nam koncepcyjnych ram do badania pochodzenia Wszechświata. Darwin odkrył, że ogromna różnorodność gatunków na Ziemi, niezliczonych najpiękniejszych form, jak je nazywał, jest ze sobą spokrewniona. Wiemy teraz, że miał rację, jednak dla Darwina była to radykalna propozycja, akt geniuszu, biorąc pod uwagę dostępne mu dowody. Był w stanie dojść do tego wniosku, proponując mechanizm, w którym nowe gatunki powstają ze starszych: ewolucja przez dobór naturalny.

W populacji będziemy mieli do czynienia ze zróżnicowaniem genetycznym, o którym teraz wiemy, że jest spowodowane losowymi mutacjami kodu genetycznego, zmianami ułożenia genów przez pleć i wieloma innymi mechanizmami. Ponieważ organizmy przekazują geny swoim potomkom, kombinacje genów, które podnoszą prawdopodobieństwo przetrwania organizmu wystarczająco długo, aby mógł on się rozmnożyć, będą coraz częstsze w populacji. W ten sposób populacje bardzo szybko kształtują się poprzez interakcje ze środowiskiem i innymi organizmami żywymi. Gdy populacje się rozdzielają i mają ograniczony lub zerowy kontakt ze sobą, procesy te sprawiają, że zaczynają się one różnić genetycznie, fizycznie i pod względem zachowania – w ten sposób powstają nowe gatunki. Rozdzielenie może być geograficzne, tak jak w przypadku unikatowej flory i fauny Madagaskaru, ale może być też skutkiem pojawiania się nowych nisz środowiskowych w danym miejscu.

Kiedy już przyjmujemy, że gatunki nie pojawiają się w pełni uformowane, nie pozostają niezmienione i będą nieuchronnie ewoluować w nowe gatunki, jeżeli zostaną rozdzielone w czasie i przestrzeni oraz wystawione na różne presje selekcji, możliwe staje się, iż wszystkie żywe organizmy mogą mieć tego samego wspólnego przodka w pewnym momencie przeszłości. Jak pisał Darwin: „A jeśli się na to zgodzimy, musimy też założyć, że wszystkie istoty organiczne, jakie kiedykolwiek żyły na Ziemi, pochodzą od jakiejś wspólnej formy pierwotnej”.

Darwin nie wiedział, czy to prawidłowy wniosek, ale wiedział, że jest on możliwy. W liście do przyjaciela i kolegi po fachu Josepha Hookera poszedł dalej, spekulując o początku życia na Ziemi w jakimś pierwotnym „ciepłym małym stawie”. Mówi się, że jego wyobrażenia zaczęła pracować, gdy przeczytał o eksperymencie, który dowiódł, iż niektóre rodzaje pleśni są w stanie przetrwać gotowanie.

Często się mówi, że wszystkie warunki do pierwszego powstania organizmu żywego są obecne i mogły być zawsze obecne. Ale jeżeli (i to jakie wielkie jeżeli!) moglibyśmy rozważyć jakiś ciepły mały staw, z wszelkiego rodzaju amoniakiem, solami fosforowymi, światłem, ciepłem,

elektrycznością itd., w którym powstał związek białkowy gotowy do dalszych, bardziej złożonych zmian. Obecnie taka materia natychmiast uległaby pożarciu lub wchłonięciu, lecz nie byłoby tak przed powstaniem organizmów żywych.

Trudno przesadzić, mówiąc, jak wielkim wizjonerem był Karol Darwin. To był rok 1859, trzy lata przed tym, jak lord Kelvin, bazując na ówczesnej wiedzy fizycznej, ogłosił, że Słońce, a tym samym Ziemia nie mogą mieć więcej niż 30 milionów lat. Rozwiązanie tego problemu omówimy w rozdziale czwartym zatytułowanym *Kolor*. Nie sposób sobie wyobrazić, w jaki sposób jakaś forma prymitywnego jednokomórkowego organizmu mogła powstać z nieożywionych składników, a następnie przekształcić się w człowieka w procesie doboru naturalnego na przestrzeni kilku milionów lat. Kilka miliardów lat to już zupełnie inna kwestia. Darwin – całkiem prawidłowo, jak się później okazało – postanowił zignorować fizyków, a wraz z upływem lat pojawiały się kolejne dowody wspierające jego ideę ciepłego małego stawu, geologicznego inkubatora, w którym „powstał pierwszy organizm będący protoplastą niezliczonych wymarłych i żyjących wciąż potomków”.

Najstarsze życie na Ziemi

Jeżeli chcemy stworzyć naukowy obraz ciepłego małego stawu Darwina w najszerszym sensie, czyli jako inkubatora pierwszego życia na Ziemi, musimy zrozumieć, jakie warunki panowały na naszej planecie, gdy powstawało życie. Należy także poszukać dowodów na najwcześniejsze życie, abyśmy mogli stwierdzić, jak daleko w przeszłość potrzebujemy się zapuścić. To zadanie nietrywialne (by użyć ulubionego wyrażenia fizyków), ponieważ musimy być pewni, że te zdarzenia zaszły dawno temu.

Istnieją mocne dowody na to, że życie istniało 3,4 miliarda lat temu – są to mikroskamieniałości złożone w osadach piaskowca w Marble Bar w Australii Zachodniej. Skamieniałe obiekty na zdjęciach z pewnością przypominają pozostałości po żywych komórkach, ale wygląd może zmylić. Na szczęście możliwe jest przeprowadzenie chemicznych badań tych dawnych struktur i faktycznie naukowcom udało się odkryć sygnatury charakterystyczne dla pochodzenia biologicznego. Stężenie różnych izotopów węgla w strukturach może być wykorzystane jako biomarker. Węgiel posiada sześć protonów w jądrze atomowym, a najpowszechniej występująca forma posiada sześć neutronów. To tak zwany izotop węgla-12. Istnieje jeszcze jedna naturalnie występująca forma węgla z siedmioma neutronami w jądrze – tak zwany węgiel-13. Życie woli korzystać z węgla-12, dlatego też osady węgla powstałe w procesach biologicznych powinny wykazywać nadmiar lżejszego izotopu. Tak też jest w przypadku struktur w Marble Bar. W proponowanych ścianach komórkowych zarejestrowano ponadto wysokie stężenie azotu, co także wskazuje na ich biologiczne pochodzenie. Większość biologów przyjmuje, że te i inne próby z innych miejsc stanowią mocne dowody na to, iż jednokomórkowe organizmy znane jako prokaryoty obficie występowały na Ziemi 3,4 miliarda lat temu.

Najstarsze znane obiekty na Ziemi odkryto w odległym regionie Australii Zachodniej, na północ od miasta Perth, i co zdumiewające, zawierają one ślady biologiczne. Cyrkony to kryształy znajdowane w skałach magmowych (wulkanicznych). Pomimo rozmiarów nie większych od ziarenka piasku i niepozornego wyglądu mają one niesamowitą wartość naukową, ponieważ stanowią niemal niezniszczalne kapsuły czasu, które niosą w sobie własne zegary wewnętrzne.

Podczas gdy cyrkony powstają z ochładzającej się lawy, drobne próbki gazów atmosferycznych są w nich na zawsze zamknięte. Atomy radioaktywnego uranu także są więzione w strukturze kryształu, a używając wysoce precyzyjnych technik datowania metodą U-Pb, można określić ich wiek z dokładnością do kilku milionów lat. Wiek próbki z Erawandoo Hill w pasmie górskim Jack Hills został ostatnio określony na 4,404 +/- 8 milionów lat, przez co stała się ona najstarszym dotąd odkrytym obiektem pochodzenia ziemskiego. Wiek Ziemi szacuje się na 4540 +/- 50 milionów lat, a to znaczy, że te kryształy powstały, gdy młoda Ziemia ulegała ochładzaniu. Analiza uwiecznionych gazów dostarczyła

zaskakujących wyników, stając się dużym wyzwaniem dla powszechnie przyjmowanego obrazu młodej Ziemi jako hadeskiego piekła lawy i toksycznych gazów atmosferycznych. Ziemia była już niebieską planetą, gdy niektóre ze starszych cyrkonów powstawały, a na jej powierzchni płynęła już woda. Poziomy tlenu w atmosferze były niskie, co nie jest żadnym zaskoczeniem, ponieważ fotosynteza pozostaje podstawowym źródłem tlenu w atmosferze, niemniej jednak poza tlenem pierwotna atmosfera wydaje się podobna do dzisiejszej, charakteryzując się dużymi ilościami azotu, dwutlenku węgla i pary wodnej, jak też wyższym poziomem dwutlenku siarki pochodzącego z wulkanów. Te nowe dowody wskazują, że bardzo młoda Ziemia była światem o umiarkowanych temperaturach, stabilnych oceanach i znanym nam powietrzu.

W listopadzie 2015 roku zespół z uniwersytetów UCLA oraz Stanford opublikował artykuł naukowy opierający się na analizie ponad 10 000 cyrkonów z regionu Jack Hills, powstałych ponad 4,1 miliarda lat temu^[11]. Cyrkony te zawierały depozyty węgla i podobnie jak skamieniałości z Marble Bar stosunek węgla-12 do węgla-13 wskazuje na ich biologiczne pochodzenie. To zaskakujący wynik; jak zauważył Mark Harrison, jeden z członków zespołu, sama myśl, że życie istniało na Ziemi miliard lat po jej powstaniu, ocierałaby się niemal o herezję zaledwie 20 lat temu. Jeżeli interpretacja badań nowych cyrkonów jest prawidłowa, jak to mówi Harrison: „życie mogło powstać na Ziemi niemal natychmiast”, a ziemską biosfera mogła już dobrze ustalić się tutaj 4,1 miliarda lat temu.

POŁĄCZENIE
MIĘDZY ŻYWĄ
A MARTWĄ
MATERIĄ JEST
GDZIEŚ POMIĘDZY
KOMÓRKĄ
A ATOMEM.

J.B.S. HALDANE, *THE ORIGIN OF LIFE*, 1929

Rosnący zasób dowodów na to, że życie zaczęło się na Ziemi niemal tak szybko, jak tylko mogło, nadaje jakiegoś wymiaru nieuchronności powstawania biologii z chemii. To oczywiście wyłącznie subiektywny osąd, ponieważ na jego poparcie mamy tylko jedną planetę, a trudno wyciągać wnioski z próbki o rozmiarze jeden. To kolejny powód, dla którego poszukiwanie życia na Marsie, na księżycach Jowisza lub Saturna czy na egzoplanetach krążących wokół pobliskich gwiazd jest tak ważne. O badaniach planet spoza Układu Słonecznego więcej będziemy mieli do powiedzenia w rozdziale czwartym zatytułowanym *Kolor*. Niemniej jednak stwierdzenie, że życie mogło powstać „niemal natychmiast”, jest interesujące. Christian de Duve, belgijski biochemik i laureat Nagrody Nobla, twierdzi, że reakcje chemiczne zazwyczaj zachodzą bardzo szybko albo wcale. Skoro biologia to chemia, więc zakładając odpowiednie warunki, biologia powinna powstawać bardzo szybko albo wcale, a dowody zawarte w cyrkonach z Australii Zachodniej także wskazują podobny kierunek.

Ciepły mały staw?

Mysł, że życie mogło po prostu „nagle się pojawić” z zupy nieożywionych składników, może ci się wydawać albo prawdopodobna, albo śmieszna. W połowie XIX wieku część wielkich nazwisk świata nauki zdecydowanie opowiadała się po stronie śmieszności. Pomysł, że życie mogło powstać z martwej materii – tak zwana teoria samoródtwa – dyskutowany jest od czasów Arystotelesa. Nic w tym nierozsądnego, wszak robaki wydają się pojawiać w pełni uformowane wprost z gnijącego mięsa. Seria eksperymentów przeprowadzonych przez Louisa Pasteura, a później Johna Tyndalla zdawała się odrzucać ten pogląd, a tym samym doprowadziła do tak zwanego prawa biogenezy, czyli idei mówiącej, że organizmy żywe mogą powstawać tylko z innych organizmów żywych. Jak w 1864 roku pisał, nieco nieskromnie, Pasteur o swoim eksperymencie: „Nigdy już doktryna samoródtwa nie podniesie się po śmiertelnym ciosie, jaki zadał jej ten prosty eksperyment” oraz „ci, którzy dali się zwieść swoim nieprawidłowo przeprowadzonym eksperymentom pełnym błędów, których nie umieli dostrzec ani uniknąć”.

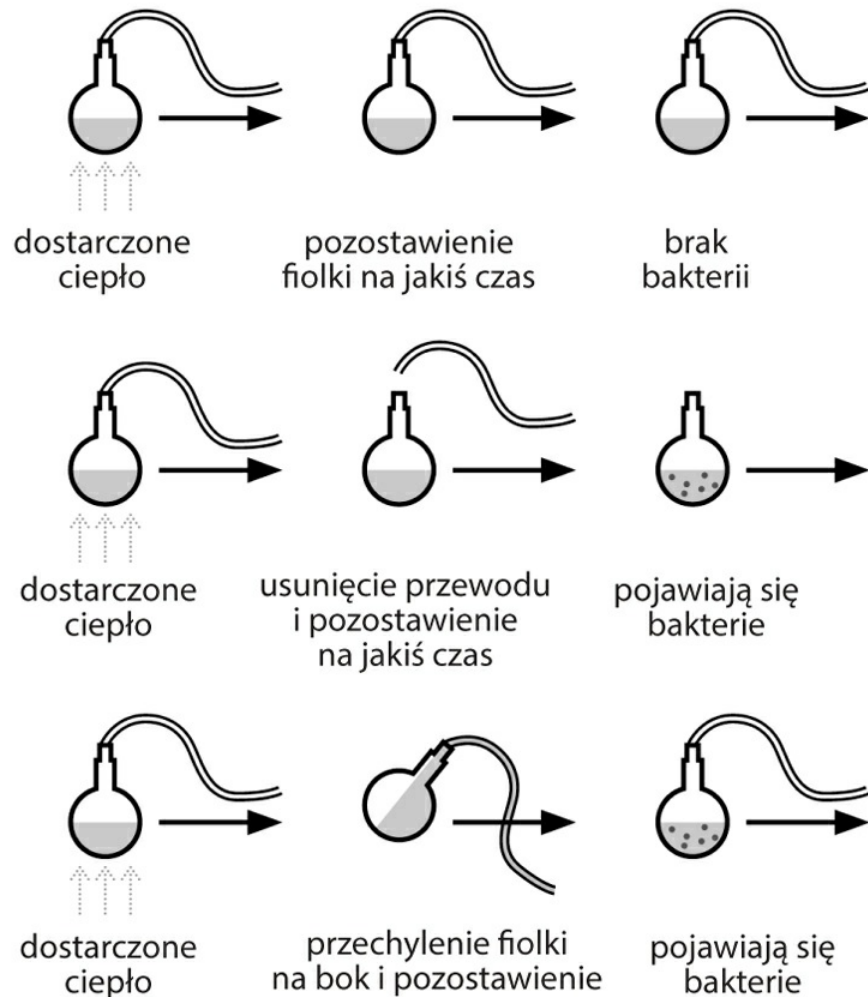
To się dopiero nazywa pomylić spontaniczne powstanie zdrowego, złożonego organizmu, takiego jak robak czy nawet komórka bakterii, ze spontanicznym powstaniem podstawowej biochemii życia – co być może jest zrozumiałe, gdy nie ma żadnego znanego mechanizmu powstawania złożonych organizmów żywych z organizmów prostszych. To jeden z wielu skarbów teorii ewolucji poprzez dobór naturalny opracowanej przez Darwina, która opisuje taki mechanizm, i jak sam Darwin sobie uświadomił, to sprawia, że samoródtwo życia jest co najmniej możliwością; życie może zacząć się od czegoś prostego. Nie wiem, dlaczego Pasteur nie dostrzegł, że *O pochodzeniu gatunków*, dzieło opublikowane pięć lat przed jego zdecydowanym stwierdzeniem, zawiera wyjście z tego problemu. Pozostawię to do rozważenia historykom; być może go nie czytał.

Zdecydowane odrzucenie przez Pasteura teorii samoródtwa mogło mieć jakiś skutek, ponieważ poszukiwanie początków życia na Ziemi stało się niemożliwe na pół wieku. Być może to przesada twierdzić, że dwa ważne i błyskotliwe eseje autorstwa szanowanych naukowców, opublikowane w odstępnie kilku lat od siebie w latach dwudziestych XX wieku, przywróciły poszukiwania początków życia kręgom akademickim, ale z pewnością symbolizują one powrót zainteresowania tematem. Obydwa artykuły noszą tytuł *Pochodzenie życia*. Pierwszy został napisany w 1922 roku przez rosyjskiego biochemika Aleksandra Oparina, aczkolwiek tłumaczenie na język angielski ukazało się dopiero w 1967 roku. Z kolei autorem drugiego był niepokorny, eksperymentujący biolog J.B.S. Haldane, który opublikował go w periodyku „Rationalist Annual” w 1929 roku. Zawsze trudno jest dobrać przymiotniki, które dobrze opisałyby Haldane’a; być może najlepiej jest powiedzieć „błyskotliwy” i na tym zakończyć sprawę. Mój ulubiony cytat z niego dotyczy pękniętego bębna, którego nabawił się w komorze dekompresyjnej podczas badania skutków różnych poziomów tlenu na organizm ludzki: „Zazwyczaj bębenek się goi; a jeżeli pozostaje w nim otwór, to choć doznajemy

uszczerbku na słuchu, możemy wydmuchiwać dym papierosowy przez ucho, co jest swego rodzaju osiągnięciem w towarzystwie”.

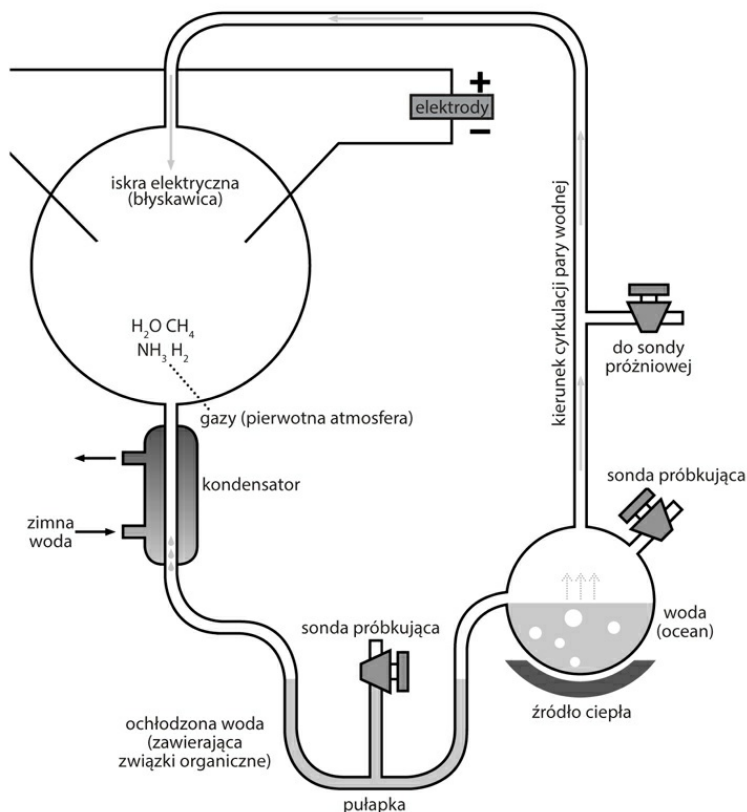
Żaden z tych dwóch naukowców nie był świadomy istnienia pracy drugiego, ale niezależnie od siebie doszli do podobnych wniosków w swoich dobrze uzasadnionych esejach. Obydwoje zaczęli od postawienia oczywistego pytania bazującego na stwierdzeniu Pasteura, że życie może powstać tylko z życia. Oparin pisał:

Eksperymenty Pasteura wykazały ponad wszelką wątpliwość, że spontaniczne powstanie mikrobów w środowisku organicznym zachodzi. Wszystkie żyjące organizmy powstają z zarazków, to znaczy swoje początki zawdzięczają innym organizmom żywym. Jednak jak powstały pierwsze organizmy żywe? Jak zaczęło się życie na Ziemi?



Eksperyment pasteryzacji autorstwa Louisa Pasteura przedstawia fakt, że rozlanie płynu zostało spowodowane przez cząsteczki w powietrzu, a nie przez samo powietrze. Eksperymenty te

stanowiły istotne dowody wspierające teorię chorób zakaźnych.



Aparat Stanleya Millera pozwolił fioletowi zawierającej metan, amoniak i wodór na symulację rzadszej atmosfery Ziemi, a fiolet z wodą ogrzewaną do postaci pary wodnej i z parą elektrod na symulowanie obecności błyskawic. Tak stworzona „pierwotna zupa” została następnie dostarczona do zamkniętego układu, w którym uległa ochłodzeniu i kondensacji w pułapce na dnie.

Idea mówiąca, że życie mogło zacząć się poza Ziemią, jest podejmowana przez obu autorów i odkładana na bok. Może i jest prawidłowa, jak już wspominaliśmy, ale nie stanowi przydatnej hipotezy, ponieważ jak zauważa Oparin: „jest ona tylko odpowiedzią na pytanie o pochodzenia życia na Ziemi, lecz w żaden sposób nie rozwiązuje problemu pochodzenia życia jako takiego”.

Oparin skupia się następnie na różnicy między biologią a chemią:

Czy mamy jakiegokolwiek logiczne prawo zakładać jakąś fundamentalną różnicę między tym, co żyje, a tym, co jest martwe? Czy na Ziemi istnieją jakiegokolwiek fakty przekonujące nas, że życie istnieje od zawsze i że ma tak mało wspólnego z materią martwą, że nie mogło nigdy, pod żadnym wpływem, z niej się uformować?

Jego odpowiedź jest jednoznacznie przecząca.

Specyficzną osobliwością organizmów żywych jest to, że w nich zebrana i zintegrowana została ekstremalnie skomplikowana kombinacja dużej liczby właściwości i cech, które są obecne osobno w różnych martwych, nieorganicznych obiektach. Życie nie charakteryzuje się żadnymi szczególnymi właściwościami, lecz określonym, specyficznym połączeniem tych właściwości.

Haldane jest bardziej zwięzły:

Połączenie między żywą a martwą materią jest gdzieś pomiędzy komórką a atomem.

To bardzo ważne. Jeżeli mamy zrozumieć życie jako zjawisko fizyczne, musimy odsunąć na bok zewnętrzne komplikacje związane z naszym ludzkim doświadczeniem życia. Nie zadajemy pytań o świadomość, o pochodzenie uczuć czy moralność, o dobro czy zło, o nieskończoną złożoność wytworzoną *przez* życie. Powinniśmy się skupić tylko na różnicy między atomem a pojedynczą komórką i na tym, w jakich warunkach atomy mogą same się łączyć w struktury, które rozpoznałybyśmy jako żywe.

Eseje Haldane'a i Oparina stanowią lekcje tego, jak należy ostrożnie rozważać trudne problemy. Zdumiewające, jak bardzo ich spekulacje zbliżyły się do obecnie przyjmowanych teorii o pochodzeniu życia, zwłaszcza biorąc pod uwagę ograniczoną wówczas wiedzę z zakresu biochemii. Szczegóły reparacji i fotosyntezy dopiero zaczynały się pojawiać, a do odkrycia DNA potrzeba było jeszcze pokoleń. Obydwa eseje wskazują najbardziej prawdopodobne położenie początków życia w „pierwotnym” lub „prymitywnym” oceanie, gdzie – słowami Oparina – „poszczególne składniki substancji organicznych unoszące się w wodzie spotykały się i łączyły ze sobą”, aż – słowami Haldane'a – „osiągnęły konsystencję gorącej rzadkiej zupy”.

Idea „prebiotycznej zupy”, ciepłego małego stawu Darwina, wspierająca stopniowy rozwój coraz bardziej złożonej chemii organicznej, wzbudzonej przez promieniowanie ultrafioletowe i reaktywną atmosferę, to prawdopodobnie najpowszechniejszy obraz początków życia w dzisiejszej kulturze popularnej. Po części odpowiedzialny jest za to słynny eksperyment przeprowadzony w 1953 roku przez laureata Nagrody Nobla, chemika Harolda Ureya oraz jego doktoranta Stanleya Millera na Uniwersytecie Chicagowskim. Nie jest niczym zaskakującym, że eksperyment Ureya-Millera natychmiast pobudził wyobraźnię opinii publicznej, wygodnie przyćmiewając odkrycie struktury DNA przez Cricka i Watsona ogłoszone w tym samym roku. Haldane zakończył swój esej, tworząc wyraźny i przekonujący obraz tego, czego się podjęli: „Powyższe wnioski są spekulacjami. Pozostaną nimi do czasu, gdy uda się zsyntetyzować organizmy żywe w laboratorium biochemicznym. Do tego nam jeszcze dużo brakuje”.

Urey i Miller stworzyli modelowy ocean pierwotny wewnątrz pięciolitrowego, sterylizowanego szklanego zbiornika wypełnionego metanem, amoniakiem i wodorem w celu symulowania bardzo reaktywnej redukującej atmosfery, która miała istnieć na młodej Ziemi. Para elektrod wytwarzała wewnątrz zbiornika iskry, imitując obecność błyskawic. Powstała w ten sposób „zupa” została następnie przeniesiona do chłodniejszego zbiornika, dawnego

oceanu, z którego można było pobierać próbki. Aparat przedstawiono [na stronie 204](#).

Po jednym dniu pierwotny ocean wewnątrz zbiornika zmienił kolor na intrygujący odcień różu. Eksperyment trwał bez przerwy przez ponad tydzień, kiedy to ocean w sterylizowanym zbiorniku przeanalizowano, szukając w nim oznak życia organicznego. Urey i Miller odkryli aminokwasy, składniki budujące białka, podstawowe składniki życia. Opinia publiczna zareagowała wielkim podnieceniem; Miller pojawił się na okładce magazynu „Time” w 1953 roku, podczas gdy Crick i Watson musieli zadowolić się mniej efektownymi stronami w „Nature”. Łatwo zrozumieć, dlaczego eksperyment Ureya-Millera pod wieloma względami przypominał mikroskopijnego *Frankensteina*; fundamentalne składniki życia powstałe z nieożywionych atomów przez iskrę elektryczności. Być może gdyby zupełnie pozostawić na wystarczająco długo, coś by z niej wypełzło.

Sześćdziesiąt lat później eksperyment Ureya-Millera wciąż rzuca długi cień na poszukiwanie źródła życia. Dobór słowa „cień” jest chyba właściwy, ponieważ podstawowe założenie eksperymentu Ureya-Millera jest prawdopodobnie złe. Dowody pozyskane z cyrkonów informują nas, że pierwotna atmosfera Ziemi nie była reaktywnym chemicznym koktajlem amoniaku, metanu i wodoru. Na dodatek twierdzenie, że mieszanina aminokwasów, delikatnie pobudzanych promieniowaniem ultrafioletowym i błyskawicami, na przestrzeni milionów lat połączy się w coś tak złożonego jak żyjąca komórka, jest wysoce nieprawdopodobne. Jak pisał Nick Lane w swojej wspaniałej książce *Life Ascending*, jeżeli weźmiemy sterylną puszkę zupy z półki i pozostawimy ją na kilka milionów lat, od czasu do czasu traktując ją prądem, jedyne, co się stanie, to to, że tworzące ją cząsteczki ulegną rozpadowi. Mało prawdopodobne jest, aby pojawiło się tam coś *bardziej skomplikowanego* od pierwotnych składników. To już problem fizyki, a mówiąc dokładniej – jednej z dziedzin fizyki znanej jako termodynamika.

Życie, termodynamika i entropia

Nawet najprostsza komórka żywa to misterna, wysoce uporządkowana struktura. Najmniejszymi organizmami żywymi na Ziemi są bakterie z gatunku *Mycoplasma*. Ich średnica to zaledwie dwie dziesięciotysięczne milimetra, choć to wciąż ponad miliard razy większa objętość od atomu węgla. Najprostsze znane komórki żywe pod względem liczby podstawowych składników biologicznych to bakterie symbiotyczne znane jako *Carsonella ruddii*, zawierające tylko 182 różne białka. To niewiele, sądząc po tym, co mają robić, tj. między innymi replikować się, ale wciąż są to ekstremalnie złożone obiekty składające się z miliardów pojedynczych oddziałujących ze sobą atomów.

Problem z hipotezą pierwotnej zupy jest taki, że coś tak złożonego jak pojedyncza komórka nie powstanie losowo w izolowanym ciepłym stawie, niezależnie od tego, jak długo będziemy czekać. Fizyka stojąca za tym stwierdzeniem jest zakodowana w jednym z fundamentalnych praw Natury znanym jako druga zasada termodynamiki. Mówi ona, że wraz z upływem czasu porządek ulega dezorganizacji. Rozbite jajko nigdy się nie scali. Martwy ptak ulega rozkładowi. Straciłem już rachubę co do tego, ile razy wytykano mi, że piosenka, w której produkcję byłem zaangażowany wiele lat temu, zatytułowana *Things Can Only Get Better* (Może być tylko lepiej), stoi w sprzeczności z drugą zasadą termodynamiki. Zgadzam się z tym. Po rozważeniu wielu kwestii można stwierdzić, że „Things Can Only Get Worse” (Może być tylko gorzej).

Druga zasada termodynamiki często wyrażana jest w następujący sposób: entropia izolowanego układu nigdy nie maleje. Najogólniej mówiąc, entropię można sobie wyobrazić jako miarę tego, na jak wiele sposobów elementy składowe układu można ustawić tak, aby wyglądały tak samo, i jest to miara uporządkowania układu. Wyższa entropia oznacza większy brak uporządkowania, podczas gdy niższa entropia oznacza większy porządek. Organizmy żywe są bardzo uporządkowane. Austriacki fizyk Ludwig Boltzmann sformułował tę definicję, a wyrażenie do obliczania entropii układu w ten sposób wyryte jest na jego grobie w Wiedniu:

$$S = k_B \ln W$$

S to entropia, W to liczba sposobów ułożenia składników tak, aby dawały taki sam wynik, k_B to stała proporcjonalności znana jako stała Boltzmanna, a symbol $\ln$ to logarytm naturalny. Wyższa entropia oznacza więcej sposobów ułożenia elementów, niższa konfiguracja entropii to mniej sposobów ułożenia elementów.

Przykład może pomóc w wyjaśnieniu, o co chodzi. Pomyśl o cząsteczkach powietrza w pokoju, bezustannie poruszających się i zderzających się ze sobą. Każda cząsteczka porusza się losowo po pokoju i może pojawić się w każdym jego miejscu z równym

prawdopodobieństwem, jeżeli jej dać dowolnie długi czas. Bardzo mało prawdopodobne jest, że wszystkie cząsteczki skupią się na przykład w jednym rogu pokoju, pozostawiając w reszcie pokoju idealną próżnię. Dlaczego tak się dzieje? Odpowiedzią jest czysta statystyka. Pozwól, że wprowadzimy tu dwa elementy z żargonu naukowego, które pozwolą nam wszystko przejrzeć i łatwo wyjaśnić. To jedyny powód używania jakiegokolwiek żargonu.

Każda unikatowa konfiguracja cząsteczek w pokoju to tak zwany mikrostan układu. Jeżeli chcemy opisać określony mikrostan, musimy znać położenie i prędkości każdej pojedynczej cząsteczki powietrza. Możemy zdecydować, całkiem prawidłowo, że nie jesteśmy tym szczególnie zainteresowani. Bardziej interesują nas rzeczy, które możemy zaobserwować, takie jak rozkład temperatur czy ciśnienia w pokoju. Takie bardziej ogólne, ale bardziej praktyczne scharakteryzowanie stanu pokoju to tak zwany makrostan.

Jeżeli każda pojedyncza konfiguracja cząsteczek powietrza – każdy mikrostan – może pojawić się z równym prawdopodobieństwem^[12], to w takim razie pokój ma większe prawdopodobieństwo odzwierciedlać makrostan odpowiadający największej liczbie mikrostanów. Nawet gdybyśmy zaczęli z wszystkimi cząsteczkami w jednym rogu pokoju, z czasem wypełnią one cały pokój. Nasz układ zawsze będzie zmierzał do makrostanu, składającego się z najwyższej liczby mikrostanów, albo inaczej mówiąc – zawsze będzie zwiększał swoją entropię. W równaniu Boltzmanna to liczba mikrostanów odpowiadających danemu makrostanowi.

To właśnie jest treść drugiej zasady termodynamiki i nie sposób jej podważyć. Dlatego też fizyk sir Arthur Eddington powiedział kiedyś:

Jeżeli ktoś kiedyś wytknie ci, że twoja ulubiona teoria wszechświata nie zgadza się z równaniami Maxwella – trudno, to problem równań Maxwella. Jeżeli przeczą jej obserwacje – cóż, ci eksperymenci czasami się gubią. Ale jeżeli twoja teoria podważa drugą zasadę termodynamiki, nie ma dla ciebie nadziei; twoja teoria może tylko pogłężyć się w najgłębszym upokorzeniu.

Życie wydaje się opierać drugiej zasadzie termodynamiki, ponieważ organizmy żywe są bardzo zorganizowane. Organizmy żywe to makrostany odpowiadające bardzo niewielu mikrostanom, a zatem charakteryzujące się bardzo niską entropią. „Czy prosiłem cię przeto, Stwórco, abyś ulepił mnie z gliny?” Osiemdziesięciokilogramowa masa gliny może posiadać wszystkie składniki niezbędne do stworzenia człowieka (nie może, ale to tylko metafora), lecz większość losowych rekonfiguracji składników doprowadzi do inaczej skonfigurowanej, choć wciąż nierozpoznawalnej masy gliny. Bylibyśmy bardzo zaskoczeni, gdyby nam się poszczęściło i przypadkiem otrzymalibyśmy tę konkretną konfigurację składników, która może usiąść w pozycji wyprostowanej i zacząć rozważać początki życia na Ziemi. Człowiek wydaje się poważnym pogwałceniem zdrowego rozsądku statystyki, fizyk – nawet dwa razy większym, ale w sumie gorzej mnie już nazywano. Bakteria jest niewiele lepsza. O tym także pisaliśmy. Posunęliśmy się tutaj do zastosowania niewielkiej przenośni literackiej, aby dobrze przekazać myśl. Jak już wcześniej zaznaczaliśmy, nie powinniśmy mylić prób tłumaczenia, w jaki sposób z pierwotnej gliny „w jednym ruchu” powstał organizm tak złożony jak

człowiek, gdyż ewolucja poprzez dobór naturalny wykonuje większość tej pracy. Dobór naturalny to proces nielosowy, który może zdumiewająco szybko napędzać wzrost złożoności organizmów żywych. Niemniej jednak ewolucja poprzez dobór naturalny też musi się jakoś zacząć, a to z kolei wymaga pewnej formy kodu genetycznego, który może przekazywać informacje z pokolenia na pokolenie, jak również wszystkich potrzebnych do tego białek i maszynarii niezbędnej do kopiowania i replikacji genów. Wydaje się, że mamy problem.

Jednym z pierwszych naukowców, którzy zajęli się tym ewidentnym paradoksem i zaproponowali rozwiązanie, był Erwin Schrödinger, najlepiej znany ze swoich prac nad teorią kwantową. W 1943 roku Schrödinger dał serię wykładów w Trinity College w Dublinie, w których zadał pytanie: „Jak zdarzenia w przestrzeni i czasie, zachodzące w przestrzennych granicach organizmu żyjącego, można wytłumaczyć za pomocą fizyki i chemii?”. Jak zauważył Schrödinger, odpowiedzią jest fakt, że zdarzenia zachodzące w granicach organizmu nie mogą być rozpatrywane w izolacji, ponieważ organizmy nie są układami izolowanymi. Można je zrozumieć tylko, rozpatrując je jako część sprzężoną ze środowiskiem zewnętrznym. Jeżeli pozwolicie mi na dwie aluzje literackie w jednym zdaniu bez statystycznie mało prawdopodobnego wyczynu zmiany w Morrissey, mógłbym skontrolować Milтона Johnem Donne'em: stwórca nie musi lepić człowieka, bowiem żaden człowiek nie jest wyspą.

Gdybyśmy wzięli 7×10^{27} atomów tworzących przeciętnego człowieka – głównie tlenu, węgla, wodoru, azotu, wapnia, fosforu, potasu, siarki, sodu, chloru i magnezu – i wrzucili je do pojemnika, otrzymalibyśmy jednorodny rozkład atomów o wysokiej entropii przypominający cząsteczki powietrza równomiernie wypełniające pokój. Niezwykle trudne byłoby zachęcenie ich wszystkich do „zebrania się w jednym małym rogu” i uformowania się w człowieka. Być może zachęcisz niektóre składniki atomowe do tworzenia struktur poprzez wrzucenie zapalki do pudła – mielibyśmy wybuch, gdy wodór i tlen połączyłyby się w wodę, ale słusznie zdziwilibyśmy się, gdyby przy okazji powstał człowiek.

Mimo to cząsteczka wody to ułożenie dwóch atomów wodoru i jednego atomu tlenu w układ o niższej entropii, niż gdyby atomy te pozostały ze sobą niezwiązane. Wydaje się zatem, że stanowi to zaprzeczenie drugiej zasady termodynamiki. O co tu chodzi? Odpowiedź na to pytanie jest bardzo ważna. Podczas gdy entropia układu atomów została obniżona w wyniku reakcji chemicznej, uwolniona została duża ilość ciepła. W żargonie naukowym mówimy, że zaszła reakcja egzotermiczna. Doszło do wybuchu. To ciepło wchłonięte przez otoczenie zwiększyło entropię otoczenia o większą wartość niż spadek entropii związany z uformowaniem się cząsteczek wody. Entropia całego układu rośnie więc zgodnie z drugą zasadą termodynamiki.

Organizmy żywe działają w ten sam sposób, gdyby na nie spojrzeć z perspektywy termodynamicznej. Mogą stawać się coraz bardziej uporządkowane, pod warunkiem że spłacą dług, eksportując brak porządku pod postacią ciepła w przestrzeń kosmiczną. Nawet teraz, czytając tę książkę, ty także eksportujesz nieporządek. Przyspieszasz upadek wszystkiego, co istnieje, przez swoje istnienie przyspieszając nadejście czasu znanego jako śmierć ciepła,

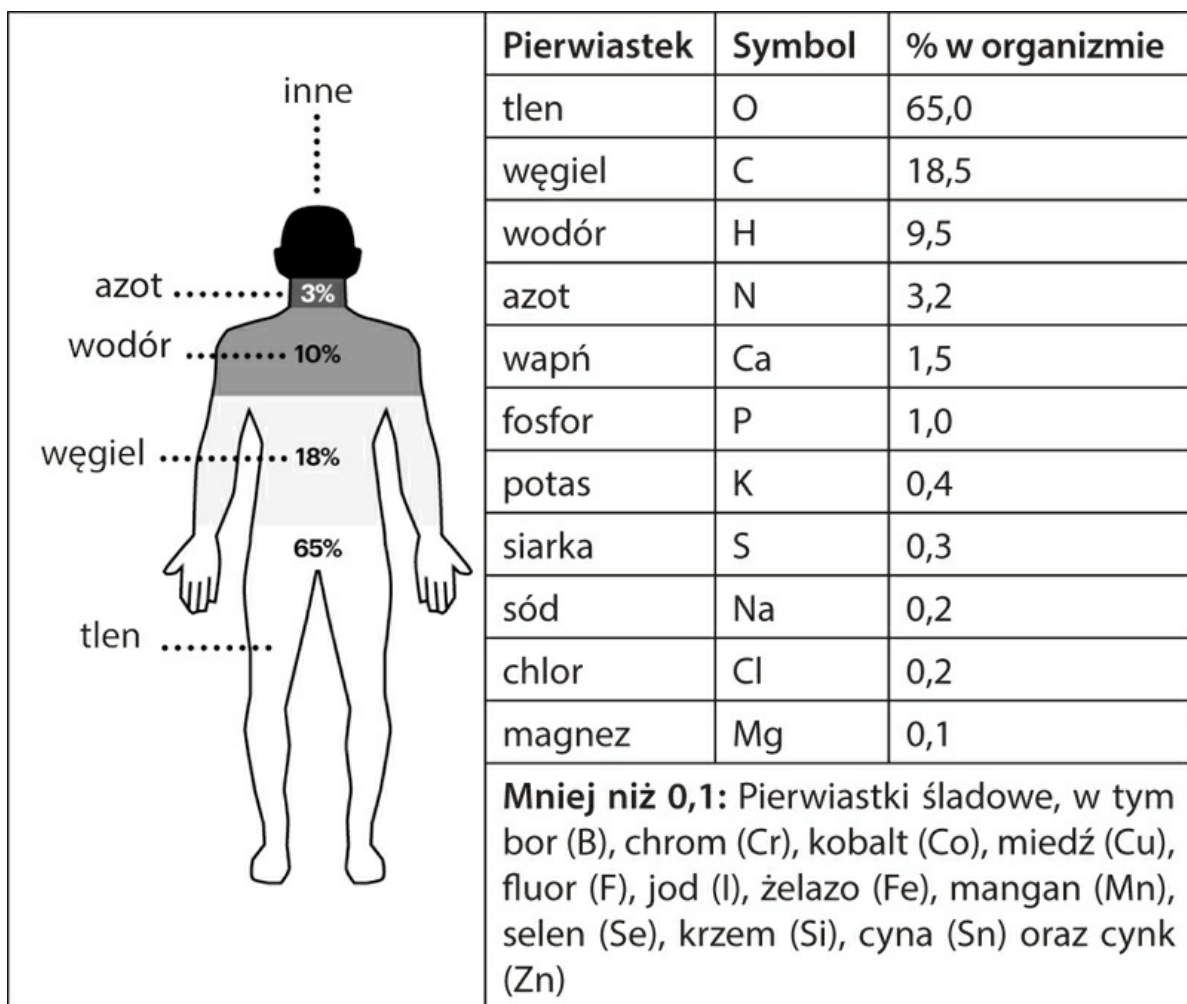
gdy wszystkie gwiazdy już umrą, wszystkie czarne dziury wyparują, a całość stworzenia stanie się jednorodną masą fotonów niezdolnych do przechowywania ani odrobiny informacji o wspaniałej młodości naszego wielkiego Wszechświata. Robisz to, spalając pożywienie w tlenie pochodzącym z powietrza. To reakcja egzotermiczna generująca mnóstwo ciepła do wyeksportowania i kompensująca tymczasową niższą konfigurację entropii twojego marnotrawnego, wysoko zorganizowanego ciała. Znowu zamieniam się w Morrissey'a: Jakie są na to szanse?

Wypełniona tlenem atmosfera Ziemi jest absolutnie niezbędna, aby mogły zachodzić generujące ciepło, eksportujące entropię reakcje, które umożliwiają nam utrzymanie naszej złożonej struktury – to jest kluczowa informacja. Wydaje nam się, że „przeczymy” drugiej zasadzie termodynamiki, ale tak nie jest, ponieważ nie stanowimy układów izolowanych. Jesteśmy częścią większego układu wytraconego z równowagi. Tlenowa atmosfera jest niestabilna i gotowa do reagowania niemal ze wszystkim, gdy tylko się ją sprowokuje. Wykorzystujemy tę nierównowagę do tworzenia i utrzymywania naszej wysoko zorganizowanej struktury, i tak długo jak będziemy oddychać, możemy to robić, kosztem emitowania dużych ilości ciepła. Jesteśmy niczym koła młyna wykorzystujące wodospad do zasilania naszych wewnętrznych fabryk. Gdy wodospad wyschnie, koła się zatrzymają, a fabryka ulegnie rozkładowi.

Niestabilna atmosfera tlenowa jest bezustannie odświeżana w procesie fotosyntezy, biologicznym cudzie, który dokładniej omówimy w rozdziale czwartym. Fotosynteza to wspaniały proces, gdy się na niego spojrzy z perspektywy termodynamicznej. Rośliny i glony budują złożone cukry z dwutlenku węgla i wody, obniżając lokalną entropię i uwalniając w tym procesie wysoko reaktywny tlen i ciepło do atmosfery. Jak to możliwe? Dzięki obecności wodospadu – w tym przypadku gradientu temperatur między powierzchnią Ziemi a Słońcem. Fotosynteza, która znajduje się na samym dole łańcucha pokarmowego na Ziemi, jest możliwa tylko dzięki wielkiej zewnętrznej nierównowadze; w tym przypadku to świecące źródło fotonów znajdujące się ponad 149 milionów kilometrów od nas.

Liczba	Nazwa	Symbol	ppm ($\mu\text{g/g}$)	ppb (atomów)
26	żelazo	Fe	319 000	148 000 000
8	tlen	O	297 000	482 000 000
14	krzem	Si	161 000	150 000 000
12	magnez	Mg	154 000	164 000 000
28	nikiel	Ni	18 220	8 010 000
20	wapń	Ca	17 100	11 100 000
13	glin	Al	15 900	15 300 000
16	siarka	S	6350	5 150 000
24	chrom	Cr	4700	2 300 000
11	sód	Na	1800	2 000 000

Człowiek zbudowany jest przede wszystkim ze zbioru pierwiastków, składników pochodzących z Ziemi.



Podsumowując, życie jest możliwe z perspektywy termodynamicznej, ponieważ środowisko naturalne w znacznym stopniu wytracone jest z równowagi. Organizmy żywe istnieją w warunkach nierównowagi, wykorzystując je do budowania i utrzymywania złożonej struktury, tak jak młyn korzysta z kół do pozyskiwania przydatnej energii z wodospadu, zwiększając przy tym entropię całego układu. W kontekście pochodzenia życia ta obserwacja wiele nam mówi. Życie prawdopodobnie nie zaczęło się w ciepłym stawie, gdyż gradienty termodynamiczne są zbyt delikatne, aby doprowadzić do powstania złożoności. Organizmy żywe muszą być sprzężone ze stałymi, silnymi gradientami ze środowiska zewnętrznego w celu zbudowania i utrzymania swojej złożonej struktury.

Gradienty zewnętrzne, obecnie wykorzystywane przez większość żywych organizmów, nie były dostępne dla pierwszych organizmów na Ziemi. W atmosferze znajdowało się niewiele tlenu albo nie było go wcale, bo to fotosynteza go tam umieściła, a fotosynteza, za pomocą której życie wykorzystuje gradient istniejący między Słońcem a Ziemią, to niezwykle złożony proces biochemiczny, który z pewnością nie mógł istnieć przed pojawieniem się życia. Poszukiwanie początków życia staje się zatem poszukiwaniem gradientu; to naturalnie występująca nierównowaga generowana przez geologię Ziemi, która mogła dostarczyć iskrę

do zapoczątkowania życia; geologiczna kolebka ze stabilnym źródłem energii, mogąca napędzać geochemię w górę termodynamicznego wzgórza, na którego szczycie znajduje się biochemia.

Na początku tego rozdziału zauważyliśmy, że opracowana przez Darwina teoria ewolucji poprzez dobór naturalny stanowi ramy koncepcyjne badań naukowych nad pochodzeniem życia. Przypomnijmy sobie słynny cytat z Darwina: „Dlatego też poprzez analogię wnioskuję, że wszystkie organizmy żywe, które kiedykolwiek zamieszkiwały Ziemię, pochodzą z jakiejś jednej pierwotnej formy, w którą jako pierwszą tchnięte zostało życie”. Ta teoretyczna pierwotna forma to populacja organizmów żywych zwanych LUCA, co jest skrótem od ostatniego uniwersalnego wspólnego przodka (ang. *Last Universal Common Ancestor*) wszelkiego życia na Ziemi.

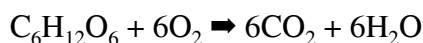
Nieprzerwany łańcuch życia sięgający czterech miliardów lat wstecz oferuje nam interesującą możliwość. Jeżeli LUCA istniał, możemy mieć nadzieję, że cztery miliardy lat ewolucji poprzez dobór naturalny, które po nim nastąpiły, nie usunęły wszystkich śladów jego pierwotnej biochemii. Mogą istnieć pewne cechy wspólne dla wszystkich organizmów żywych, a jeżeli tak jest, to LUCA mógł je także posiadać. Co więcej, jeżeli ewolucja, ten wieczny kombinator, nie zdołała wyeliminować takich procesów w nieskończonej liczbie najpiękniejszych form, które pojawiły się w ciągu ostatnich czterech miliardów lat, możemy czuć się uprawnieni do wniosku, że owe procesy są fundamentalnymi i niezbędnymi składnikami wszelkiego życia. Jako takie byłyby one dymiącą bronią, która łączy wszystkie organizmy żywe istniejące na przestrzeni czterech miliardów lat, czyli przez trzecią część historii całego Wszechświata, od czasów ciepłego małego stawu.

Kod genetyczny, czyli DNA, to jedna z takich cech wspólnych. Wszystkie organizmy żywe posiadają DNA, od bakterii po ludzi. Istnieje jeszcze inna, raczej bardziej zaskakująca cecha, którą wszyscy wykazujemy, a ma ona wiele wspólnego z tym, jak zarządzamy energią. Zważając na to, co powiedzieliśmy o kluczowym znaczeniu termodynamiki w życiu, to ekscytująca i znacząca obserwacja. Posiadamy wspólny system zarządzania energią. Naukowcy wskazują, że jest on pozostałością warunków panujących w kolebce życia na Ziemi. Organizmy żywe są niczym książki – zamrożonymi momentami pełnymi wskazówek dotyczących ich ewolucyjnej historii. W każdej komórce bakterii, w każdym źdźble trawy, w każdej komórce twojego ciała znajduje się dokumentacja ewolucji życia na Ziemi; z całą pewnością nie jest ona kompletna, ale jednak ta opowieść nie została całkowicie usunięta. Podążmy jej śladem, aby zobaczyć, dokąd wiedzie, i zbadajmy, w jaki sposób organizmy żywe zarządzają swoją energią.

Ćma i płomień

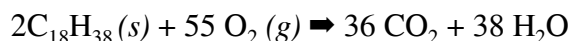
Na pierwszy rzut oka mechanizmy wytwarzania energii stosowane przez organizmy żywe wydają się stosunkowo bezpośrednie. Skupmy się przez moment na zwierzętach. Spalamy pożywienie w powietrzu, aby uwolnić energię, dwutlenek węgla i wodę. Podstawowa reakcja chemiczna przedstawiona została poniżej. Glukoza reaguje z tlenem, tworząc dwutlenek węgla i wodę, a przy tym uwalniając energię. To tak zwana reakcja utleniania. Jak już pisaliśmy w rozdziale pierwszym, atomy tlenu chętnie pozyskują elektrony i z pewnością będą to robić, kiedy tylko nadarzy się okazja. „Spalanie” cukrów można zatem rozważać jako przekazywanie elektronów przez cząsteczki cukru do cząsteczek tlenu; cukier ulega „utlenieniu”, a tlen jest „redukowany”. Jeżeli pamiętasz cokolwiek z lekcji chemii w szkole, prawdopodobnie przypominasz sobie reakcje redoks, a to właśnie jej archetypowy przykład. Reakcje redoks to przede wszystkim przekazywanie elektronów; tak samo jest w przypadku życia.

Glukoza + Tlen $\Rightarrow$ Dwutlenek węgla + Woda



Zdarzają się rzadkie okazje, kiedy to konieczność znalezienia wizualnej tekstury do programu telewizyjnego daje coś więcej niż tapeta. To jedna z takich okazji. Historia powstania życia być może nieuchronnie posiada jakieś gotyckie zabarwienie. Nie jestem pewien, czy całkowicie pochodzi od *Frankensteina*, czy też jest coś naturalnie niepokojącego w tym temacie, ale prowadzi on w krainę cieni. Nawet Księga Rodzaju przypomina na początku Bauhaus: „Ziemia zaś była bezładem i pustkowiem, ciemność była nad powierzchnią bezmiaru wód”, choć gdy pojawia się światłość i wszystko zaczyna owocować i się mnożyć, brzmi trochę jak Hendrix: „Oto wam daję wszelką roślinę...”.

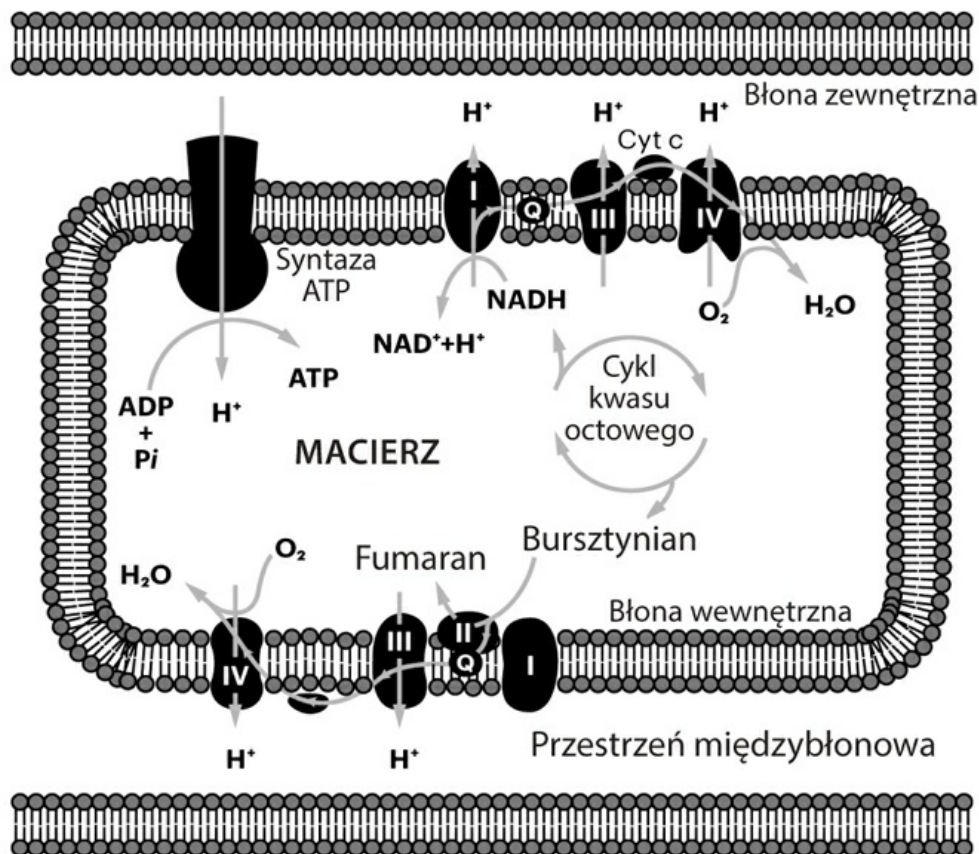
Tytuł niniejszego rozdziału pochodzi od wizualnej metafory, którą wykorzystaliśmy podczas filmowania programu, a która odnosi się do jednego z naszych kluczowych pytań: Co różni materię ożywioną od nieożywionej? Jaka jest różnica między ćmą a płomieniem? Podstawową reakcją chemiczną, która napędza ćmę, jest oksydacja glukozy. Reakcja chemiczna napędzająca płomień świecy to reakcja oksydacji tego samego typu, jak przedstawiono poniżej.



W obu przypadkach elektrony przechodzą z długiego łańcucha cząstki węgla na tlen, jednak w przypadku oddychania część uwalnianej w trakcie reakcji energii wykorzystywana jest do życia. Proces, który tu zachodzi, jest – delikatnie mówiąc – zagmatwany. W organizmie

żywym elektron nie przeskakuje po prostu na tlen, uwalniając przy tym całą energię. Tak byłoby w przypadku płomienia. Zamiast tego elektron przekazywany jest przez serię atomów – zazwyczaj żelaza – zawartych w białkach, które regulują swój apetyt na elektrony. Nie ma niczego wyjątkowego pod względem biologicznym w przekazywaniu przez atomy żelaza swoich elektronów do tlenu; to przecież rdzewienie. Sprytny jest tutaj sposób, w jaki struktury biologiczne regulują procesy chemiczne, zagnieżdżając atomy żelaza w złożonych strukturach cząsteczkowych, co pozwala im na kontrolowanie przepływu elektronów i wykorzystywanie ich do wykonywania przydatnych czynności. Ten łańcuch zagnieżdżonych atomów żelaza, który składa się z około 15 kroków w przypadku większości organizmów, znany jest jako łańcuch oddechowy, a wykorzystywany jest nie tylko do oddychania w przypadku zwierząt, ale także do fotosyntezy. W tej czy innej formie jest on wspólny dla każdego życia, a tym samym z pewnością jego korzenie są bardzo odległe. Wszystkie formy życia wykorzystują chemię redoks do pozyskiwania skądś elektronów i przekazywania ich w łańcuchach oddechowych gdzie indziej.

Istnieje jeszcze jeden element systemu zarządzania energią przez organizmy żywe i jest on jeszcze bardziej wyrafinowany, a mimo to uniwersalny. Wszystkie organizmy żywe przechowują część energii dostarczanej w łańcuchu oddechowym przez przepływ elektronów w cząsteczkach znanych pod nazwą adenozy-5'-trifosforanów, albo w skrócie: ATP. Owe cząsteczki to uniwersalne baterie życia przekazujące zakumulowaną energię po całym ciele i uwalniające ją w zależności od potrzeb. Sposób powstawania cząsteczek ATP jest co najmniej nietypowy, skomplikowany, a szczerze mówiąc – po prostu dziwny. Jedną z najfajniejszych rzeczy związanych z produkcją telewizyjnych programów dokumentalnych jest okazja do nauczenia się czegoś nowego spoza mojej dziedziny. Wciąż pamiętam, jak się czułem, gdy po raz pierwszy czytałem o tym, jak komórki wytwarzają ATP; mogę to porównać do tego, gdy dowiedziałem się, że atomy węgla w moim ciele powstały w jądrach od dawna nieistniejących gwiazd. To tak wspaniała historia, że wydaje się, iż to nie może być prawda. I tak jak fakt mówiący, że wszyscy jesteśmy zbudowani z gwiazdowego pyłu, łączy nas z potężnymi przestrzeniami Wszechświata, tak historia wytwarzania ATP łączy nas z potężnymi przedziałami czasu obejmującymi historię życia na Ziemi. To historia, która sięga aż do ciepłego małego stawu. Oto i ona.



Gdy elektrony przekazywane są wzdłuż łańcucha oddechowego, wykorzystywane są do pompowania protonów przez błony. Na każdą parę elektronów, która przedostaje się na drugą stronę, przepompowywanych jest 10 protonów. Gradienty protonów są potężne. W pobliżu błon, których grubość to zaledwie sześć miliardowych metra, napięcie pola elektrycznego wynosi 30 milionów woltów na metr, czyli mniej więcej tyle, ile można doświadczyć podczas uderzenia pioruna. Ten ogromny rezerwuuar potencjału protonów jest wykorzystywany do zasilania maszyny znanej jako syntaza ATP, nanofabryka produkująca nowe cząsteczki ATP z dwóch „pustych” składników baterii cząsteczkowych, tj. ADP oraz Pi. Protony spadają ze swoich zbiorników potężnym wodospadem, który rozpędza koła młyna syntazy ATP do 100 obrotów na sekundę. Ilustracja na poprzedniej stronie przedstawia szkic tej wyrafinowanej maszyny biologicznej, którą wraz z DNA dzielimy z każdym organizmem żywym na tej planecie.

Wyrafinowana chemia i struktura łańcucha oddechowego, a w szczególności wykorzystanie wodospadów protonów przez syntazę ATP do wytwarzania ATP, uniwersalnych akumulatorów życia, z pewnością mówi nam coś o odległej historii życia. Pamiętaj, że poszukujemy wskazówek na to, że biochemia organizmów żyjących dzisiaj może wskazywać na biochemię LUCA, i taką też wskazówkę odnaleźliśmy – uniwersalne wykorzystanie

wodospadów protonów jako źródła energii do produkcji ATP. Jak podkreślaliśmy wcześniej, termodynamika stanowi klucz do zrozumienia, w jaki sposób działa życie, a także, jak się ono zaczęło. Organizmy żywe to najbardziej złożone struktury fizyczne we Wszechświecie, a powstawanie złożoności spontanicznie z prostych elementów to delikatna sprawa. Życie dokonało tego zgodnie z nieugiętą drugą zasadą termodynamiki, wykorzystując reakcje redoks do pompowania protonów. To musi nam coś mówić o tym, jak to się zaczęło. Zdziwiłbyś się po tym wszystkim, gdyby odpowiedź brzmiała: nie!

Bardzo odmienny Eden

Wszystko, co omawialiśmy dotąd w tym rozdziale, to ugruntowana nauka. Wszystko to znajdziesz w podręcznikach. Teraz zbierzemy to do kupy i przedstawimy teorię pochodzenia życia na Ziemi. To wciąż nauka, ale nauka na granicach nauki. Niektórzy biolodzy zgadzają się z tą teorią, a inni nie – tak też powinno być w trakcie formowania i testowania nowych teorii. Teoria może okazać się błędna, a jeżeli tak jest, to jej proponenci będą zachwyceni, bowiem dowiedzą się czegoś nowego o Naturze. Tak jednak nie było. Prawdziwi naukowcy są zachwyceni, gdy dowiadują się, że nie mieli racji, i dla mnie jest to jeden z największych darów, jakie może dostarczyć edukacja naukowa. Na świecie jest zdecydowanie za dużo ludzi, którzy chcą mieć rację, a za mało tych, którzy chcą po prostu wiedzieć.

Jeszcze raz prześledźmy logikę tego argumentu. Zakładamy, że życie zaczęło się na Ziemi, i mamy dowody, że nastąpiło to wcześniej niż 3,5 miliarda lat temu. Wiemy, że termodynamiczna bariera złożoności jest ogromna, i wiemy, że w celu jej pokonania życie musi operować w układzie pozostającym poza równowagą; istnieje w wodospadzie. Obecnie wodospadami są atmosfera tlenowa i Słońce, poprzez fotosyntezę, a ani jedno, ani drugie nie było dostępne dla najwcześniejszego życia. Kolejne wodospady ukryte są wewnątrz organizmów żywych – wodospady protonowe, które napędzają wspaniałe nanofabryki syntazy ATP – i te są *uniwersalne*; wszystko, co istnieje dzisiaj na Ziemi, poza bardzo niewieloma wyjątkami, wykorzystuje protony. To wskazuje, że patrzymy na bardzo dawną biochemię – biochemię LUCA.

Dzisiaj organizmy żywe wykorzystują niezwykle środki, aby tworzyć własne, wewnętrzne wodospady protonowe, wykorzystując do tego złożoną maszynę łańcuchów oddechowych, ale co, jeżeli jest to tylko późniejszy dodatek? Co, jeżeli pierwotne źródło energii, które wzniosło życie na szczyt termodynamicznego wzgórza z poziomu geochemii do biochemii, było gradientem protonowym? To prowadzi do *właściwego* pytania: Czy 3,5 miliarda lat temu na Ziemi istniało miejsce, gdzie naturalnie występujące gradienty protonowe mogły być wykorzystane przez pierwsze maszyny biologiczne, pozwalając na spontaniczne powstawanie fundamentów życia, aż do i włącznie z DNA, podstawowego warunku ewolucji poprzez dobór naturalny? Odpowiedź brzmi: tak. Co więcej, takie miejsca wciąż istnieją na Ziemi dzisiaj i możemy je nawet odwiedzać.

Kominy hydrotermalne to pęknięcia dna oceanicznego, z których świeża woda ogrzana przez energię geotermalną do ponad 300 stopni Celsjusza spotyka się z zimną, słoną wodą morza. Widziałem takie kominy podczas kręcenia programu *Wonders of the Solar System* w 2009 roku, 2000 metrów pod powierzchnią Morza Cortéza, u wybrzeży Półwyspu Kalifornijskiego. Poniżej bioluminescencji, poniżej Słońca, światła batyskafu „Alvin” ujawniały przed nami świat skalistych kominów i rurkoczułkowców. To ekosystem

zbudowany na sprytnych bakteriach, które mogą wyciągać elektrony z wulkanicznego siarkowodoru – ponownie reakcje redoks – pozostawiając maty żółtej siarki na całym polu kominów. Kominy tego typu to tak zwane czarne palacze, nazwane tak na cześć cząstek wyrzucanych przez nie w toń oceaniczną.

W grudniu 2000 roku, podczas nurkowania nad podwodnym pasmem górskim między Bermudami a Wyspami Kanaryjskimi zwanym Grzbietem Śródatlantyckim, „Alvin” odkrył innego rodzaju układy kominów. Są to wspaniałe wieże z węglanu wapnia, niektóre sięgające nawet na 60 metrów wwyż, wynoszone przez ciepłe wody bogate w minerały i reaktywne gazy uwalniane z głębi skorupy. W tym całym krajobrazie jest coś z bajki, dlatego też miejsce to nazwano „Zaginionym Miastem”.

Chemia kominów Zaginionego Miasta różni się od tej, którą napotkałem w Morzu Cortéza. Wody w kominach są dużo chłodniejsze, mają około 90 stopni Celsjusza, ponieważ nie są to kominy pochodzenia wulkanicznego. Reakcje chemiczne zachodzące między ciepłymi wodami a skałą dna morskiego wysycają struktury metanem i gazem wodorowym, a nie wulkanicznym siarkowodorem czarnych palaczy. W tym przypadku warunki przypominają te z eksperymentu Ureya-Millera, które doprowadziły do powstania zupy aminokwasów – elementów składowych życia. Chemiczne pochodzenie kominów robi ogromną różnicę, jeżeli chodzi o poziom pH w ich porowatych komorach skalnych; czarne palacze są kwasowe, a kominy Zaginionego Miasta są zasadowe. Te terminy mogą natychmiast coś ci wskazywać: kwas oznacza nadmiar protonów, a zasada – ich deficyt.

Cztery miliardy lat temu oceany naszej planety były kwaśne, co oznacza, że zawierały nadmiar protonów. Kwaśna woda morska otaczała zasadowe układy kominów, takie jak te w Zaginionym Mieście, dostarczając naturalnego gradientu protonów dzięki licznym komorom w wieżach. Owe wieże były pokryte żelazem i niklem, obecnym w dużych ilościach w pierwotnych oceanach, które działają jako katalizatory w organicznych reakcjach chemicznych. Warunki były stabilne, temperatury wysokie, wszędzie były naturalne gradienty protonów, a dzięki nietypowej obecności gazu wodorowego pozostawały bardzo reaktywne.

ORGANIZMY ŻYWE TO
NAJBARDZIEJ ZŁOŻONE
STRUKTURY FIZYCZNE
WE WSZECHŚWIECIE,
A POWSTAWANIE
ZŁOŻONOŚCI
SPONTANICZNIE
Z PROSTYCH ELEMENTÓW
TO DELIKATNA SPRAWA.

Czy tak właśnie mógł wyglądać LUCA? Nie komórka, nie mały organizm taki jak bakteria czy archeon, lecz ciepła, skalista komora w systemie kominów? Ten argument jest przekonujący, przynajmniej dla mnie. Gradienty protonów życia, które są absolutnie kluczowe w produkcji ATP, to dymiąca broń. Obecność wysoce reaktywnego gazu wodorowego w kominach to druga dymiąca broń. Jak zobaczymy w kolejnym rozdziale, organizmy fotosyntetyczne naprawdę dużo robią, aby doklejać protony – wodoru – do dwutlenku węgla w celu wytworzenia cukrów. To proces zasadniczy dla życia, ale zachodzi spontanicznie w obecności wodoru. Nie potrzeba maszynarii fotosyntezy, jeżeli w otoczeniu znajduje się wodór, i nie potrzeba łańcucha oddechowego do pompowania protonów przez błony, jeżeli posiadamy naturalnie występujące gradienty protonów przechodzące przez komory. Wszystko – od reaktywnych prekursorów cząsteczek organicznych, włącznie z katalizatorami, po gradienty protonów niezbędne do wspinania się po gradiencie entropii – jest obecne i prawidłowe.

Jeżeli ta teoria jest prawdziwa, podstawowa maszynaria życia, aż do i włącznie z DNA, powstała w skalistych komorach systemów kominowych, takich jak te odkryte w Zaginionym Mieście, a ty nosisz w sobie dowody na to po dziś dzień. Wewnątrz komórek swojego ciała odtwarzasz warunki obecne w pierwotnych oceanach Ziemi cztery miliardy lat temu. Wytwarzasz wodospady protonów, ponieważ życie robi to od zawsze. Gdy chemia wewnątrz kominów stała się wystarczająco złożona, aby móc się rozmnażać, przekazywać geny z pokolenia na pokolenie, dobór naturalny mógł rozpocząć plecenie swoich nici. Życie znalazło sposób na wytwarzanie własnych gradientów protonów, wykorzystując do tego warunki wytrącenia z równowagi obecne nad kominami, włożyło to wszystko do worka i sobie poszło. I tak oto powstałeś.

Życie poza Ziemią

Teoria pochodzenia życia na Ziemi, którą tu zaproponowaliśmy, z pewnością jest prawdopodobna i istnieje wielu biologów, którzy ją wspierają. Jak podkreślaliśmy wielokrotnie na stronach tej książki, argument na bazie autorytetu to nie argument. Czy istnieje jakikolwiek sposób przetestowania teorii mówiącej, że życie zaczęło się w kominach? Jednym ze sposobów byłoby wybudowanie sztucznego komina w laboratorium, tak samo jak Urey i Miller stworzyli swój sztuczny ciepły mały staw. Grupa kierowana przez Nicka Lane'a z University College w Londynie właśnie to robi. Celem jej badań jest obserwowanie, w jaki sposób złożone organiczne związki chemiczne mogą powstawać w warunkach wytrącenia z równowagi, takich jak te panujące w kominach Zaginionego Miasta.

Istnieje także inna możliwość. Jeżeli prawdziwe jest stwierdzenie, że spontaniczne powstanie życia jest niemal nieuchronne, przy założeniu odpowiednich warunków, oraz że układy kominów są kolebką życia na Ziemi, możemy oczekiwać, iż życie jest obecne na dowolnym globie z zasadowymi układami kominów w łagodnie kwaśnych oceanach. Niesamowicie ekscytujący jest zatem fakt, że najprawdopodobniej odkryliśmy co najmniej jeden taki glob tuż nieopodal.

W lutym 2005 roku sonda Cassini odkryła coś ciekawego na małym lodowym księżycu o nazwie Enceladus. Księżyc ten ma średnicę zaledwie 500 kilometrów, a sonda Voyager, która przeleciała przez układ Saturna w latach osiemdziesiątych, nie zrobiła szczegółowych zdjęć jego powierzchni. Przeprowadzone przez sondę Cassini precyzyjne pomiary pola magnetycznego Saturna wykazały, że Enceladus ma coś na kształt atmosfery odkształcającej pole magnetyczne planety w otoczeniu księżyca. Wysłano więc sondę Cassini, aby przyjrzała się mu z bliska, i cytując naukowca projektu Lindę Spilker, odkrycia „zmieniły kierunek badań w planetologii”.

Fotografia [na stronie 12](#) wklejki ze zdjęciami została wykonana przez sondę Cassini w październiku 2015 roku, kiedy przelatywała ona nisko nad powierzchnią Enceladusa. Widać na niej spektakularne pióropusze wody tryskającej z powierzchni z prędkością 1200 kilometrów na godzinę. Ich źródłem są gorące plamy na powierzchni na obszarze tak zwanych pasów tygrysich. Emitowany przez gejzery materiał tworzy większość najbardziej zewnętrznego pierścienia Saturna, pierścienia E. Gdy sonda Cassini przeleciała przez pierścień E, zarejestrowała w nim obecność nanoziaren krzemionki, które powstają, gdy woda oddziałuje ze skałą w temperaturze powyżej 90 stopni Celsjusza. Same gejzery są bogate w związki organiczne, w tym dwutlenek węgla, a ostatnie badania potwierdziły także, że są one zasadowe. Precyzyjne pomiary orbity Enceladusa wskazują na obecność podpowierzchniowego oceanu o głębokości sześciu kilometrów pod biegunem południowym księżyca. Gdy połączymy ze sobą wszystkie te fakty, wydaje się, że w przypadku Enceladusa mamy do czynienia z aktywnym systemem kominów hydrotermalnych napędzającym gejzery

wody, bogate w związki organiczne, tryskające w przestrzeń kosmiczną. Teraz poszukujemy śladów wodoru w gejzerach, które jeszcze silniej wskazywałyby nam, że Enceladus posiada wszystkie warunki niezbędne do spontanicznego powstania życia.

Ten mały księżyc, znajdujący się w zamrożonych zewnętrznych rejonach Układu Słonecznego, miliard kilometrów od nas, wydaje się posiadać głębokie środowisko oceaniczne bardzo przypominające to panujące na naszej planecie cztery miliardy lat temu. Jeżeli to prawda i jeżeli życie jest niemal nieuchronne w takich warunkach, czy możemy oczekiwać znalezienia śladów biologii w gejzerach Enceladusa? Musimy postawić pytanie, a nie zapewniać, ponieważ wielu zmiennych wciąż nie rozumiemy. Od jak dawna Enceladus jest aktywny? Czy ocean może być tymczasowym zjawiskiem napędzanym przez szczegóły jego orbity, która równie dobrze mogła wyglądać inaczej w przeszłości? Potrzebna jest misja na Saturna, której głównym zadaniem będzie szukanie odpowiedzi na te pytania, a gdyby to zależało ode mnie, zacząłbym budować taką sondę już jutro, gdyż lodowe gejzery Enceladusa są naszą furtką do chemii, lub biochemii, obcego oceanu podpowierzchniowego. Nie musimy nawet tam lądować.

Myślę, że to niezwykle ważne. Możemy nigdy nie dowiedzieć się, jak zaczął się Wszechświat, ale jesteśmy blisko zrozumienia tego, jak *my* się zaczęliśmy. To z pewnością jedno z najważniejszych pytań obecnych czy nawet wszech czasów, co zresztą widać w wielokrotnych zakusach na to terytorium czynionych przez filozofów czy teologów. Jednak pochodzenie życia to pytanie naukowe, a nie metafizyczne. Jak pisał Haldane w *Pochodzeniu życia*:

Niektórzy ludzie uznają za wystarczające do odrzucenia powyższych teorii stwierdzenie, że są one materialistyczne, a materializm można odrzucić na gruncie filozoficznym. Bez wątpienia są one zgodne z materializmem, ale także z innymi filozoficznymi fundamentami. Fakty są, jak by nie patrzeć, dość oczywiste.

Tutaj pytanie brzmi: W jaki sposób powstał pierwszy taki system na tej planecie? To problem historyczny, na który przedstawiłem odpowiedź opartą na nie nierozsądnej hipotezie, że tysiące milionów lat temu materia przestrzegała tych samych praw co dzisiaj.

Niemal sto lat później znacznie więcej wiemy o tym historycznym problemie niż Haldane. Mamy precyzyjne daty początków życia na Ziemi i mocnego kandydata na inkubator życia. Widzimy, jak geologia mogła stać się biologią, i rozumiemy, w jaki sposób systemy biologiczne na przestrzeni miliardów lat mogły stać się wystarczająco wyrafinowane, aby zacząć pytać o własne pochodzenie. Czy to naprawdę możliwe, by pierwiastki chemiczne, przy założeniu obecności oceanu, komina i czterech miliardów lat czasu, zaczęły rozumieć same siebie? Myślę, że jesteśmy już blisko odpowiedzi na to pytanie.

Z drugiej strony, skoro ten rozdział ma nieco gotycki charakter, wydaje mi się, że powinienem zakończyć go głuchym śmiechem lub motywem muzycznym z serialu *Tales of the Unexpected* według Roalda Dahla. Pozwólcie, że pozostawię was ze wspomnieniem krótkiej opowieści Arthura C. Clarke'a pt. *The Nine Billion Names of God*. To w niej mnisi

tybetańskiego klasztoru zadają gigantycznemu superkomputerowi zadanie stworzenia listy wszystkich możliwych imion Boga. To, wskazuje mnich, jest celem, dla którego stworzona została rasa ludzka. Ich celem jest poznanie własnego stwórcy. Inżynierowie, z szatańskim uśmiechem, sprzedają mnichom komputer, instalują go i opuszczają klasztor po zmierzchu, zmierzając w stronę gór. „Powinno się już skończyć”, mówi jeden z inżynierów, ale jego towarzysz milczy. „A nad nimi, bez żadnego zamieszania, umierały gwiazdy”.

CZY TO NAPRAWDĘ
MOŻLIWE, BY
PIERWIASTKI CHEMICZNE,
PRZY ZAŁOŻENIU
OBECNOŚCI OCEANU,
KOMINA I CZTERECH
MILIARDÓW LAT CZASU,
ZACZĘŁY ROZUMIEĆ
SAME SIEBIE?

KOLORY

Bładoniebieska kropka

Mamy takie zdjęcie, na którym jesteśmy wszyscy: świecący punkt w ciemności. To Ziemia widziana przez sondę Voyager 1 w dniu 14 lutego 1990 roku z odległości sześciu miliardów kilometrów. Fale radiowe niosące to zdjęcie potrzebowały pięciu i pół godziny, aby dotrzeć do domu.

Misje Voyager wystartowały z Ziemi w kierunku gazowych olbrzymów Jowisza i Saturna w 1977 roku, z możliwością kontynuacji misji także na Urana i Neptuna dzięki jednej na 175 lat konfiguracji planet. Sonda Voyager 2 dotarła do Neptuna latem 1989 roku. Wykonane przez nią zdjęcie mroźnej, błękitnej planety i jej księżycy Trytona to jedno z moich ulubionych. Delikatne łuki na tle ciemności przy minus 240 stopniach Celsjusza. Zimna cisza nieobserwowana od 4,5 miliarda lat, uchwycona przez sondę o rozmiarach samochodu wysłaną z Ziemi. Nie mam pojęcia, kiedy i czy w ogóle będziemy mieli okazję ponownie ją zobaczyć.

Voyager 1 podążył inną ścieżką, przelatując w pobliżu szczytów chmur Tytana, gigantycznego księżycy Saturna, 12 listopada 1980 roku. Przelot ten pozwolił wystrzelić sondę w górę nad płaszczyznę Układu Słonecznego i odbyć podróż w przestrzeń międzygwiazdą. Przez dziesięć lat Voyager 1 oddalał się od Słońca z prędkością 17 kilometrów na sekundę, aż Carl Sagan przekonał NASA do obrócenia sondy, zwrócenia jej obiektywów w kierunku Ziemi i wykonania nam portretu rodzinnego – pożegnalnego zdjęcia Układu Słonecznego na początku drogi w stronę gwiazd. Trzydzieści dwa stopnie nad płaszczyznę ekliptyki Voyager 1 stworzył mozaikę 60 klatek. Neptun, Uran, Saturn, Jowisz, Wenus i Ziemia – wszystkie znajdują się na tym zdjęciu; tylko Merkury i Mars się nie załapały. Ziemia widziana jest jako rogal pokrywający dziesiątą część jednego piksela, zawieszony przez czysty przypadek w promieniu słonecznym, który rozproszył się na obiektywie kamery.

Carl Sagan zatytułował to zdjęcie „Bładoniebieska kropka” i stało się ono jednym z najcenniejszych zdjęć w historii, okraszonym silnym przesłaniem zawartym w pracy o tym samym tytule.

Nasza planeta to tylko samotna plamka w bezmiarze otaczających ją kosmicznych ciemności. Ta jej znikomość w obliczu bezkresnej przestrzeni nie pozostawia żadnej nadziei, że nadejdzie skądś pomoc, by obronić nas przed nami samymi. Ziemia jest jedynym znanym dotąd światem, na którym narodziło się życie. Nie ma żadnego miejsca, do którego, przynajmniej w najbliższej przyszłości, nasz gatunek mógłby wyemigrować: odwiedzić – owszem; osiedlić się – na razie nie. Czy nam się to podoba, czy nie, Ziemia pozostanie na razie naszym siedliskiem. Mówi się, że astronomia jest dziedziną, która uczy pokory i kształtuje charakter. Chyba nie można dobitniej pokazać bezsensu ludzkiej zarozumiałości niż poprzez przedstawienie widoku naszego drobniutkiego świata z tak dalekiej perspektywy. W moim przekonaniu obraz ten może umocnić nasze poczucie odpowiedzialności i sprawić, że będziemy traktowali się nawzajem z większą wyrozumiałością oraz będziemy dbali o naszą błękitną kropkę – jedyny dom, jaki kiedykolwiek mieliśmy.

Carl Sagan

NASZA PLANETA TO
TYLKO SAMOTNA
PLAMKA W BEZMIARZE
OTACZAJĄCYCH JĄ
KOSMICZNYCH CIEMNOŚCI.
TA JEJ ZNIKOMOŚĆ
W OBLICZU BEZKRESNEJ
PRZESTRZENI NIE
POZOSTAWIA ŻADNEJ
NADZIEI, ŻE NADEJDZIE
SKĄDŚ POMOC, BY OBRONIĆ
NAS PRZED NAMI SAMYMI.

CARL SAGAN

CO ZA PIĘKNO. WIDZIAŁEM
CHMURY I ICH LEKKIE CIENIE NA
ODLEGŁEJ DROGIEJ ZIEMI... WODA
WYGLĄDAŁA JAK CIEMNE, LEKKO
POŁYSKUJĄCE KROPKI... GDY
PATRZYŁEM W STRONĘ HORYZONTU,
WIDZIAŁEM GWAŁTOWNE,
KONTRASTUJĄCE PRZEJŚCIE MIĘDZY
JASNĄ POWIERZCHNIĄ A ABSOLUTNIE
CZARNYM NIEBEM. ROZKOSZOWAŁEM
SIĘ BOGATĄ PALETĄ KOLORÓW
ZIEMI. OTACZA JĄ JASNONIEBIESKA
AUREOLA, KTÓRA STOPNIOWO
CIEMNIEJE, PRZECHODZI W TURKUS,
GRANAT, FIOLET, A W KOŃCU
CAŁKOWITĄ CZERŃ.

JURIJ GAGARIN

Gdy zaczynamy rozumieć, że sama Ziemia jest swego rodzaju załogowym statkiem kosmicznym przemierzającym bezkres przestrzeni – wyda nam się coraz bardziej absurdalnym fakt, że nie zorganizowaliśmy lepiej życia naszej całej ludzkiej rodziny.

Hubert H. Humphrey, wiceprezydent USA, 26 września 1966

Kiedy w końcu stajesz na Księżycu i spoglądasz na Ziemię, wszystkie różnice i podziały na narody znikają i zaczynasz rozumieć, że może naprawdę to jest jeden świat, dlatego więc nie potrafimy się nauczyć żyć obok siebie jak normalni ludzie.

Frank Borman, Apollo 8, „Newsweek”, 23 grudnia 1968

Jeżeli należysz do osób, które lubią zbytnio komplikować sobie wszystko (być może szorstkie wietrzenie zakumulowanego rozczarowania odsłoniło twoje pasmowe formacje cynizmu?), możesz pomyśleć, że to naiwne. Doświadczyłem swojej porcji wietrzenia, jednak uważam, że wnioski Sagana są nie do podważenia. Nasza planeta jest niewyobrażalnie mała w przestrzeni, a to z kolei znaczy, że każdy z nas jest niewyobrażalnie mały.

Musimy pogodzić się z faktem, że nie mamy żadnego kosmicznego znaczenia, a to oznacza odrzucenie naszego osobistego i zbiorowego ego i docenienie tego, co mamy. Nie możemy już dłużej zakładać istnienia platformy bogów czy mieć nadziei na wyjątkowe miejsce w ich sercach. Nauka zmusiła nas do bezustannego wpatrywania się w bezkresny wszechświat, którego objętość rozmywa szczególne prośby do zanikająco małych i żałosnych pisków. Ale i tak to, co nam pozostało, jest lepsze. Żaden pomnik poświęcony bogom nie jest tak wspaniały jak historia naszej planety; pochodzenie i ewolucja życia na rzadkiej Ziemi oraz powstanie cywilizacji, która stawia swoje pierwsze kroki w bezkresną czerni. Jesteśmy spokrewnieni z każdą z nieskończonych, najpiękniejszych form Darwina, każdy z nas łączy się z innym na jakiejś gałęzi nieprzerwanego łańcucha życia sięgającego czterech miliardów lat wstecz. Mamy więcej wspólnego z bakteriami niż z jakimikolwiek organizmami żywymi egzystującymi pośród gwiazd, jeżeli takowe istnieją, i to im należy się nasza uwaga. Budujemy katedry ku czci bakterii; jesteśmy sami, a jako dominujący intelekt jesteśmy odpowiedzialni za naszą planetę w jej wspaniałej i kruchej całości.

Jeżeli wydaje ci się to beznadziejnie hippisowskie, sam siebie zapytaj, kto jeszcze może być za nią odpowiedzialny. Sagan ma rację: astronomia uczy skromności, a skromność to pierwszy krok do budowania lepszej i bezpieczniejszej przyszłości. Prezentem sondy Voyager dla jej twórców w postaci ostatniego rzutu oka na Ziemię jest skromność, z której rodzi się odpowiedzialność. Skromność, zachwyt i ciekawość w obliczu Natury to ostoja nauki. Musimy przyjąć fakt, że nauka zmusiła nas do dorastania i że stanowi bogate i satysfakcjonujące miejsce dla rasy ludzkiej.

Planety są tylko kropkami na mozaice zdjęć z Voyagera, ale z pewnością nie są pozbawione cech charakterystycznych. Ich kształty i rozmiary wykraczają poza rozdzielczość kamer telewizyjnych Voyagera z lat siedemdziesiątych, lecz w tych nielicznych fotonach, które przedostały się przez soczewki, jest wiele informacji. Jeżeli gdzieś tam, dalej niż Voyagery, istnieją organizmy żywe, wystarczająco wyrafinowane i oświecone, aby osiągnąć etap badań

naukowych, co pomyślałyby o bladoniebieskiej kropce? Miałyby do dyspozycji tylko światło, ale światło niesie informacje na odległości międzygwiazdne, jeżeli wiesz, jak zdekodować zawarte w nim informacje. Barwy świata stanowią zakodowaną bazę danych przenoszącą ślady jego składników oraz składników chemicznych. Zrozumienie fizycznej natury światła oraz mechanizmów jego emisji i pochłaniania pozwala na odtworzenie ukrytych w nim informacji.

W niniejszym rozdziale dowiemy się, co już wiemy o świetle i jego oddziaływaniu z materią oraz jak astronomowie stawiają pierwsze kroki w poszukiwaniu życia poza Układem Słonecznym, badając światło odbijane i pochłaniane przez blade kropki krążące wokół odległych gwiazd. Podążymy także równoległą ścieżką; badanie światła zmotywowane przez samą ciekawość prowadzi od ponad tysiąca lat do odkryć praktycznych, jak i fascynujących na czysto intelektualnym poziomie. Najprostsze pytania o początki i naturę światła oraz jego oddziaływanie z materią wciąż dostarczają dziś egzotycznych odpowiedzi z pogranicza nauki, i dokładnie tak powinno być. Jeżeli razem możemy nauczyć się wpatrywać w światła nocnego nieba z podekscytowaniem, radością, ciekawością i bez strachu przed nieskończonym nieznanym, wybierzemy przyszłość wolną od przesądów, napędzaną wyzwaniem coraz lepszego rozumienia Natury, uwolnioną z kajdan absolutnej pewności, oprócz może uznania naszej absolutnej odpowiedzialności za planetę i nas samych.

Tęczowe połączenie

Skąd się biorą barwy tego świata? Ziemia nie emituje własnego światła, przynajmniej jeżeli pominiemy elektryczny blask naszej cywilizacji. Bładoniebieska kropka jest reflektorem, drobiną kurzu łapiącą promienie słoneczne. Promieniowanie emitowane przez Słońce nie jest naturalnie niebieskie; zawiera wszystkie barwy tęczy. Oczywiście, że tak jest, to jedna z pierwszych rzeczy, których uczymy się w szkole. Mimo to taka powszechna wiedza nie przyszła nam łatwo. Wczesny rozwój naszej naukowej wiedzy o świetle jest spleciony z pytaniem o pochodzenie tęczy, co jakoś mnie nie dziwi.

Tęcze są jednymi z najbardziej intrygujących regularnych wytworów Natury, wspaniałymi łukami pojawiającymi się w szczególne dni. Ukazują się one nad wszelkiego rodzaju krajobrazami na Ziemi, o dowolnej porze od świtu do zmierzchu, a mimo to mają te same uniwersalne właściwości: barwy zawsze ułożone są w tej samej kolejności, niezależnie od pogody. Czerwony kolor zawsze skierowany jest ku niebu, niebieski – ku ziemi. Ich centrum zawsze jest obserwator, to osobiste uniwersalne zjawisko, a wszystkie łuki na niebie zakreślają ten sam kąt pomiędzy jasnymi promieniami Słońca a okiem obserwatora: 42 stopnie. Most do niebios lub przymierze z bogami – taki wspaniały symbol wymaga boskiego wytłumaczenia. I jeżeli po raz ostatni pozwolimy sobie zdefiniować boskość jako podstawowe prawa Natury, to tęcza jest jednym z najwyraźniejszych cieni głębszej struktury rządzącej Wszechświatem; wizualnym odzwierciedleniem zachowania światła. To właśnie dlatego wielu największych naukowców próbowało je zrozumieć.

Już w XI wieku Ibn al-Hajsam poszukiwał fizycznego wytłumaczenia tęczy. Prawdłowo założył, że odpowiada za nie światło ze Słońca oddziałujące z wodą w atmosferze jeszcze przed dotarciem do oka – aczkolwiek nieprawidłowo uważał, że tęcze są efektem odbicia światła od chmur, które według niego zachowywały się jak olbrzymie zwierciadła wklęsłe. Założenie, że tęcza to odbite promieniowanie słoneczne, nie jest trywialną obserwacją. Teoria, według której wzrok jest aktywny w tym sensie, że oko generuje promienie pozwalające obserwatorowi postrzegać obiekty, a nie jest radarem, była powszechnie przyjmowana w XI wieku, zaś historycznie wspierali ją Euklides i Ptolemeusz. Ibn al-Hajsam nie miał czasu na autorytet starożytnych i większy nacisk kładł na eksperymenty i obserwacje niż na czystą myśl i instynkt. To podejście, które teraz uznajemy za nowoczesne, decyduje o tym, że jest on postrzegany przez wielu historyków nauki jako jeden z największych wczesnych umysłów naukowych. Jak pisał historyk David C. Lindberg, był on „bez wątpienia najważniejszą postacią w historii optyki między antykiem a XVII wiekiem”.

Alhazen (łacińska wersja jego imienia) nie jest tak dobrze znany jak Newton, Galileusz, Kepler czy Einstein, ale uważam, że zasługuje na dużo ważniejsze miejsce w historii nauki z uwagi na swoją świadomość siebie i pokorność, która widoczna jest w jego pismach; to kluczowe składniki współczesnego podejścia naukowego, które wybrzmiewają także

w słowach Sagana o bładoniebieskiej kropce. Wszyscy dobrzy naukowcy wiedzą, że nie ma twierdzeń niepodważalnych; nie ma praw absolutnych w nauce; autorytet nic nie znaczy, gdy sprzeciwi mu się Natura; *nullius in verba*. Tak pisał Alhazen w Basrze tysiąc lat temu:

Dlatego też poszukiwaczem prawdy nie jest ten, kto bada pisma starożytnych i kierując się swoją naturą, zawiera im, ale ten, kto nie ufa im i kwestionuje to, co z nich otrzymuje, ten, kto odnosi się do argumentów i demonstracji, a nie do twierdzeń człowieka, którego natura obciążona jest wszelkimi niedoskonałościami i ułomnościami. Dlatego obowiązkiem człowieka, który bada pisma naukowców, jeżeli jego celem pozostaje dotarcie do prawdy, jest kwestionowanie wszystkiego, co czyta, oraz, przy angażowaniu swojego umysłu do sedna i marginesów zawartości, atakowanie ich z każdej strony. Powinien także podejrzewać siebie podczas krytycznej analizy tych prac, tak aby uniknąć uprzedzeń i pobłażliwości.

Optyka, najważniejsza istniejąca wciąż praca Alhazena (do dzisiaj nie przetrwała połowa jego pism), stanowiła inspirację dla wielu kolejnych badań nad pochodzeniem tęcz i naturą światła. Nie ma tu żadnej ironii; książki należy czytać krytycznie. Nie są one źródłami „prawd”, lecz inspiracji; zapiskami wiedzy i doświadczenia, na które trzeba patrzeć krytycznym okiem. Miarą mocy słowa pisanego jest to, że prace Alhazena inspirowały pokolenia naukowców pochodzących z kultur odległych od siebie w czasie i przestrzeni do podejmowania prób poprawiania jego dokonań, o co sam ich błagał, oraz do znalezienia racjonalnego i eksperymentalnie testowalnego wytłumaczenia tęczy.

Kamal al-Din al-Farisi był jednym z długiej linii pionierskich naukowców, którzy tworzyli ożywioną kulturę akademicką Persji późnego średniowiecza. Urodzony w 1265 roku al-Farisi ukończył studia pod okiem astronoma Kutb al-Din al-Shiraziego w słynnym Obserwatorium Maraghe w pobliżu Maraghe w Iranie. Al-Farisi zainteresował się refrakcją światła – zakrzywianiem promieni światła przy przejściu między powietrzem a wodą lub szkłem. Al-Shirazi namówił al-Farisiego do przeczytania *Optyki*, a ten tak się zachwycił tą pracą, że al-Shirazi przekonał go do napisania zaktualizowanego przeglądu jej zawartości. Wynikiem tego było całkowite odświeżenie pracy i krok w stronę prawidłowego wytłumaczenia powstawania tęczy. Al-Farisi postulował, że tęcza powstaje, gdy światło wchodzi w krople wody z powietrza, ulega załamaniu dwukrotnie – raz przy wejściu, drugi raz przy wyjściu z kropki – i co najmniej jednemu odbiciu od tylnej powierzchni. Spełniając elokwentne życzenie Alhazena, przeprowadził serię eksperymentów w celu przetestowania swojego podejścia teoretycznego; to piękny przykład kontrolowanego badania Natury w warunkach laboratoryjnych. Al-Farisi stworzył model pełnej deszczu atmosfery w dużym sferycznym zbiorniku szklanym wypełnionym wodą. Umieścił swoje szklane krople deszczu w swoistym odpowiedniku *camera obscura*, ciemnym pomieszczeniu z kontrolowaną aperturą, przez którą wprowadzano promień słoneczny, oraz z płaską powierzchnią, na której wyświetlano obraz. Następnie obserwował tęczę, weryfikując szeroki zarys swojej teorii.

SŁAWMY WIELKOŚĆ
BOGA SURJA, KTÓREGO
PIĘKNO RÓWNA SIĘ
Z PIĘKNEM KWIATÓW.
SKŁANIAM SIĘ
PRZED NIM,
ŚWIETLISTYM SYNEM
ŚWIĘTEGO KAŚJAPA,
WROGA CIEMNOŚCI
I NISZCZYCIELA
WSZELKIEGO GRZECU.

MODLITWA ĆHAT PUDŻA

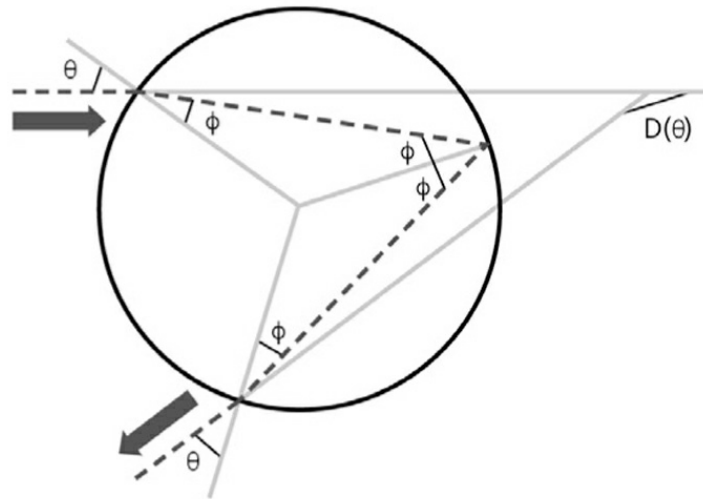
Niemal dokładnie w tym samym czasie, ale w dużej odległości od niego, niemiecki mnich i badacz Teodoryk z Freibergu doszedł do tego samego wniosku, co udokumentował w pracy *De iride et radialibus impressionibus* – „O tęczy i wrażeniach powstałych przez napromieniowanie”. Tak jak al-Farisi, wykorzystywał on szklane sfery wypełnione wodą do modelowania kropli deszczu i badania oddziaływania między promieniowaniem słonecznym a wodą. Pomimo tysięcy kilometrów odległości i braku kontaktu czy form komunikacji nie jest przypadkiem, że obaj wcześnie naukowcy doszli do tego samego wniosku niemal jednocześnie. Obaj zainspirowani byli i opierali się na *Optyce*, która została przetłumaczona na język arabski i łacinę w XII wieku i była rozpowszechniona w całej Europie oraz w Persji – to wczesny przykład istotnej zasady, o którą walczymy także dzisiaj: wiedza naukowa musi być dostępna dla każdego poprzez wolne publikacje. Nie mogą istnieć prawa autorskie na pomysły.

To były istotne kroki naprzód, ale żaden naukowiec nie odkrył prawidłowego wytłumaczenia pochodzenia barw tęczy ani ich najbardziej zdumiewającej właściwości geometrycznej – uniwersalnego kąta łuku.

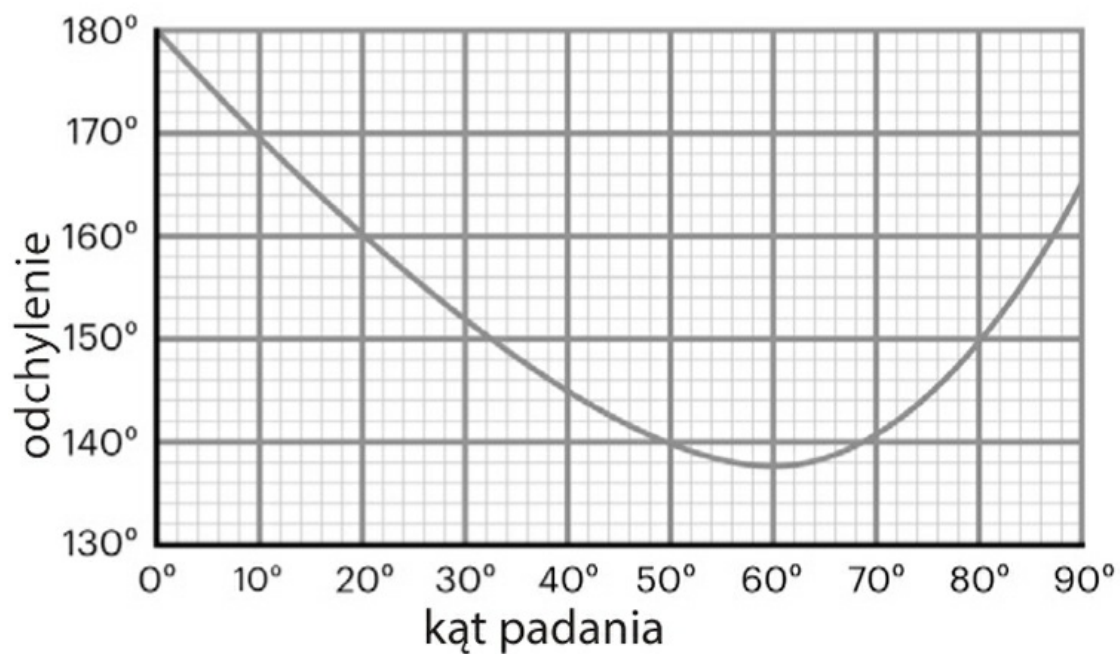
René Descartes jako pierwszy wytłumaczył geometrię tęczy w 1637 roku w eseju pt. *L'arc en ciel*. Co raczej nie powinno dziwić w przypadku ojca geometrii kartezjańskiej, jego metoda opierała się na geometrii. *L'arc en ciel* zawiera dobrze znany i piękny diagram, na którym zaznaczono wszystkie kąty i linie związane z powstawaniem tęczy. Tak Kartezjusz opisywał ten diagram:

Odkryłem, że gdy promieniowanie słoneczne przyszło na przykład z tej części nieba, którą oznaczono AFZ, a moje oko znajdowało się w punkcie E, to gdy umieszczę glob w położeniu BCD, jego fragment D był cały czerwony i dużo jaśniejszy od pozostałej części; a gdy zbliżałem się do niego lub oddalałem się od niego, umieszczałem go po mojej prawej lub lewej stronie, a nawet obracałem wokół mojej głowy, z zastrzeżeniem, że linia DE zawsze była ustawiona pod kątem około 42 stopni względem linii EM, którą rozpatrujemy jako linię od centrum Słońca do oka, część D zawsze wydawała się tak samo czerwona; jednak gdy tylko nieznacznie powiększałem kąt DEM, czerwona barwa znikła; a gdy go zmniejszałem, barwa nie znikła naraz w całości, a dzieliła się na dwie części: już nie tak jasne, w których można było dostrzec barwę żółtą, niebieską i inne (...). Gdy przyjrzałem się dokładniej globowi BCD, aby sprawdzić, co sprawia, że fragment D jest czerwony, odkryłem, że są to promienie słońca, które przechodząc z A do B, zakrzywiają się, wchodząc w wodę w punkcie B i przechodzą do C, gdzie są odbijane do D, gdzie ponownie zakrzywiają się, wychodząc z wody.

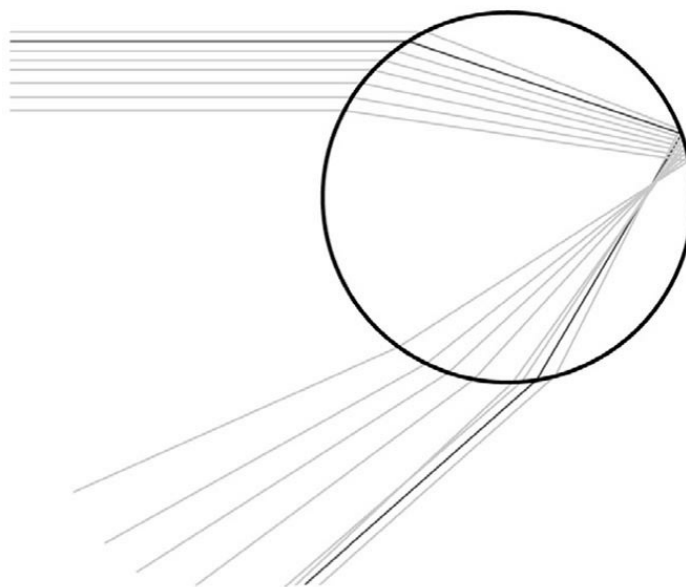
Kartezjusz był w stanie wytłumaczyć łuk, ale nie pochodzenie barw, ponieważ nie wiedział, że białe światło słoneczne złożone jest ze wszystkich barw tęczy. Isaac Newton odkrył ten fakt dopiero 40 lat później. Naszym celem tutaj jest zrozumienie fizyki tęczy, a łatwiej wytłumaczyć zarówno geometrię, jak i wygląd barw jednocześnie, niż odczytując historię odkryć chronologicznie – tak więc zrobimy.



Promień światła ze Słońca wchodzi w kroplę deszczu pod kątem θ . Następnie jest załamany pod kątem ϕ zgodnie z prawem Snelliusa, gdzie $\theta/\sin \phi = n_{f, \text{woda}}/n_{f, \text{powietrze}}$, a $n_{f, \text{woda}}$ oraz $n_{f, \text{powietrze}}$ to współczynniki załamania światła w wodzie i powietrzu. Współczynnik załamania światła zależy od barwy światła – stąd też oznaczenia f . Jeżeli dłużej przyjrzyś się diagramowi, powinieneś być w stanie przekonać się, że $D_f(\theta) = (\theta - \phi) + (180^\circ - 2\phi) + (\theta - \phi)$. Jeżeli będziesz chciał stworzyć wykres $D_f(\theta)$ w zależności od θ , wystarczy podstawić za ϕ zgodnie z prawem Snelliusa. Współczynnik załamania $n_{f, \text{powietrze}}$ jest w przybliżeniu równy 1 dla wszystkich barw, a $n_{f, \text{woda}} = 1,33$ dla światła czerwonego i 1,34 dla światła fioletowego. Wynikowy kąt $D_f(\theta)$ jako funkcja kąta padania promienia na kroplę θ przedstawiono na ilustracji obok.



Odchylenie promienia światła słonecznego wpadającego w kroplę deszczu pod kątem θ .



Wiązka równoległych promieni ze Słońca wchodzi w sferyczną kroplę deszczu pod różnymi kątami względem zakrzywionej powierzchni kropli deszczu. Przy wyjściu z kropli deszczu promienie mają tendencję do skupiania się wzdłuż „kaustyki” lub promienia „tęczy”, oznaczonego tutaj kolorem

ciemnoszarym, który powstaje pod kątem około 138 stopni do kierunku padania promieni słonecznych. Precyzyjny kąt promienia tęczowego zależy od barwy padającego światła, i to właśnie to odpowiada za barwy tęczy.

Górna ilustracja [na stronie 251](#) przedstawia promień światła ze Słońca padający na kroplę deszczu, odbijający się od jej tylnej powierzchni i wpadający do oka obserwatora tęczy. Kąt, o jaki promień jest odchylany względem pierwotnego promienia słonecznego, oznaczono jako $D(\theta)$. Na diagramie Kartezjusza jest to kąt między liniami AB oraz ED. Jeżeli masz skłonności matematyczne, spójrz na obliczenia w opisie. Jeżeli nie masz na to ochoty, spójrz na graficzne przedstawienie kąta $D(\theta)$ na drugiej ilustracji, bo to ona jest kluczowa. Wykres pokazuje, w jaki sposób zmienia się kąt, pod którym światło odbija się od kropli deszczu, gdy zmienia się promień, pod którym światło słoneczne pada na powierzchnię kropli deszczu.

NIERUCHOMA TĘCZA
W MROWIĄCEJ SIĘ,
POSPIESZNEJ MGIEŁCE
KROPEL DESZCZU. CÓŻ
ZA NAGROMADZENIE
OBRAZÓW I UCZUĆ,
FANTASTYCZNEJ
TRWAŁOŚCI POŚRÓD
GWAŁTOWNYCH
PORYWÓW. CISZA —
CÓRKA BURZY.

SAMUEL TAYLOR COLERIDGE

Istotny tutaj jest fakt, że minimalna wartość kąta wychodzącego promienia światła $D(\theta)$ to 138 stopni. To powinno nam coś przypomnieć: $180 - 138 = 42$ stopnie, czyli kąt, do którego doszedł Kartezjusz przy wykorzystaniu metod geometrycznych i obserwacji, a który oznaczył jako DEM na swoim diagramie.

Aby zrozumieć, dlaczego ten szczególny minimalny kąt odpowiada jasnemu łukowi na niebie, spójrz na dolną ilustrację. Przedstawia ona całą wiązkę promieni słonecznych padających na kroplę deszczu, na duży wycinek jej zakrzywionej powierzchni. Wizualnie można zauważyć, że większość wpadających promieni wychodzi z kropli pod „szczególnym” minimalnym kątem, nawet mimo iż wiele z nich pada na kroplę deszczu pod różnymi kątami względem powierzchni. Oznacza to, że padające promienie są skupiane wokół minimalnego kąta 42 stopni, i właśnie dlatego łuk tęczy na niebie jest jaśniejszy niż cokolwiek innego. To efekt skupienia spowodowany sferyczną geometrią kropli deszczu. A mówiąc bardziej matematycznie, promienie, które padają na krople deszczu pod szerokim wachlarzem kątów skupionych wokół 60 stopni, wychodzą z niej pod bardzo podobnym kątem, ponieważ $D(\theta)$ nie zmienia się bardzo szybko w pobliżu wartości minimalnej. Szczególny wychodzący promień, odpowiadający minimalnemu odchyleniu i zaznaczony kolorem ciemnoszarym na diagramie, znany jest jako promień kaustyczny lub tęczowy.

To tłumaczy, dlaczego widzimy jasny łuk, a nie jasność kąta – 138 stopni – czy rozkład kolorów. Wartość kąta zależy od tego, jak bardzo promień światła jest załamany na wejściu i wyjściu z kropli deszczu; związek między kątami θ oraz ϕ na górnej ilustracji. Zależy on od właściwości powietrza i wody; istnieje bardzo prosty związek między dwoma kątami opisany za pomocą prawa Snelliusa, czasami nazywanego prawem Snelliusa-Kartezjusza. To prawo, w różnym stopniu dokładności, jest znane od czasów antycznych i niemal pojawia się w *Optyce* Alhazena, choć nie jest wyraźnie opisane. Jego historia jest zagmatwana, lecz samo prawo jest proste. Przedstawimy je, ale jeżeli nie znasz trygonometrii, po prostu je zignoruj i przejdź do kolejnego zdania: $\sin \theta / \sin \phi = n_{f, \text{woda}} / n_{f, \text{powietrze}}$, gdzie $n_{f, \text{woda}}$ oraz $n_{f, \text{powietrze}}$ to odpowiednio współczynniki załamania dla wody i powietrza. Współczynnik załamania to liczba opisująca, w jaki sposób światło przechodzi przez daną substancję. Mówiąc dokładniej, współczynnik załamania opisuje stosunek prędkości światła w substancji do prędkości światła w próżni. Dla wody współczynnik załamania wynosi około 1,3, co znaczy, że światło porusza się około 1,3 razy szybciej w próżni niż w wodzie. Dla powietrza współczynnik załamania jest bardzo bliski 1. To ta liczba ustala kąt promienia tęczy – możesz samemu prześledzić obliczenia. Krótko mówiąc, kąt tęczy wynosi 42 stopnie, ponieważ krople deszczu są zbudowane z wody.

Na Tytanie, księżycu Saturna, krople deszczu są zbudowane z ciekłego metanu opadającego delikatnie w dół niczym płatki śniegu w gęstej atmosferze. Słońce świeci słabo na tym odległym globie, a atmosfera jest zdominowana przez gęstą mgłę, więc i tęcze należą tam do rzadkości, aczkolwiek pojawiają się w odpowiednich warunkach. Współczynnik załamania ciekłego metanu wynosi 1,29, dzięki czemu tęcze są większe od tych na Ziemi – powstają pod kątem 49 stopni. To dość duża różnica jak na tak niewielką różnicę współczynnika załamania,

jest to też powód barw w tęczy. Nawet w tej samej substancji współczynnik załamania światła jest różny dla różnych barw. W wodzie współczynnik załamania światła czerwonego wynosi około 1,33. Światło niebieskie ma współczynnik załamania około 1,34. Gdy dochodzi do załamania światła na wodnych kroplach deszczu na Ziemi, tęcza wykonana z czerwonego światła jest nieco większa niż ta ze światła niebieskiego. To dlatego zewnętrzny pierścień tęczy jest czerwony, a wewnętrzny jest niebieski, między nimi zaś mieszczą się pozostałe kolory. Krople deszczu rozszczepiają białe światło słoneczne na poszczególne barwy, które je tworzą, ponieważ czerwone światło porusza się z nieco inną prędkością przez wodę niż światło niebieskie.

Wraz z tym wytłumaczeniem pochodzenia tęczy osiągnęliśmy poziom wiedzy reprezentowany przez Newtona w połowie lat osiemdziesiątych XVII wieku. To jednak nie koniec historii – do niego jeszcze daleko. Istnieje wiele subtelnych cech tęczy, które wymagają bardziej zaawansowanego traktowania. Podwójne tęcze pojawiają się, bo tak jak jedno w kroplach deszczu mogą pojawiać się dwa odbicia. Czasami można obserwować delikatne łuki pod lub nad główną tęczą, tak zwane ponadnormatywne łuki, które są skutkiem interferencji, po raz pierwszy wytłumaczonej przez Thomasa Younga w 1804 roku, kiedy to potraktował on światło jako falę. Królewski astronom tamtych czasów, George Biddell Airy, stworzył kompletną teorię tęczy w 1831 roku, rozpoczynając tym samym badania matematyczne nad funkcją Airy’ego prowadzone przez dwóch wielkich matematyków tamtych czasów, Augustusa De Morgana oraz George’a Gabriela Stokesa. Doprowadziły one do kolejnych pytań. Skoro światło traktujemy jako falę, to co faluje? Nikt tego nie wiedział w 1831 roku; odpowiedź odkrył na początku lat sześćdziesiątych XIX wieku szkocki fizyk teoretyczny James Clerk Maxwell – dokładniej przyjrzymy się temu później – i tak jak widzieliśmy już w rozdziale drugim, Albert Einstein jako pierwszy bez zastrzeżeń przyjął teorię światła Maxwella, co pozwoliło mu odrzucić fizykę Newtona i skonstruować nową teorię przestrzeni i czasu. Moglibyśmy podążać tak dalej, i tak też zrobimy, przynajmniej z niektórymi otwierającymi się przed nami ścieżkami.

Zatrzymajmy się jednak na chwilę i zauważmy, że badania tęczy stanowią piękny przykład centralnego tematu tej książki: proste pytania o pochodzenie codziennych zjawisk często – częściej niż rzadziej – prowadzą nas po skomplikowanych ścieżkach przez gęste, związane ze sobą podstawy fizyki. To nie powinno być zaskoczeniem, choć cechą ludzką jest stałe zaskoczenie głębokimi połączeniami charakteryzującymi Naturę; śmiem twierdzić, że jest to jedna z najwspanialszych cech fizyki. Nie powinno to być zaskoczeniem, gdyż ustaliliśmy, a przynajmniej zapewniliśmy na przykładach, że złożony świat, który postrzegamy, jest cieniem prostszych form: podstawowych praw Natury.

Jeżeli tak jest, musi być też tak, że istnieją wspólne wytłumaczenia dla wielu cieni i badanie jednego będzie prowadziło nas do odkrywania głębokich podstaw innego. To dlatego współczesne trendy kierowania badań naukowych na obszary uznawane *a priori* za ekonomicznie lub społecznie użyteczne jest nie tylko błędne, ale też szkodliwe dla całej działalności naukowej, a tym samym dla rządowych doradców, którzy wyznaczają takie durne, choć (aby być miłosiernym) szczerze dyrektywy. Łut szczęścia zawsze zajmował

i zawsze będzie zajmować centralne miejsce w odkryciach, *ponieważ* świat naturalny jest tak sprytnie ze sobą powiązany i z tego, co wiemy, funkcjonuje na bazie niewielkiego zestawu praw fundamentalnych. Istnieje tak wiele sposobów odkrywania głębokich i ostatecznie przydatnych rzeczy, że nie ma sensu marzyć, iż jesteśmy w stanie przewidzieć, które badania którego niewielkiego fragmentu świata naturalnego doprowadzą nas do upragnionego odkrycia. Natura jest na to zbyt skomplikowana. Badania tęczy mogą wydawać się dziwaczne, ale sprowokowały one do wielu wczesnych badań z zakresu optyki i natury światła, a w końcu do badań nad naturą przestrzeni i czasu.

Mimo to kontynuujemy wędrówkę konkretną poplątaną ścieżką, jaką już wcześniej obraliśmy. Badania tęczy stanowiły wprowadzenie i doprowadziły nas do serii pytań o naturę światła, na które teraz powinniśmy poszukać odpowiedzi. Źródło światła padającego na krople deszczu to dobre miejsce na początek. Jak widzieliśmy, w czasach Alhazena trwały ożywione debaty nad tym, czy widzenie jest procesem czynnym czy biernym, a badanie tęczy odegrało rolę w ustaleniu, że światło, które za nie odpowiada, pochodzi ze Słońca.

Dlaczego Słońce świeci?

Dlaczego Słońce emituje światło? Odpowiedź zdawałaby się oczywista: Słońce jest gorące, a wszystko, co gorące, świeci. Ale dlaczego gorące obiekty świecą? To już jest głębsze pytanie. Istnieje też kwestia źródła energii, które w ogóle napędza i ogrzewa Słońce. Ilość energii emitowanej przez Słońce była dobrze znana już w XIX wieku, ponieważ nietrudno ją obliczyć, gdy się zna odległość od Słońca. Jednym ze sposobów jest umieszczenie w bezpośrednim świetle słonecznym znanej objętości wody o znanym polu powierzchni i sprawdzenie, jak długo zajmuje podniesienie temperatury wody o jeden stopień. Taki pomiar pozwoli określić, ile energii dostarczono do wody w zmierzonym czasie. Dokładniejszy pomiar uwzględniałby także utratę energii słonecznej w trakcie podróży światła przez atmosferę.

Pomocne mogą tutaj być obserwacje prowadzone na dużej wysokości. Pierwsze pomiary stałej słonecznej – wyjściowej mocy Słońca – wykonał w 1838 roku Francuz Claude Pouillet. Oszacował on, że na Ziemi, oddalonej o 150 milionów kilometrów od Słońca, na metr kwadratowy pada około 1,2 kW mocy. Współczesne pomiary mocy dostarczanej przez Słońce do górnych warstw atmosfery Ziemi na metr kwadratowy dają wynik około 1,41 kW w styczniu, gdy Ziemia jest najbliżej Słońca, oraz 1,32 kW lipcu, gdy Ziemia jest najdalej od niego; orbita Ziemi wszak jest elipsą ze Słońcem w jednym z jej ognisk. To kolosalna ilość energii.

Wyobraź sobie sferę o promieniu 150 milionów kilometrów emitującą wystarczająco dużo energii do zasilania jasnego reflektora na każdy metr kwadratowy wewnętrznej strony sfery w każdej sekundzie. Czasami liczby są tak duże, że wcale nie pomagają, ale mimo wszystko możemy tutaj odnotować całkowitą moc wyjściową Słońca; to $3,8 \times 10^{23}$ kW. Całkowita zdolność generowania mocy przez naszą cywilizację wynosi obecnie 16×10^9 kW, czyli 20 milionów milionów razy mniej. I oto znów podążamy poplątaną ścieżką, na której początku było proste pytanie. To ogromna ilość energii. Co może być jej źródłem?

Źródło energii słonecznej było tematem kontrowersyjnym pod koniec XIX i na początku XX wieku, ponieważ nikt nie znał żadnego procesu fizycznego zdolnego do utrzymywania tak dużej mocy przez więcej niż kilka tysięcy lat, nie mówiąc już o potężnych rozmiarach i masie naszej gwiazdy. Znów niezwykle trudno wyobrazić sobie skalę rozmiarów Słońca; wzdłuż średnicy Słońca można by było ustawić sto takich planet jak Ziemia. Przeciętny odrzutowy samolot pasażerski potrzebowałby sześciu miesięcy, aby je okrążyć. Tradycyjnie w tym miejscu wypadałoby powiedzieć coś o rozmiarach Walii; trzeba by było 289 milionów krajów o rozmiarach Walii, aby pokryć nimi całą powierzchnię Słońca. Jednak nawet przy tak ogromnych zasobach materii moc wyjściowa Słońca jest trudna do wytłumaczenia. W 1862 roku lord Kelvin, jeden z największych i najbardziej szanowanych uczonych tamtych czasów, ogłosił, że Słońce nie może mieć więcej niż 30 milionów lat, zważywszy na jego kolosalną

moc, co stoi w sprzeczności z szacunkami dotyczącymi wieku Ziemi bazującymi na dowodach geologicznych i biologicznych, które wskazywały na wiek powyżej 300 milionów lat.

Kelvin był zbyt pewny siebie i mylił się, gdyż nie dopuszczał możliwości, że nowa fizyka może dostarczyć wytłumaczenia źródła energii słonecznej. „Powinien także podejrzewać siebie podczas wykonywania krytycznych badań, tak aby uniknąć wpadnięcia w uprzedzenia lub pobłażliwości”; Kelvin dobrze by w tym wypadku zrobił, gdyby poczytał Alhazena. Nowym odkryciem była fizyka jądrowa. Fizycy uwielbiają obliczenia na serwetce i takie też możemy wykorzystać, aby pokazać, jak może nam pomóc fizyka jądrowa. Kelvin obliczył, że jeżeli Słońce wykonane jest z węgla, to jego potężne zasoby materii do spalania, usianej 289 milionami krajów o rozmiarach Walii, zawierałyby wystarczającą ilość „węgla”, aby świeciło ono z obserwowaną jasnością przez 3000 lat. To daje nam jakieś poczucie ilości energii przechowywanej w gwiazdzie. Reakcje chemiczne takie jak spalanie węgla zazwyczaj obejmują rząd energii milion razy mniejszy od reakcji jądrowych. To odzwierciedlenie faktu, że silne oddziaływania jądrowe, które wiążą jądra atomów, są dużo silniejsze niż siła elektromagnetyczna, która wiąże ze sobą atomy. Chemia polega na układaniu atomów, a fizyka jądrowa na układaniu jąder atomowych. Ernest Rutherford odkrył jądro atomowe w maju 1911 roku w Manchesterze i dlatego też Kelvin nic nie wiedział o tej ukrytej warstwie fizyki charakteryzującej się wyższymi energiami. Ponieważ reakcje jądrowe zazwyczaj zachodzą przy udziale energii rzędu milionów razy wyższej od reakcji chemicznych, zwiększają one ilość energii dostępnej dla Słońca o czynnik mniej więcej miliona. To wskazuje wiek co najmniej trzech miliardów lat – wartość dużo bliższą w stosunku do obecnych szacunków długości życia Słońca wynoszących około 10 miliardów lat. Bieżące najlepsze szacunki wieku Słońca na podstawie modeli komputerowych wskazują na 4,57 miliarda lat, co zgadza się z datowaniem radioaktywnym meteorytów w Układzie Słonecznym.

Fizyka jądrowa Słońca

Wszystkie cztery fundamentalne siły Natury, które spotkaliśmy w rozdziale pierwszym, są zaangażowane w reakcje jądrowe uwalniające energię w jądrze Słońca. Gwiazdy zaczynają swoje życie jako obłoki wodoru i helu, których jądra atomowe powstały w pierwszych trzech minutach po Wielkim Wybuchu. Pod wpływem grawitacji obłoki zapadają się na siebie, a to zapadanie powoduje ich ogrzewanie. Gdy temperatura osiąga 100 000 stopni Celsjusza, jądra wodoru i helu nie mogą dłużej utrzymywać swoich elektronów i obłok staje się plazmą – gorącym gazem wolnych, elektrycznie naładowanych cząstek. Podczas gdy proces zapadania się obłoku trwa, temperatura dalej rośnie i w przypadku wystarczająco masywnych obłoków gołe jądra wodoru zbliżają się do siebie z takimi prędkościami, że pomimo wzajemnego odpychania elektromagnetycznego – przypomnij sobie, że jądro wodoru to pojedynczy proton niosący dodatni ładunek elektryczny – mogą się do siebie bardzo zbliżyć. Gdy tak się dzieje, zachodzi transformacja pod wpływem słabego oddziaływania jądrowego. Napotkaliśmy już tę transformację w rozdziale pierwszym, gdy wspominałem o swojej pracy w Hamburgu nad fizyką cząstek. Był tam taki punkt na tle skromnej biografii, gdzie poznawaliśmy składniki materii za pomocą akceleratora cząstek, a także poprzez spożywanie czerwonego wina i dobrych serów oraz próby doprowadzenia do podagry. Fizyka powinna być radosna. Ale chyba trochę zboczyłem z tematu... Przypomnij sobie, że proton składa się z dwóch kwarków górnych i jednego kwarka dolnego, a neutron z dwóch kwarków dolnych i jednego górnego. Słabe oddziaływania jądrowe mogą zamienić kwark górny w kwark dolny, przez co proton może zamienić się w neutron, przy jednoczesnym powstaniu pozytronu i neutrino. Neutrony są elektrycznie obojętne i pozbawione dodatniego ładunku elektrycznego, który jest odprowadzony przez pozytron; mogą swobodnie zbliżać się do protonów na tyle, aby silne oddziaływanie jądrowe przeważało i ciasno je ze sobą połączyło. Powstałe w ten sposób jądro atomowe składa się z jednego protonu i jednego neutronu i nazywa się deuteron.

Powstanie deuteronu z dwóch protonów to fuzja jądrowa. Proces ten uwalnia olbrzymie ilości energii, ponieważ deuteron jest mniej masywny od dwóch wolnych protonów. Einstein odkrył, że masa może być zmieniona w energię zgodnie z równaniem $E = mc^2$ (wykorzystując do tego równania Maxwella opisujące naturę światła – zawiła ścieżka), i to właśnie energia fuzji jądrowej jest źródłem energii wszystkich gwiazd nocnego nieba.

Liczby, o których mówimy, są absolutnie ogromne; gdybyśmy mogli wziąć centymetr sześcienny wnętrza Słońca i zamienić wszystkie protony w deuterony, moglibyśmy nimi zasilić przeciętnych rozmiarów miasto przez rok. Wewnątrz Słońca proces fuzji nie zatrzymuje się na stworzeniu deuteronów. Kolejny proton szybko ulega fuzji z deuteronem, tworząc jądro helu-3, a dwa jądra helu-3 ulegają fuzji w jądro helu-4 przy jednoczesnym uwolnieniu dwóch protonów. Na każdym z tych etapów masa zamieniana jest w energię, która ogrzewa gwiazdę. Energia ta także powstrzymuje kolaps grawitacyjny, ponieważ superogrzana

plazma wywiera ciśnienie na zewnątrz, które równoważy przyciąganie grawitacyjne materii do wewnątrz. To dlatego gwiazdy są tak długowiecznymi obiektami – egzystują w delikatnej, choć stabilnej równowadze tak długo, jak długo mają paliwo nuklearne do spalania w jądrze. Nasze Słońce spala 600 milionów ton paliwa wodorowego na sekundę w helu, tracąc przy tym cztery miliony ton masy uwalnianej pod postacią energii. Aby zrozumieć, na ile pojedynczych reakcji fuzji to się przekłada, zważ, że co sekundę, gdy czytasz tę książkę, przez twoją głowę przelatuje 60 miliardów neutrin ze Słońca na każdy centymetr kwadratowy, a tylko jedno neutrino powstaje za każdym razem, gdy proton zamienia się w neutron. O neutrinach powiemy więcej trochę później, gdyż są one bardzo interesujące. W tym tempie Słońce posiada wystarczająco dużo paliwa nuklearnego, aby przetrwać kolejne pięć miliardów lat do czasu, kiedy rozpocznie się proces fuzji helu w węgiel i tlen, a w końcu wyczerpie wszystkie możliwości generowania energii w procesie fuzji i zapadnie się w gasnącą kulę znaną jako biały karzeł.

CZY NIE WSZYSTKIE
CIAŁA STAŁE OGRZANE
POWYŻEJ PEWNEGO
PROGU EMITUJĄ
ŚWIATŁO I ŚWIECĄ;
I CZY TA EMISJA
NIE JEST DZIEŁEM
WIBRACJI ELEMENTÓW
SKŁADOWYCH TAKIEGO
CIAŁA?

Białe karły są gęstymi, egzotycznymi obiektami opierającymi się miażdżącej sile grawitacji dzięki efektowi z mechaniki kwantowej znanemu jako zakaz Pauliego. To obiekty o rozmiarach planet i masie gwiazdy; kostka cukru zbudowana z materii białego karła ważyłaby tonę. Odsłonięte węglowo-tlenowe jądro Słońca będzie stopniowo wypromieniowywać swoje ciepło, ciemniejąc i zamieniając się w czarnego karła; w takim stanie będzie istniało jeżeli nie wiecznie, to z pewnością przez bardzo długi czas. Za 1000 miliardów lat pozostałość po gwiazdzie zniknie z pola widzenia wraz ze spadkiem swojej temperatury. Jej dalszy los zależy od fizyki, którą jeszcze musimy poznać. Uważa się, że materia sama w sobie jest niestabilna w dużych skalach czasowych, i jeżeli tak faktycznie jest, to czarne karły odparują przy wystarczająco długim czasie – którego prawdopodobnie jest nieskończona ilość. Dolne ograniczenia czasu życia

czarnych karłów wskazują, że mogą one istnieć co najmniej przez 10^{32} lat, czyli 10 tysięcy miliardów miliardów razy dłużej niż obecny wiek Wszechświata.

Fuzja jądrowa stanowi źródło energii Słońca, a tym samym źródło jego światła. Jednak procesy fizyczne, które wytwarzają światło docierające do Ziemi, są inne. To świecąca powierzchnia Słońca, którą widzimy na niebie, a nie jego ukryte, zasilane nuklearnie jądro. Powierzchnia Słońca ma temperaturę zaledwie 5500 stopni Celsjusza i promieniowanie przez nią emitowane jest charakterystyczne dla tej temperatury, a nie dla 15 miliardów stopni – temperatury, w której zachodzą reakcje fuzji.

Fakt, że obiekty emitują światło zgodnie ze swoją temperaturą, jest powszechnie znany. Mówimy, że coś jest rozgrzane do białości, wiemy o chłodniejszych czerwonych węgielkach w gasnącym ognisku. Temperatura obiektu jest związana z barwą emitowanego światła i to jest wskazówka do pochodzenia światła. Proste pytania prowadzą do głębokich odpowiedzi, a pytanie o to, jak gorące rzeczy emitują światło, jest *klasycznym na to przykładem*. Przede wszystkim trzeba powiedzieć, że jest to bardzo stare pytanie; Isaac Newton zajmował się nim w swojej pracy o świetle pt. *Opticks* opublikowanej w 1704 roku, a sugerowana przez niego odpowiedź zasadniczo jest prawidłowa. „Czy nie wszystkie ciała stałe ogrzane powyżej pewnego progu emitują światło i świecą; i czy ta emisja nie jest dziełem wibracji elementów składowych takiego ciała?” To ruch elementów składowych materii emituje światło, ale dopiero w połowie XIX wieku zaczęliśmy rozumieć mechanizm odpowiadający za emisję, a poszukiwanie odpowiedzi z czasem doprowadziło do teorii kwantowej i stworzenia technologicznych fundamentów, na których spoczywa nowoczesne społeczeństwo.

Dlaczego gorące rzeczy świecą?

Część 1: James Clerk Maxwell i złoty wiek bezprzewodowy

Materia zbudowana jest z elektrycznie naładowanych cząstek, a gdy takie cząstki obijają się o siebie, emitują światło. Dokładniej: emitują promieniowanie elektromagnetyczne. Odkrycie, że światło jest zjawiskiem elektromagnetycznym, to dzieło szkockiego fizyka Jamesa Clerka Maxwella, który opisał to zjawisko w serii artykułów naukowych opublikowanych w latach 1861–1862.

Spotkaliśmy już równania Maxwella w rozdziale drugim, gdzie stanowiły one inspirację dla szczególnej teorii względności Einsteina. Krótko mówiąc, Maxwell odkrył zunifikowany opis eksperymentalnych i teoretycznych prac pokoleń fizyków, wśród których znajdują się nazwiska uwiecznione dzisiaj w nazwach jednostek wykorzystywanych do opisywania elektryczności: volt, amper, farad czy gauss. Gdyby jednak jedynym dokonaniem Maxwella było to uproszczenie, Einstein nie nazwałby jego pracy „najważniejszym i najbardziej owocnym osiągnięciem fizyki od czasów Newtona”.

Wielkim wyczynem Maxwella była nie tyle unifikacja, ile odkrycie czegoś zupełnie nowego. Maxwell odkrył, że światło jest związane z elektrycznością i magnetyzmem, co opisał w swojej pracy, prezentując jeden z najwyraźniejszych przykładów tego, co fizyk Eugene Wigner określił jako *nierozsądna* skuteczność matematyki w naukach fizycznych – twierdzeniem, że piękno matematyki, czasami samej, może prowadzić do głębszego zrozumienia świata fizycznego.

Do połowy XIX wieku Faraday wraz z innymi odkrył, że elektryczność i magnetyzm są ze sobą związane. Jeżeli puścimy impuls prądu elektrycznego przez przewód, igła kompasu znajdującego się w pobliżu przewodu ulegnie odchyleniu w momencie przesłania impulsu. Jeżeli będziemy wsuwać i wysuwać magnes do wnętrza cewki, to w przewodzie tworzącym cewkę popłynie prąd. To podstawa silnika i generatora elektrycznego. Faraday dużo myślał o związku przewodów z magnesami. Dowodził, że musi istnieć swego rodzaju fizyczny związek między prądem elektrycznym w przewodzie a igłą kompasu, aby dało się wytłumaczyć odchylenie igły; wszak obiekty same z siebie się nie poruszają. To fizyczne połączenie Faraday przedstawiał jako „pole” mogące być zwizualizowane jako wzór, w który układają się opiłki żelaza rozrzucone na kartce papieru trzymanej nad magnesem.

Raczej mechaniczna idea pola elektrycznego i magnetycznego zaprezentowana przez Faradaya nie była zbyt szeroko akceptowana w tamtych czasach, przede wszystkim dlatego, że nie wydawała się potrzebna. Równania matematyczne opisujące zjawiska elektryczne i magnetyczne były zapisywane przy wykorzystaniu cech, które można bezpośrednio zmierzyć – voltów, amperów i sił, powodujących odchylenie igły kompasu. Głębszy poziom abstrakcji reprezentowany przez pola wydawał się rodzić niepotrzebne komplikacje.

Maxwell odkrył, że tak jednak nie jest. Zajął się owym głębszym opisem i przepisał

wszystkie równania opisujące zjawiska elektryczne i magnetyczne przy wykorzystaniu pola magnetycznego i elektrycznego zamiast prądów, napięć i sił. Aby tego dokonać, był zmuszony dodać dodatkowy wyraz do jednego z równań, by utrzymać spójność matematyczną. Wyraz ten, zwany prądem przesunięcia, miał nieprawdopodobne skutki. Gdy już się pojawił, Maxwell zauważył, że może przepisać swoje równania w inny sposób, jako równania fali. W tej formie równania opisują samonapędzające się zaburzenie pola elektrycznego i magnetycznego.

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0,$$

$$\nabla^2 B - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} = 0.$$

Równania fali dla pola elektrycznego i magnetycznego.

Opracowane przez Maxwella równania fali można zobrazować jako opis przepływu energii na przemian między polami magnetycznym i elektrycznym, promieniującej na zewnątrz z zaburzenia elektromagnetycznego, tak samo jako fale rozbiegają się po powierzchni stawu na zewnątrz od miejsca, w którym kamień uderzył o powierzchnię. Różnica jest taka, że w tym przypadku nie potrzeba wody ani żadnego innego ośrodka, który podtrzymywałby zaburzenie – pola same w sobie wystarczają do odprowadzania energii poprzez naprzemienne narastanie i opadanie. Sam w sobie to fascynujący wniosek, ale w zanadru było jeszcze jedno wielkie i wspaniałe osiągnięcie. Nie potrafię sobie wyobrazić, jak zareagował na nie Maxwell; musiał poczuć, że pozwolono mu zajrzeć za kulisy jednej z prawdziwych podstaw Natury. To samonapędzające się zaburzenie posiada prędkość, zgodnie z równaniami fali Maxwella – w równaniu [na stronie 269](#) przedstawiono ją za pomocą symbolu c . Prawdopodobnie prędkość ta zależy od natężenia siły elektrycznej i magnetycznej – ilości tego, o ile zmiana jednego pola indukuje zmianę drugiego. Prędkość określa się jako stosunek siły natężenia dwóch sił, a Maxwell znał te wartości, bowiem Faraday jak i inni zmierzili je eksperymentalnie w swoich laboratoriach. Jeżeli pamiętasz cokolwiek ze szkolnych lekcji o elektromagnetyzmie, zapewne znajomo brzmią dla Ciebie następujące nazwy i symbole: przenikalność elektryczna ϵ_0 oraz przenikalność magnetyczna μ_0 . Gdy Maxwell wstawił te wartości do równań, odkrył, że prędkość zaburzenia okazała się prędkością światła! Natychmiast wiedział, że odkrył głębszy opis natury samego światła: światło jest przemieszczającym się zaburzeniem pola elektromagnetycznego, które pędzi z prędkością dokładnie 299 792 458 metrów na sekundę.

Einstein opisał swoje wyobrażenie tego, jak Maxwell musiał się wtedy czuć, w eseju pt. *The Fundamentals of Theoretical Physics*: „Wyobraź sobie jego uczucia, gdy równania różniczkowe, które opracował, dowiodły, że pola elektromagnetyczne rozprzestrzeniają się

w formie spolaryzowanych fal i z prędkością światła! Takie doświadczenie zarezerwowano dla niewielu ludzi na świecie. W tym ekscytującym momencie z pewnością nie wiedział, że zagadkowa natura światła, pozornie już kompletnie rozwiązana, będzie nadal fascynowała kolejne pokolenia. W międzyczasie naukowcy potrzebowali kilku dekad, aby w pełni docenić znaczenie odkrycia Maxwella, tak wielki skok jego geniusz zafundował jego współpracownikom”.

Słowa te stanowią wgląd nie tylko w skalę odkrycia Maxwella, ale także w umysł prawdziwego badacza Natury. To jedno z najwspanialszych uczuć dostępnych człowiekowi – odkryć jakiś fakt dotyczący fizycznego świata po raz pierwszy. Nieliczni otrzymali przywilej prawdziwego odkrycia, ale przejmujące podekscytowanie zrozumieniem nowego faktu jest dostępne każdemu – to właśnie zachęca dziecko do wyboru kariery naukowca.

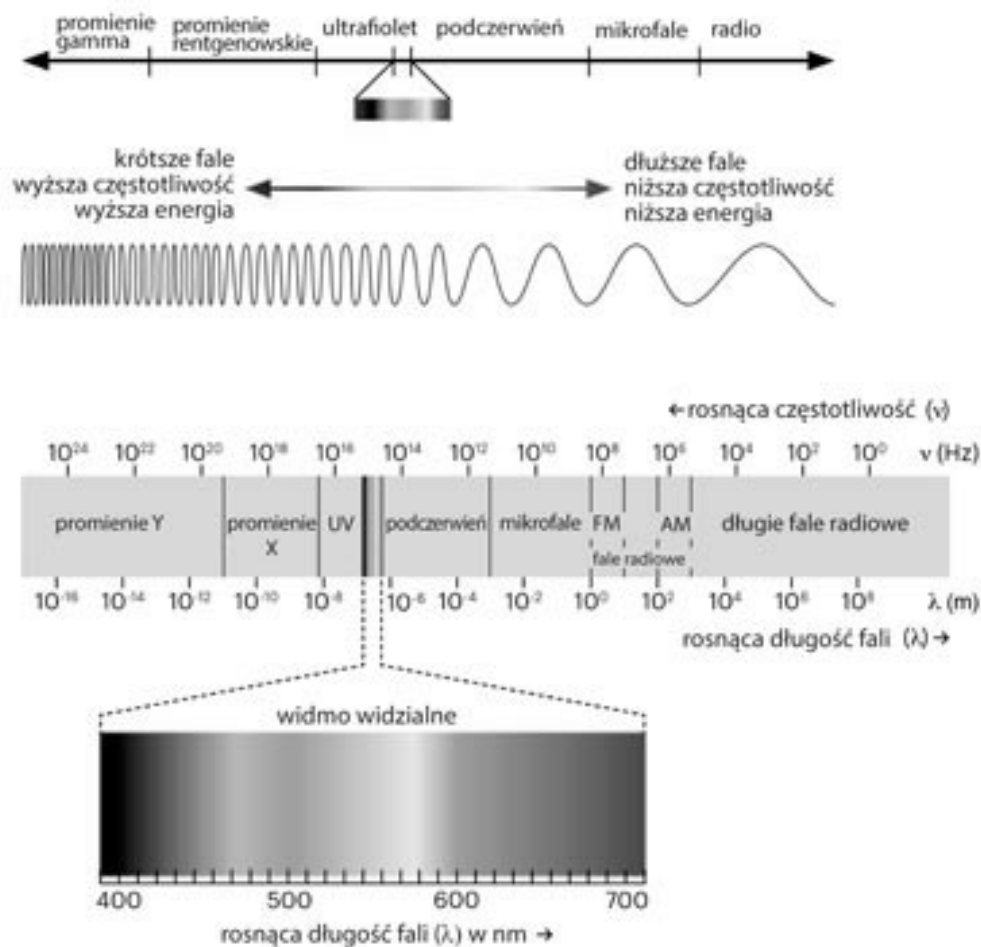
To interesujące i zapewne wiele mówiące o charakterze Einsteina, że nie wspomniał tu, jak przydatne okazały się odkrycia Maxwella. Heinrich Hertz potwierdził istnienie fal elektromagnetycznych w serii eksperymentów przeprowadzonych między 1886 a 1889 rokiem, które przypadkiem doprowadziły do stworzenia przekaźnika radiowego. Piszę „przypadkiem”, bo gdy jeden z jego studentów zadał mu odwieczne pytanie, które tak często męczą naukowców: „Do czego to się może przydać?”, Hertz odpowiedział: „Absolutnie do niczego. To tylko eksperyment, który dowodzi, że mistrz Maxwell miał rację. Potwierdziliśmy istnienie tych tajemniczych fal elektromagnetycznych, których nie można dostrzec gołym okiem. Ale one tam są”.

Czytając artykuł Hertza z 1888 roku, młody Włoch Guglielmo Marconi zauważył, że prace Hertza można wykorzystać do przesyłania sygnałów, a do 1901 roku (podobno), a z pewnością do 1902, opanował przesyłanie informacji za pomocą fal radiowych przez Ocean Atlantycki, zaledwie dekadę po tym, jak Hertz stwierdził, że jego badania nie mają większego praktycznego znaczenia. Marconi otrzymał Nagrodę Nobla za swoją pionierską pracę nad transmisjami radiowymi w 1909 roku. Często się tak dzieje w badaniach z zakresu fizyki podstawowej; każdy, kto pracuje w CERN lub w NASA, lub w Europejskiej Agencji Kosmicznej, lub w Europejskim Obserwatorium Południowym, lub w dowolnej dziedzinie, która nie produkuje łatwo identyfikowalnych skutków, musiał z pewnością uzasadniać wydatki na pozyskiwanie wiedzy w celu zaspokojenia ciekawości na tym czy innym etapie swojej kariery. Wspomnienie tutaj, że osoba zadająca pytanie prawdopodobnie już by nie żyła, gdyby szkocki biolog Alexander Fleming wiedziony ciekawością nie wyizolował penicyliny w 1928 roku, rzadko jest wystarczające. Jak Fleming później mawiał: „Gdy obudziłem się o świcie 28 września 1928 roku, z pewnością nie planowałem zrewolucjonizować całej medycyny, odkrywając pierwszy na świecie antybiotyk, ale jak widać tak się stało”. W jaki sposób ktokolwiek może nie rozumieć, że wiedza o świecie naturalnym, w którym żyjemy i którego częścią jesteśmy, nie może być nieprzydatna. Może Fleming mógł zaznaczyć w swoim testamencie, że tym, którzy nie potrafią tego zrozumieć, powinno się odmawiać tego nieoczekiwanego odkrycia? Darwinowe rozwiązanie problemu głupoty, ale ewolucja przez dobór naturalny także jest faktem.

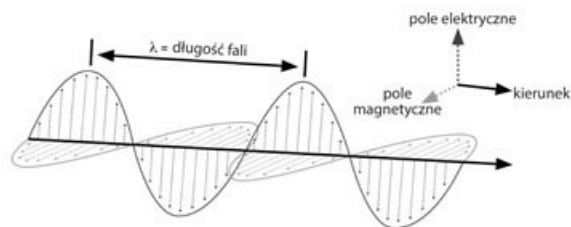
Einstein wskazuje również kierunek wiodący do cennych wniosków, które będą skutkiem odkrycia Maxwella: „z pewnością nigdy nie przypuszczał, że zagadkowa natura światła, pozornie całkowicie rozwiązana, będzie zaskakiwała kolejne pokolenia”. Jak już widzieliśmy w rozdziale drugim, Einstein tak bardzo uznawał wartość odkrycia Maxwella, ponieważ uniwersalna prędkość światła była wskazówką, która doprowadziła go do zastąpienia praw ruchu Newtona szczególną teorią względności. Jako taki jest to najpiękniejszy dowód przenikającego się charakteru fizyki fundamentalnej. Badanie prądów elektrycznych w przewodach z czasem prowadzi do przeformułowania naszej wiedzy o przestrzeni i czasie. Ale jest tego dużo więcej! F. Scott Fitzgerald mawiał, że wstawianie wykrzyknika przypomina śmianie się z własnego dowcipu, lecz postaram się teraz uzasadnić jego użycie.

Światło jako fala elektromagnetyczna

Według Maxwella światło jest falą i dlatego też charakteryzuje się długością fali. Długość fali definiuje się jako odległość pomiędzy kolejnymi grzbietami fali (zob. ilustracja na następnej stronie). Fale światła widzialnego stanowią niewielki wycinek fal elektromagnetycznych podróżujących po całym Wszechświecie. Zajmują one zakres długości fali od około 400 nanometrów (400 miliardowych części metra) w kolorze niebieskim do 700 nanometrów w kolorze czerwonym. Za czerwienią widmo elektromagnetyczne rozciąga się do takich długości fali, które są za długie, aby nasze oczy mogły je wykryć. To wciąż jest światło – naprzemienne falowanie pola elektrycznego i magnetycznego przemieszczające się przez pustkę – tyle że nasze oczy nie wyewoluowały, aby je rejestrować. Zamiast tego czujemy je jako ciepło kominka czy ciepły grunt pod koniec gorącego letniego dnia. Poza podczerwienią docieramy do mikrofal, których długości fali są rzędu rozmiarów mikrofalówki. Następnie widmo płynnie przechodzi w zakres radiowy, gdzie długości fali są rozmiarów gór. Przez większą część naszej historii byliśmy nieświadomi istnienia tych rodzajów światła, ale do niedawna każdy posiadał detektor zdolny przechwytywać i zamieniać je na dźwięk. Włączając staromodne radio, po prostu dostrajasz obwód elektroniczny tak, aby był czuły na określoną długość fali światła wyemitowanego przez nadajnik. Muzykę można zakodować w fali, zmieniając amplitudę fal (radio AM – skrót od ang. *amplitude modulation*, czyli modulacja amplitudy) lub samą długość fal (radio FM – skrót od ang. *frequency modulation*, czyli modulacja częstotliwości). Obecnie najprawdopodobniej słuchasz muzyki w Internecie, ale jeżeli korzystasz z wi-fi, fale elektromagnetyczne dostarczają ci danych na falach o długości rzędu 10 centymetrów.



Widmo elektromagnetyczne



Światło jako fala elektromagnetyczna. Długość fali to odległość między dwoma grzbietami.

Tak samo jak dużo jest światła widzialnego we Wszechświecie, które nie zostało wytworzone przez człowieka, tak samo mamy do czynienia z naturalnie występującymi mikrofalami i falami radiowymi. I tak jak w przypadku światła widzialnego z najodleglejszych galaktyk, promieniowanie mikrofalowe i radiowe przenosi informacje o tych odległych miejscach przez cały Wszechświat, aż do naszych sztucznych oczu. Niebo

spowite jest blaskiem na długości fali 21 centymetrów, czyli na długości, która charakteryzuje fale emitowane przez atomy wodoru, gdy ich samotny elektron zmienia spin ze zgodnego z protonem na przeciwny. Urządzenia takie jak 76-metrowy teleskop Lovella w Obserwatorium Jodrell Bank Uniwersytetu Manchesterskiego skanuje niebo na lub w pobliżu tej długości fali.

Na mniejszych długościach fali, poza zakresem widzialnym, znajduje się promieniowanie ultrafioletowe. Słońce świeci jasno w zakresie UV, którego nie możemy dostrzec, ale czujemy jego wpływ na naszą skórę, gdy doznamy poparzeń słonecznych. Na jeszcze mniejszych długościach fali mamy promieniowanie rentgenowskie, które może przenikać skórę, tak jak światło widzialne przenika szkło, ale jest pochłaniane przez kości, dzięki czemu jest przydatne w obrazowaniu medycznym. W końcu na ultrakrótkich długościach fali mamy promieniowanie gamma emitowane przez wysokoenergetyczne zdarzenia astrofizyczne, takie jak eksplozje supernowych czy jądrowy proces rozpadu radioaktywnego. Rozbłyski promieniowania gamma są jednymi z najbardziej energetycznych zjawisk w znanym Wszechświecie; to jasne błyski promieniowania elektromagnetycznego, za których źródło uważa się śmierć supermasywnych gwiazd lub zderzenia w układach podwójnych gwiazd neutronowych. Najjaśniejsze rozbłyski promieniowania gamma uwalniają energię porównywalną z przekształceniem setki planet takich jak Ziemia w czyste promieniowanie.

Dlaczego gorące rzeczy świecą?

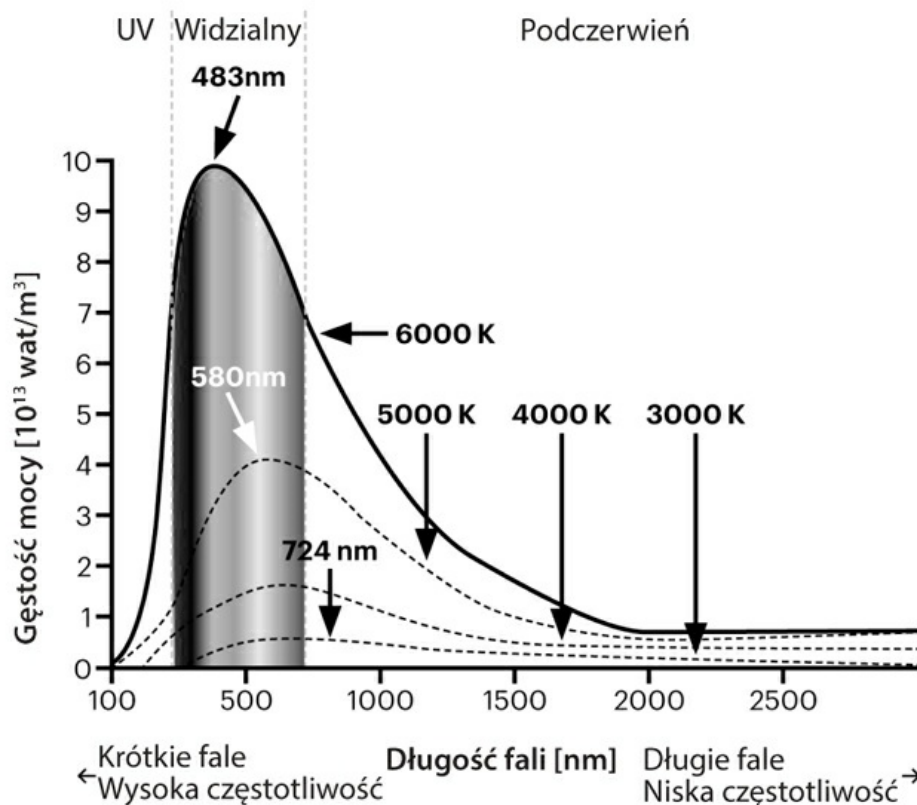
Część 2: Max Planck i kwantowa rewolucja

Teraz rozumiemy w dużym uogólnieniu, że materia emituje światło, ponieważ składa się ona z poruszających się elektrycznie naładowanych cząstek. W języku pól, gdy ładunki elektryczne się poruszają, tworzą zmieniające się pole magnetyczne, które tworzy zmieniające się pole elektryczne, które tworzy zmieniające się pole magnetyczne i tak dalej, a powstałe w ten sposób przemieszczające się zaburzenie to *jest* światło. Równania Maxwella opisują ten proces matematycznie.

Taki opis natychmiast powinien wskazywać na związek między temperaturą czegoś a emitowanym przez to coś światłem. Temperatura obiektu jest miarą tego, jak szybko poruszają się jego składniki; im wyższa temperatura, tym szybciej się poruszają, a tym samym emitują „więcej światła”. Celowo użyliśmy tu ogólników, ale szczegóły także się liczą. Prawidłowa odpowiedź, odkryta przez niemieckiego fizyka Maxa Plancka w 1900 roku, doprowadziła do wprowadzenia fundamentalnej stałej fizycznej, która legła u podstaw teorii kwantowej – to stała Plancka.

Oto dlaczego mogliśmy użyć wykrzyknika, ignorując Fitzgeralda. Poszukiwanie odpowiedzi na pytanie, jak gorące rzeczy emitują światło, doprowadziło nas przez równania Maxwella do drzwi szczególnej teorii względności Einsteina. Teraz znów stoimy przed kolejnymi drzwiami, za którymi znajduje się kolejny wielki posąg fizyki XXI wieku, teoria kwantowa. Ponownie stoimy twarzą w twarz z licznymi połączeniami wewnątrz fizyki. Bez zrozumienia teorii kwantowej nie zrozumielibyśmy struktury atomów, nie posiadlibyśmy właściwych teorii opisujących działanie trzech z czterech fundamentalnych sił Natury, czy też nie bylibyśmy w stanie odczytywać informacji o odległych planetach z odbitego od nich światła. Na bardziej prozaicznym poziomie nie byłoby tranzystorów, nie byłoby elektroniki, a współczesny świat byłby zupełnie innym miejscem. Wyobraź sobie iPhone’a zasilanego zaworami; miałby beznadziejny czas pracy na baterii.

Błyskotliwa myśl dosięgła Plancka wieczorem 7 października 1900 roku. Wiemy o tym, ponieważ przedpołudnie spędził w swoim domu w Berlinie z kolegą, Heinrichem Rubensem, dyskutując o teoretycznych modelach emisji promieniowania przez gorące obiekty. Wyniki eksperymentalne, które były dobrze znane i bardzo precyzyjne, przedstawiono na ilustracji poniżej.



Długości fali światła wypromieniowywanego przez gorący obiekt zależy od jego temperatury. Gorętsze obiekty wypromieniowują więcej światła na mniejszych długościach fali.

Problem ówczesnych modeli teoretycznych polegał na tym, że przeszacowywały ilość promieniowania na krótkich falach emitowanego w danej temperaturze. Użycie terminu „przeszacowanie” to zdecydowanie za mało; preferowany przed Planckiem model, znany jako prawo Rayleigha-Jeansa, przewidywał nieskończoną ilość energii wypromieniowywanej na krótszych falach przez gorące obiekty.

Oczywiście tak nie jest. Problem leży w użyciu jednego z podstawowych twierdzeń fizyki klasycznej, tak zwanej zasady ekwipartycji energii. Jeżeli zbiór materii rozważymy jako zbiór małych oscylujących ładunków elektrycznych emitujących światło zgodnie z równaniami Maxwella, to zasada ekwipartycji energii mówi, że wszystkie oscylacje dostępne dla ładunków elektrycznych zajdą i wszystkie po równo będą dzielić między sobą dostępną energię. Szybsze vibracje odpowiadają mniejszym długościom fali, a zgodnie z klasyczną teorią więcej szybkich vibracji dostępnych jest dla cząstek naładowanych niż wolnych. Skoro nie ma żadnego powodu, dla którego szybsze oscylacje nie mogą zachodzić, powinny one dominować i więcej światła powinno być wypromieniowywane na krótkich falach, w postaci promieniowania ultrafioletowego, po prostu dlatego, że jest tam więcej dostępnych vibracji.

Problem ten znany był jako katastrofa w ultrafiolecie, ponieważ nic się tam tak nie zachowuje. W rzeczy samej, jak widać na wcześniejszej ilustracji, chłodniejsze obiekty nie emitują prawie wcale w zakresie ultrafioletowym.

Gdy Rubens opuścił dom po długim obiedzie, Planck nie był ani o krok bliżej rozwiązania, ale przed wieczorem wysłał swojemu przyjacielowi równanie zapisane na tylnej stronie pocztówki. Planck opisał ten czyn jako akt desperacji, po tym jak wypróbował już wszystko, co mu przychodziło do głowy. W swojej naukowej biografii Alberta Einsteina Abraham Pais napisał, że wnioskowanie Plancka było „szalone, aczkolwiek jego szaleństwo ma tę boską cechę, którą tylko największe postacie mogą dostarczyć nauce”.

Z nieznanych powodów, nieznanych nawet dla niego samego, Planck zdecydował, że światło może być emitowane tylko w pakietach lub kwantach, których energia zależy od ich długości fali zgodnie z regułą $E = hc/\lambda$, gdzie c to prędkość światła, λ to długość fali światła, a h to zupełnie nowa stała Natury, teraz znana jako stała Plancka. Wykorzystując to założenie, Planck był w stanie uzyskać prawidłowy opis widma światła emitowanego przez obiekt o danej temperaturze. Aby zrozumieć, jak to działa, zauważ, że wzór Plancka mówi, iż mniejsze długości fali przenoszą więcej energii, a skoro istnieje ograniczona ilość energii, krótsze fale będzie coraz trudniej wypromieniowywać. Ekstremalny scenariusz przypada na długość fali, która wymaga więcej energii, niż jest obecna w obiekcie: założenie Plancka dostarcza naturalnego punktu odcięcia na końcu widma w krótkich falach, rozwiązując tym samym katastrofę w ultrafiolecie.

Planck uważał to za sprytną sztuczkę matematyczną i nie doceniał jej fundamentalnego fizycznego znaczenia przez wiele lat. Powodem, dla którego cytujemy tutaj biografię Einsteina, jest fakt, że to ponownie Einsteinowi przypadło potraktowanie przewidywań Plancka jako fundamentalnego odkrycia dotyczącego Natury. W 1905 roku zaproponował, że światło nie tylko jest emitowane i pochłaniane w małych pakietach, ale *de facto* składa się z małych pakietów zwanych fotonami. To nie jest trywialne rozróżnienie. Do czasów Einsteina wszyscy zakładali, że odkrycie Plancka odnosi się do struktury samej materii, a nie do pola elektromagnetycznego Maxwella, które musi oscylować swobodnie zgodnie z jego pięknymi równaniami. Einstein zasugerował coś znacznie bardziej radykalnego – że pole elektromagnetyczne składa się z małych cząstek światła. Tak jak zamienił prawa Newtona szczególną względnością, Einstein przypuszczał, że równania Maxwella stanowią przybliżenie czegoś głębszego. Dopiero w 1913 roku Planck nic sobie z tego nie robił. We wniosku wspierającym przyjęcie Einsteina do Akademii Pruskiej w tym roku pisał: „Podsumowując, można powiedzieć, że praktycznie nie ma żadnego spośród wielkich problemów, jakich pełna jest współczesna fizyka, do którego rozwiązania Einstein nie wniósł znaczącego wkładu. Tego, że czasami mógł nie trafiać ze swoimi spekulacjami, jak na przykład prezentując hipotezę dotyczącą kwantów światła, nie można mieć mu za złe, ponieważ niemożliwe jest wprowadzanie nowych idei nawet w najbardziej dokładnych naukach bez podejmowania przy tym ryzyka”.

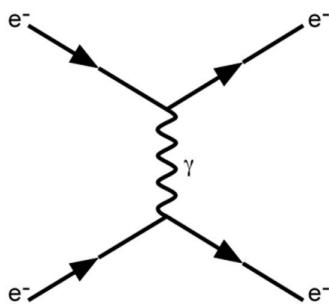


Diagram Feynmana przedstawiający elektron emitujący foton, który następnie pochłaniany jest przez inny elektron.

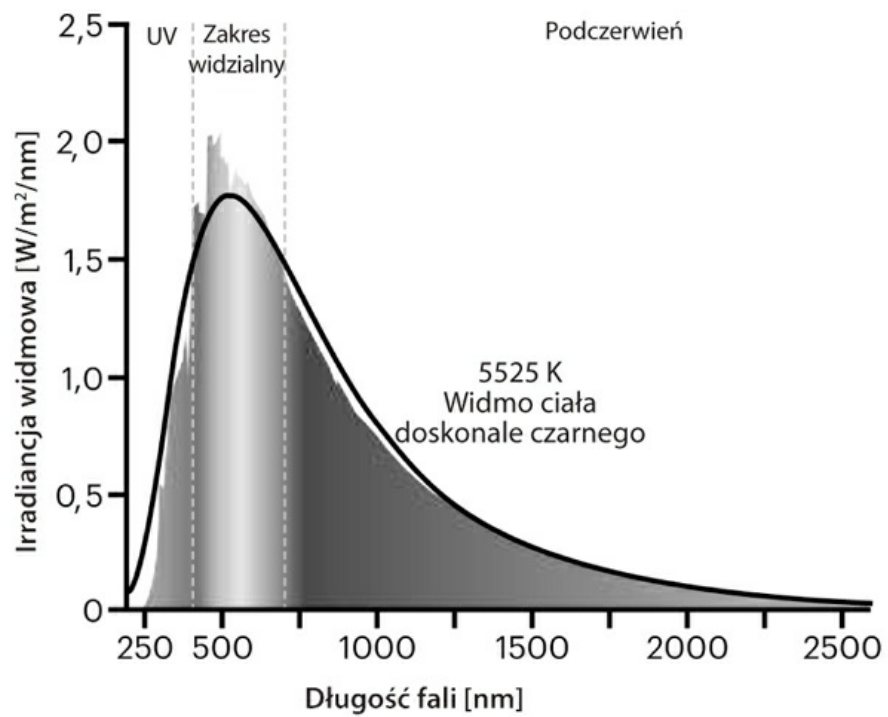
Instynkt Einsteina jak zwykle okazał się nieomylny. Istnieje głębsza teoria niż ta zaprezentowana przez Maxwella; jest to elektrodynamika kwantowa sformułowana przez Richarda Feynmana i innych w latach czterdziestych i pięćdziesiątych XX wieku. To właśnie za tę teorię Feynman, Julian Schwinger oraz Shin'ichirō Tomonaga otrzymali w 1965 roku Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki. Einstein natomiast dostał Nobla w 1921 roku za swoje wytłumaczenie tak zwanego efektu fotoelektrycznego, który bazował na odkryciu Plancka. Światło świecące na metalową powierzchnię powoduje uwalnianie elektronów z tej powierzchni, jeżeli jednak światło ma długość fali powyżej pewnego progu, nie dojdzie do uwolnienia żadnego elektronu niezależnie od tego, jak jasne jest to światło. Wytłumaczeniem jest fakt, że fotony światła o zbyt dużej długości fali mają za mało energii, niż potrzeba do uwalniania elektronów, i nie ma znaczenia, czy milion, miliard czy bilion takich fotonów uderzy o metal – żaden elektron nie zostanie wyemitowany, ponieważ żaden nie natrafi na foton o wystarczającej energii. Tłumaczenie Einsteina uznawane jest, wraz z wytłumaczeniem przez Plancka obserwowanego widma światła emitowanego przez gorące obiekty, za narodziny teorii kwantowej.

Teraz mamy wszystko, co trzeba, aby zrozumieć, w jaki sposób świecące obiekty emitują światło oraz dlaczego chłodniejsze obiekty emitują bardziej czerwone światło. Temperatura jest miarą tego, jak szybko poruszają się cząstki, co z kolei jest miarą ilości dostępnej energii. Elektrycznie naładowane cząstki emitują światło, gdy są przyspieszane, zgodnie z równaniami Maxwella. Taki ciąg myślowy nie tłumaczy barwy światła emitowanego przez gorące obiekty. Do tego potrzebujemy teorii kwantowej. Światło można traktować jako strumień cząstek, których energia jest odwrotnie proporcjonalna do długości fali światła zgodnie z rozszerzoną przez Einsteina hipotezą Plancka. Richard Feynman stworzył przepiękny sposób obrazowania tego procesu, znany jako diagram Feynmana (zob. s. 280).

Elektrony mogą emitować i pochłaniać fotony. Foton odprowadza energię oraz pęd z elektronu i przenosi je do innego elektronu. W tym przypadku możemy sobie wyobrazić

jeden elektron znajdujący się w odrobinie świecącej lawy. Jeżeli ma dużo energii, najprawdopodobniej wyemituje foton o wysokiej energii, który może być wypromieniowany i pochłonięty przez inny elektron, mogący znajdować się w siatkówce twojego oka. W ten sposób widzisz świat. Skoro wysokoenergetyczne fotony charakteryzują się mniejszą długością fali, gorętsze obiekty będą miały wyższe prawdopodobieństwo wyemitowania fotonów o mniejszej długości fali, po prostu dlatego, że naładowane cząstki w nich mają średnio więcej energii. Gorące obiekty prawdopodobnie będą emitowały niebieskie fotony o mniejszej długości fali i dlatego gorące obiekty świecą na niebiesko, a chłodniejsze na czerwono.

Teraz możemy wszystko podsumować i odpowiedzieć na początkowe pytanie o to, dlaczego Słońce świeci. Słońce świeci, gdyż jego zewnętrzne warstwy wibrują ogrzane przez reakcje fuzji jądrowej zachodzące w jego jądrze. Temperatura na powierzchni wynosi około 5500 stopni Celsjusza, co mówi nam, ile energii jest dostępnej dla naładowanych cząstek na jego powierzchni do emitowania fotonów. Widmo słoneczne przedstawiono na ilustracji obok. Ponieważ powierzchnia ma temperaturę 5500 stopni Celsjusza, najwyższa moc wypromieniowywana jest w widzialnym zakresie widma. Obecne są wszystkie widzialne długości fali, dlatego też Słońce wydaje się „rozgrzane do białości” na niebie. Powierzchnia jest wystarczająco gorąca, aby promieniować aż do ultrafioletu, do długości fali około 250 nm, oraz mamy także długi ogon emisji w podczerwieni. Teoretyczną krzywą Plancka dla idealnego emitera (znanego jako ciało doskonale czarne) o temperaturze 5500 stopni Celsjusza również przedstawiono poniżej.



Widmo słoneczne. Na widmo nałożono obliczenie z równania Plancka przedstawiające widmo dla ciała doskonale czarnego o temperaturze 6000 stopni Celsjusza.

PYTANIE O NATURE
ŚWIATŁA ORAZ O TO,
JAK GORĄCE OBIEKTY
EMITUJĄ ŚWIATŁO,
JEST BARDZO GŁĘBOKIE.
WYMAGA DOBREGO
ZESTAWU NARZĘDZI
DOSTĘPNYCH DLA
FIZYKÓW Z POCZĄTKU
XX WIEKU.

Nieoczekiwane wtrącenie: problem neutrin słonecznych

Pytanie o naturę światła oraz o to, jak gorące obiekty emitują światło, jest bardzo głębokie. Wymaga dobrego zestawu narzędzi ukrytych w równaniach Maxwella oraz teorii kwantowej, dostępnych dla fizyków z początku XX wieku. Jeżeli zostaniemy zapytani o to, jak Słońce świeci, do odpowiedzi będziemy potrzebowali fizyki jądrowej z połowy XX wieku. Proces fuzji jądrowej, który opisaliśmy wcześniej, został szczegółowo przedstawiony w klasycznym artykule teoretycznym pt. *Energy Production in Stars* autorstwa Hansa Bethego w 1939 roku, ale eksperymentalne potwierdzenie tego, że w jądrze Słońca zachodzą reakcje jądrowe, nastąpiło, co uważam za zdumiewające, za mojego życia.

W 1964 roku John Bahcall oraz Raymond Davis Jr. zaproponowali eksperyment, w którym wykorzystali 100 000 galonów płynu do wykrywania neutrin powstających w procesie fuzji wodoru w hel we wnętrzu Słońca. W eseju napisanym w 2000 roku Bahcall wspominał, że jedyną motywacją ich eksperymentu było „zajrzenie do wnętrza gwiazdy i tym samym bezpośrednie zweryfikowanie hipotezy mówiącej o generowaniu energii jądrowej w gwiazdach”^[13]. Pierwsze wyniki opublikowano w 1968 roku i choć zarejestrowano neutrina, było ich mniej niż oczekiwano. Liczba zarejestrowanych neutrin była mniejsza o czynnik dwa lub trzy od tego, na co wskazywały najbardziej wyrafinowane modele teoretyczne Słońca. Owa rozbieżność między obserwowanym strumieniem neutrin na powierzchni Ziemi a przewidywaniami na podstawie fizyki jądrowej znana jest jako „problem neutrin słonecznych”. Na całym świecie wykonano serię eksperymentów, wielu w trakcie mojej kariery zawodowej. Pamiętam, jak prowadziłem wykład w ramach zaawansowanego kursu fizyki neutrin w latach dziewięćdziesiątych, podczas którego prezentowałem problem neutrin słonecznych jako jeden z nierozwiązanych problemów współczesnej fizyki. Podczas eksperymentów obserwowano neutrina ze Słońca, z kolizji promieni kosmicznych w górnych warstwach atmosfery Ziemi oraz z reaktorów jądrowych. Strumienie neutrin wytwarzano w akceleratorach cząstek i kierowano przez ziemię w kierunku detektorów pod górami. Eksperymentalne poszukiwania były wspierane sporymi wysiłkami teoretycznymi.

Rozwiązanie problemu neutrin słonecznych pozostaje nieznane. Był on całkowitym zaskoczeniem i doprowadził do powstania jednej z najaktywniejszych i najbardziej ekscytujących dziedzin badań w ramach współczesnej fizyki cząstek.

Wynik jest taki, że fizyka jądrowa oraz modele słoneczne są poprawne, ale neutrina zachowują się w osobiwy sposób w trakcie swojej podróży przez Słońce i 150 milionów kilometrów przestrzeni, zanim dotrą do Ziemi. Jeżeli ponownie spojrzysz na ilustrację [na stronie 49](#), zobaczysz, że istnieją trzy rodzaje neutrin: neutrina elektronowe, neutrina mionowe i neutrina taonowe. W naszym żargonie to tak zwane trzy „stany zapachowe”. Tylko neutrina elektronowe są wytwarzane w reakcjach jądrowych zachodzących na Słońcu, i to właśnie liczbę neutrin elektronowych fizycy teoretyczni obliczali, a doświadczalni próbowali

dostrzec w swoich detektorach na Ziemi.

Okazuje się jednak, że Natura troszeczkę „odstaje”. Neutrino nie podróżują jako neutrino elektronowe, mionowe czy taonowe, lecz jako ich mieszanina. Precyzyjny ułamek, jaki będą tworzyły poszczególne zapachy wykrywane na Ziemi, zależy od odległości, jaką pokonały od powstania, i ośrodka, który przemierzyły. Wczesne detektory na Ziemi były nastawione tylko na wykrywanie neutrino elektronowych i rejestrowały ich mniej, niż przewidywały modele fizyki jądrowej – nie dlatego, że mniej neutrino docierało na Ziemię ze Słońca, ale dlatego, że niektóre z nich docierały na Ziemię jako neutrino mionowe lub taonowe, które unikały detekcji. To osobliwe zachowanie znane jest jako oscylacje neutrino, a precyzyjne wyjaśnienie, jak i dlaczego zachodzi, stanowi wciąż nierozwiązany problem. W 2015 roku Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki otrzymali Takaaki Kajita oraz Arthur B. McDonald za eksperymentalny dowód na to, że neutrino mionowe powstałe w kolizjach promieni kosmicznych w atmosferze Ziemi oraz neutrino elektronowe powstałe w jądrze Słońca mogą zmieniać się w inne zapachy na drodze od miejsca ich emisji do miejsca ich detekcji.

Zainteresowanie osobliwym zachowaniem neutrino rozciąga się znacznie dalej poza fizykę jądrową Słońca oraz zachowanie promieni kosmicznych docierających na Ziemię. W kolejnym przykładzie nieoczekiwanych zwrotów akcji w nauce odkrycie oscylacji neutrino otworzyło wspaniałą puszkę Pandory – a puszki Pandory to istny przysmak dla fizyków. Aby oscylować w obserwowany sposób, przynajmniej dwa typy neutrino muszą posiadać bardzo małe, ale niezerowe masy; około jednej milionowej części masy najlżejszej cząstki materii według modelu standardowego innej niż neutrino: elektronu. Mamy teraz mocne dowody na to, że cząstka Higgsa jest odpowiedzialna za masy pozostałych cząstek modelu standardowego, jednak olbrzymia różnica masy między neutrino a wszystkim innym wskazuje, że za niewielką masę neutrino odpowiada inny mechanizm. Jeden taki mechanizm, znany jako mechanizm huśtawki, wymaga nowego superciężkiego neutrino o masie rzędu 10^{15} GeV; masa protonu to w przybliżeniu 1 GeV. Byłoby to okno do fizyki superwysokich energii bliskich energii, w której uważa się, że trzy niegrawitacyjne siły łączą się ze sobą, znanej jako teoria wielkiej unifikacji (GUT, ang. *Grand Unification Theory*). Przepraszam za jednostkę masy – gigaelektronowolty. Jest ona znacznie wygodniejsza dla fizyków cząstek elementarnych niż gramy. Masa protonu to około $1,673 \times 10^{-24}$ grama, co jest dość nieporęczną ilością. Gdy fizycy mogą korzystać z liczb bliższych 1, są zdecydowanie szczęśliwsi.

Neutrino mogą być także w jakiś sposób odpowiedzialne za obserwowaną niezgodność między ilością materii i antymaterii we Wszechświecie – inną z wielkich nierozwiązanych tajemnic fizyki wczesnego Wszechświata. Bez różnicy w zachowaniu materii i antymaterii, znanej jako łamanie CP, nie byłoby nas. Można tu zacytować komitet Nagrody Nobla z 2015 roku: „odkrycie oscylacji neutrino otworzyło nam drzwi do lepszego zrozumienia Wszechświata, w którym wszyscy żyjemy”.

John Bahcall kończy swój uroczy esej o tajemnicy neutrino tym wspaniałym akapitem:

Na początku XXI wieku dowiedzieliśmy się, że neutrino słoneczne wiele nam mówią nie tylko

o wnętrzu Słońca, ale także coś o naturze samych neutrin. Nikt nie wie, jakie niespodzianki przyniosą nam nowe eksperymenty z neutrinami słonecznymi, które aktualnie się wykonuje lub planuje. Bogactwo i humor, z jakim Natura opisała ich tajemnice w międzynarodowym języku, który rozumieją ciekawi przedstawiciele wszystkich narodów, są piękne, wspaniałe i upokarzające.

Bladoniebieska zielona planeta

Część 1: Oceany

Białe światło Słońca świeci na Ziemię i jest odbijane z powrotem w przestrzeń kosmiczną. Nasza planeta jest bezgranicznie barwnym światem z bliska; miasta, dżungle, łąki i sawanny zostały zabarwione życiem – pozostało niewiele monochromatycznych miejsc. Z dużej wysokości widzimy prostszy obraz. Zdjęcie zatytułowane *The White Marble* (zob. strona 16 na wklejce) przedstawia nietypowy biegunowy widok Ziemi wyśrodkowany na Europie Wschodniej i Rosji, rozciągający się od bieguna północnego po Zatokę Perską i Indie. Na zdjęciu dominują cztery barwy: błękit oceanów, zieleń północnych lądów strefy umiarkowanej, ochra głębokich kontynentalnych pustyni oraz biel chmur i śniegów na biegunie. Skąd się biorą te barwy i co mogą nam powiedzieć o fizycznych i biologicznych procesach zachodzących na powierzchni Ziemi?

W południowo-zachodniej Islandii jest dolina o nazwie Thingvellir. Pierwsi wikińscy osadnicy zbudowali parlament w tej dolinie ponad tysiąc lat temu, i choć parlament został przeniesiony w 1798 roku, miejsce to wciąż odgrywa ważną rolę w islandzkiej kulturze. Symbolizuje ono zjednoczenie ludzi; miejsce handlu i spotkań ze starymi przyjaciółmi; miejsce, gdzie wymieniane są informacje i rozwiązywane są spory; miejsce pracy wspólnej – konieczny, jeśli nie wystarczający, wymóg przetrwania na odizolowanej skale. Dolina ta jest gdzieś wąska i stroma, dzięki czemu osoba odwiedzająca ten rejon ma możliwość rozstawienia rąk i niemal dotknięcia dwóch największych kontynentów na Ziemi. Na wschodzie leży Eurazja, a na zachodzie Ameryka Północna. Thingvellir to jedyne miejsce na lądzie, gdzie widoczny jest Grzbiet Śródatlantycki – przelotny rzut oka na geologiczny szew przebiegający przez całą długość Oceanu Atlantyckiego. Obecnie grzbiet rozszerza się w tempie dwóch centymetrów na rok w rejonie północnego Atlantyku, powiększając odległość obu kontynentów od siebie. Jeżeli kiedykolwiek zastanawiałeś się, dlaczego Ameryka Południowa wygląda, jakby mogła dopasować się do Afryki, tak właśnie jest. Te dwa kontynenty stanowiły całość 130 000 lat temu, ale aktywność wulkaniczna wzdłuż Grzbietu Śródatlantyckiego szybko je rozdzieliła i w nowo powstałym dnie oceanicznym wytworzył się uskok przebiegający dokładnie przez Thingvellir. Islandzki parlament zwykł obradować na Logberg, czyli Skale Praw, będącej skalistą wychodnią, która zniknęła już dawno temu wraz z przemierzającym się krajobrazem. W tej części świata geologia wyprzedza politykę.

W tej wspaniałej dolinie jest miejsce zalane krystalicznie czystą wodą lodowcową z centralnego lodowca Langjökull, przefiltrowaną w drodze do wybrzeża z interioru przez setki kilometrów skał wulkanicznych. Woda, przezroczysta i zimna, tworzy jedno z najsłynniejszych miejsc do nurkowania na świecie.

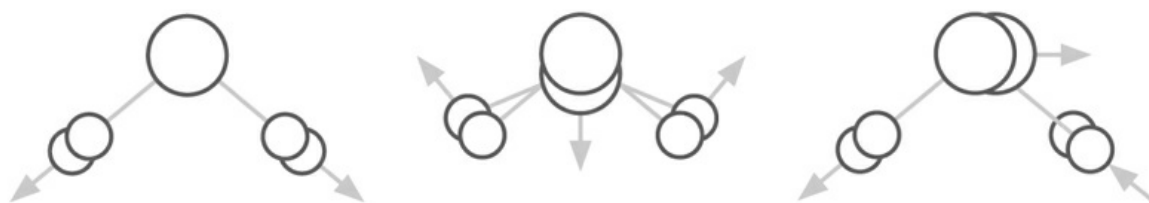
Ta książka opiera się na programie telewizyjnym. Telewizja to medium wizualne, a bardzo

często przedstawienie jakiejś zasady fizycznej jest łatwe na ekranie, ale nie na papierze. Niemniej jednak w naszym filmie o barwach świata zespół produkcyjny wymyślił wspaniały sposób zademonstrowania, dlaczego oceany są niebieskie, który działa w obu mediach. W tej scenie nurkowałem w szczelinie w Silfra (pod tą nazwą znane jest to miejsce) ubrany w czerwony kombinezon. Wyobrażam sobie, że jest to doświadczenie najbardziej zbliżone do spaceru kosmicznego bez konieczności odwiedzania Międzynarodowej Stacji Kosmicznej, ponieważ praktycznie nie widać substancji wody; gdy osady opadną, można odnieść wrażenie, że unosisz się bez pomocy w niemym uskoju. Z wnętrza maski widziałem błękit, zamknięty świat, ale wskazówką co do pochodzenia niebieskiego światła była czerwień kombinezonu. Na powierzchni był on bardzo czerwony. Gdy schodziliśmy na 15 metrów pod powierzchnię, oświetlenie przez przejrzystą wodę wciąż było jasne, lecz kombinezon stał się czarny.

Kolor obiektu określony jest przez to, jak oddziałuje z nim światło. Na przykład marchewka jest pomarańczowa, bo cząsteczki β -karotenu wybiórczo pochłaniają niebieskie fotony. Kolor pomarańczowy to pozostałość z zakresu widzialnego po odjęciu z niego światła niebieskiego, a skoro widzimy marchewkę dzięki odbitemu od niej światłu, widzimy kolor pomarańczowy. Podobnie barwniki w moim kombinezonie pochłaniają wszystkie kolory widma poza czerwonym. Kolor kombinezonu stopniowo ciemniał wraz z głębokością w szczelinie, ponieważ cząsteczki wody bardzo silnie pochłaniają kolor czerwony. Gdy osiągnąłem głębokość około 15 metrów, docierało do mnie bardzo niewiele czerwonych fotonów ze światła słonecznego, które wpadało do wody na powierzchni, i kombinezon nie miał już czego odbijać do soczewki kamery. Kombinezon nadal pochłaniał wszystkie inne barwy, które przenikały przez wodę stosunkowo niezakłócone, dlatego też stał się czarny nawet pomimo wciąż wysokiego poziomu oświetlenia.

NA ZDJĘCIU DOMINUJĄ
CZTERY BARWY: BŁĘKIT
OCEANÓW, ZIELEŃ
PÓŁNOCNYCH LĄDÓW
STREFY UMIARKOWANEJ,
OCHRA GŁĘBOKICH
KONTYNENTALNYCH
PUSTYNI ORAZ BIEL
CHMUR I ŚNIEGÓW
NA BIEGUNIE.

Sposób, w jaki woda pochłania światło widzialne, jest całkiem wyjątkowy. W rozdziale pierwszym widzieliśmy, że cząsteczki wody są zbudowane z dwóch atomów wodoru związanych z jednym atomem tlenu. Struktura utrzymywana jest przez rozkład elektronów między jądrami atomowymi. Elektrony mogą ustawiać się tylko w bardzo określony sposób wewnątrz cząsteczek, ustalony zgodnie z prawami teorii kwantowej. Może dochodzić do zmian ustawienia bez rozbijania cząsteczki, ale każde ustawienie będzie zazwyczaj charakteryzowało się innym poziomem energii. Jeżeli ustawienie elektronów wewnątrz cząsteczki ma się zmienić, musi dojść do pochłonięcia fotonu o dokładnie odpowiedniej energii. Skoro energia fotonu jest bezpośrednio związana z jego barwą, określona cząsteczka będzie pochłaniała tylko określone kolory promieniowania, zależne od różnego możliwego ułożenia elektronów w jej wnętrzu.



Trzy podstawowe tryby wibracji cząsteczki wody.

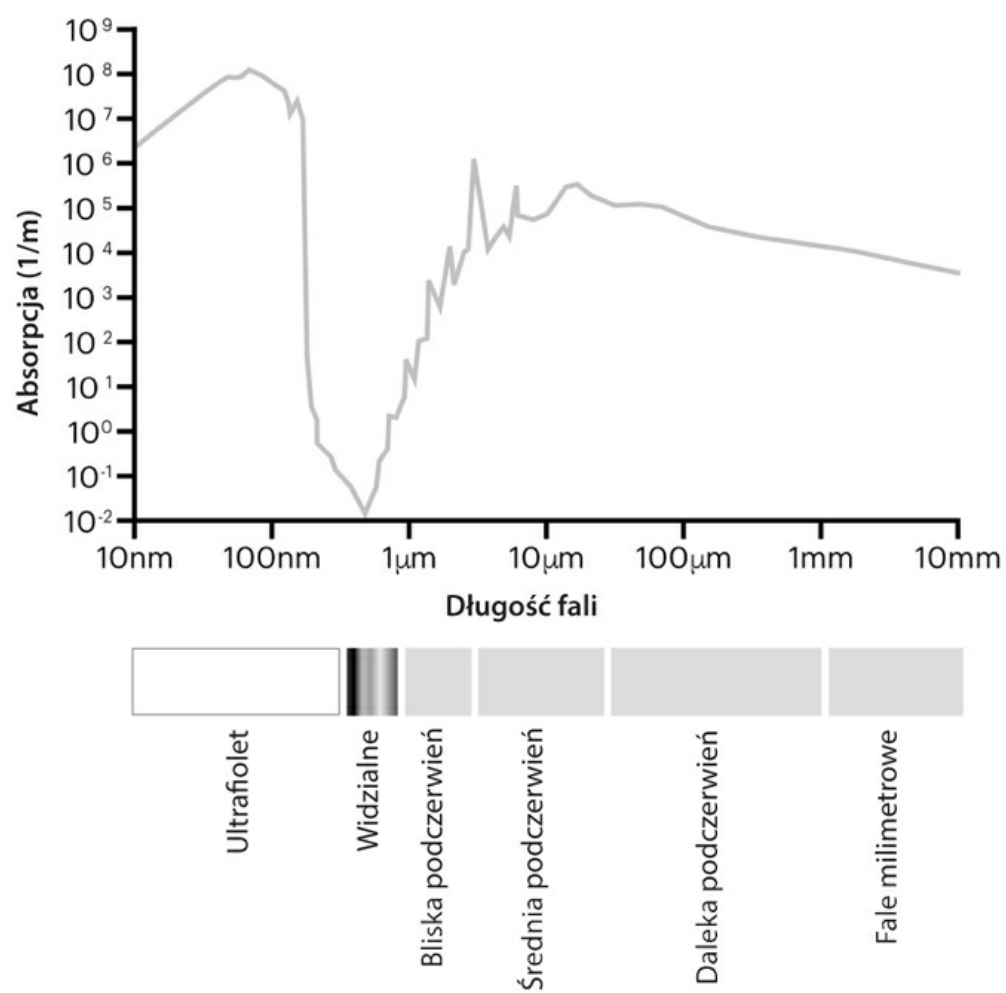
To proces, w którym zasadniczo wszystko, co widzimy, uzyskuje swój widoczny kolor, ale woda jest inna. Ułożenie elektronów wewnątrz cząsteczki wody zmienia się w wyniku pochłaniania promieniowania elektromagnetycznego, lecz wymagane do tego poziomy energii są za wysokie dla fotonów w widzialnej części widma. Zamiast tego jej wibracje między jądrami wodoru a tlenu wewnątrz cząsteczek wody napędzane są przez pochłanianie mniej energetycznych fotonów podczerwonych i widzialnych (czerwonych).

Istnieją trzy podstawowe mody wibracyjne cząsteczki wody, przedstawione na wcześniejszej ilustracji, jednak umożliwiają one olbrzymią ilość kombinacji, co z kolei prowadzi do ekstremalnie złożonego widma absorpcyjnego, które zaprezentowano na wykresie [na stronie 296](#). Wiele z tych wibracji jest wzbudzanych przez fotony podczerwone o dużej długości fali – to właśnie ten mechanizm wykorzystywany jest w kuchenkach mikrofalowych. Istnieją także wibracje, które są wzbudzane przez światło widzialne koloru czerwonego, przez co usuwają je z widma. Woda jest praktycznie nieprzejrzysta dla promieniowania ultrafioletowego oraz podczerwonego, czyli tam, gdzie wzbudzone są wibracje wewnątrzjądrowe. Jednak istnieje przedział, głównie w błękicie i zieleni, gdzie woda nie pochłania światła zbyt silnie. To dlatego woda wygląda na „niemal” przezroczystą. Stromy wzrost absorpcji w kierunku czerwieni w zakresie widzialnym odpowiada za to, że mój czerwony kombinezon stracił kolor. Na głębokości 15 metrów wibracje wewnątrzjądrowe cząsteczek wody pochłonęły większość czerwonych fotonów ze Słońca, które dotarły do powierzchni wody, i pozostało ich niewiele do odbicia od powierzchni kombinezonu.

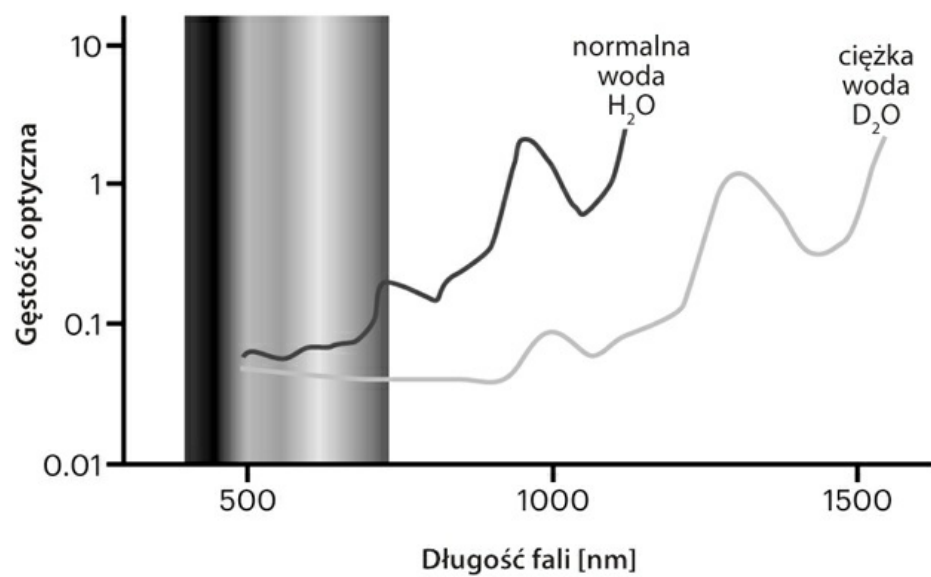
W głębszych wodach wszystko, co pozostało, to światło niebieskie, które ulega rozpraszaniu, a nie pochłanianiu.

To właśnie ten proces nadaje dużym zbiornikom wody w stanie ciekłym ich definiującą naszą planetę błękit. Jesteśmy „bladoniebieską kropką” dzięki delikatnemu oddziaływaniu między promieniowaniem elektromagnetycznym a rotującymi, wirującymi i wibrującymi cząsteczkami zbudowanymi z pierwszego i trzeciego najpowszechniejszego pierwiastka we Wszechświecie: wodoru i tlenu.

Tak swoją drogą warto tu zaznaczyć czułość widma absorpcyjnego cząsteczek na niewielkie zmiany ich składników. Ciężka woda chemicznie jest identyczna jak H_2O , ale zamiast wodoru jest w niej deuter. Jej wzór chemiczny to D_2O . Deuter to izotop wodoru, a jego jądro zawiera pojedynczy neutron obok protonu. Z perspektywy chemicznej nie ma to żadnego wpływu, bowiem w tym zakresie liczy się tylko liczba elektronów otaczających jądro, a tym samym liczba protonów w jego wnętrzu. Fizyczna obecność neutronu ma bardzo zauważalny wpływ na widmo absorpcyjne: mody wibracyjne przesuwają się w kierunku wyższych energii, a tym samym są one wzbudzane przez fotony o mniejszej długości fali poza zakresem widzialnym. To wszystko jest zgodne z intuicją; do wprowadzenia w wibracje masywniejszego jądra potrzeba więcej energii. W wyniku tego, skoro praktycznie żaden fragment widma widzialnego nie ulega usunięciu, ciężka woda jest bezbarwna nawet w dużych ilościach. Gdyby Ziemia była pokryta oceanami D_2O , nie byłaby niebieską planetą.



Widmo absorpcyjne wody w stanie ciekłym.



Porównanie absorpcji H₂O oraz D₂O.

DALEKO, DALEKO, NA NIEOBJĘTYCH
MAPAMI PERYFERIACH NIEMODNEGO
KRAŃCA ZACHODNIEGO RAMIENIA
SPIRALNEGO GALAKTYKI, ZNAJDUJE
SIĘ MAŁE, NIEPOZORNE, ŻÓŁTE SŁOŃCE.
W ODLEGŁOŚCI JAKICHŚ 92 MILIONÓW
MIL OKRĄŻA JE KOMPLETNIE NIC
NIEZNACZĄCA, MALEŃKA, ZIELONO-
-BŁĘKITNA PLANETA, NA KTÓREJ
POCHODZĄCE OD MAŁPY FORMY
ŻYCIA SĄ TAK NIEWIARYGODNIE
PRYMITYWNE, ŻE WCIAŻ JESZCZE
UWAŻAJĄ ZEGARKI ELEKTRONICZNE
ZA CAŁKIEM SPRYTNY POMYSŁ.

DOUGLAS ADAMS, *AUTOSTOPEM PRZEZ GALAKTYKĘ*

Bladoniebieska zielona planeta

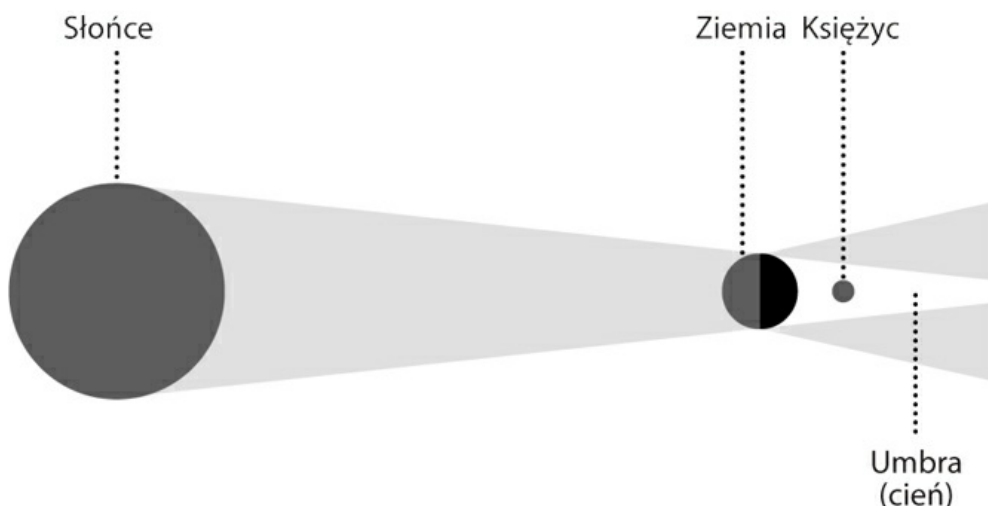
Część 2: Niebo

Niebieskie niebo Ziemi nie jest wynikiem wybiórczego pochłaniania światła słonecznego, ale wybiórczego rozpraszania. I ponownie demonstracja wymyślona przez zespół producentów telewizyjnych okazała się niezwykle pomocna. W chłodny poniedziałkowy poranek 28 września 2015 roku z Wielkiej Brytanii można było obserwować całkowite zaćmienie Księżyca. Mniej więcej co dwa i pół roku Słońce, Księżyc i Ziemia ustawiają się w taki sposób, że Ziemia, chwilowo znajdując się między naszą gwiazdą i satelitą, rzuca cień na powierzchnię Księżyca. To piękny i stosunkowo powszechny widok, dostarczający silnego uczucia, którego miałem okazję doświadczyć, obserwując całkowite zaćmienie Słońca w Waranasi w Indiach w 2009 roku. Obydwa te zjawiska stanowią pokaz poruszających się cieni, rzucanych w Układzie Słonecznym przez orbitujące, skaliste kule, i gdy już to sobie uświadomisz, zaćmienie będzie wywierało na ciebie jeszcze większy wpływ. Podczas zaćmienia Księżyca cień naszego globu jest widoczny, i jest samotny i ciemny na tle tarczy Księżyca. W Waranasi, na brzegu Gangesu, tego tropikalnego lipcowego poranka, ciężkiego od słodkiego zapachu i potu, miliony głosów zamilkły, gdy cień Księżyca zaciemniał magiczne, stare ghaty. W Anglii, tysiące mil dalej, siedem długich lat później i przy ogromnych różnicach duchowych, gdy przygotowywałem się do odtworzenia swoich uczuć na spokojnych, angielskich wrzosowiskach, dwie „wiedźmy” postanowiły uczcić tę okazję, odśpiewując główny utwór z disnejowskiego filmu *Kraina lodu*.

Cień Ziemi całkiem zasłania Księżyc w trakcie całkowitego zaćmienia Księżyca, ale Księżyc nie staje się kompletnie ciemny. Zamiast tego skrywa się za ciemną, głęboką czerwienią. Czerwone oświetlenie powierzchni Księżyca jest wynikiem promieniowania słonecznego skierowanego na powierzchnię Księżyca przez atmosferę Ziemi. Księżyc zazwyczaj obserwujemy bezpośrednio oświetlony przez Słońce; odbija 12 procent widzialnego widma – nieco mniej niż ciemne bazaltowe morza powstałe wskutek dawnych erupcji wulkanicznych i nieco więcej niż jasne anortozytowe wyżyny. Poproszony o opisanie blasku Księżyca jednym słowem, prawdopodobnie powiedziałbyś, że jest biały; podobny do światła słonecznego. Jest tak, ponieważ skały księżycowe odbijają promieniowanie całkiem demokratycznie na wszystkich długościach fali. Z pewnością gołym okiem nie dostrzeżemy tam żadnych czerwieni, zieleni czy błękitów. Podczas zaćmienia oświetlenie jest zupełnie inne. Atmosfera Ziemi działa jak filtr, usuwając większość słonecznego widma, poza światłem czerwonym, które nadal może oświetlać morza i wyżyny. To właśnie dlatego Księżyc staje się czerwony podczas zaćmienia Księżyca.

Ten sam proces fizyczny sprawia, że w trakcie zachodów Słońca możemy obserwować czerwone niebo. Gdy Słońce opada ku horyzontowi, a właściwie powinniśmy powiedzieć: kiedy Ziemia odwraca się od Słońca, promienie słoneczne muszą przebijać się przez coraz

grubszą warstwę atmosfery, zanim dotrą do naszych oczu. Obraz Słońca czerwienieje i gdy Słońce dociera do horyzontu, samo niebo zmienia się z błękitnego w czerwone. Aby zrozumieć, czemu tak się dzieje, musimy wiedzieć, jak fotony o różnych długościach fali, a tym samym o różnych energiach, oddziałują z cząsteczkami, pyłem i parą wodną w ziemskiej atmosferze.



Czerwone oświetlenie powierzchni Księżyca pojawia się, gdy światło słoneczne kierowane jest na Księżyc przez atmosferę Ziemi.

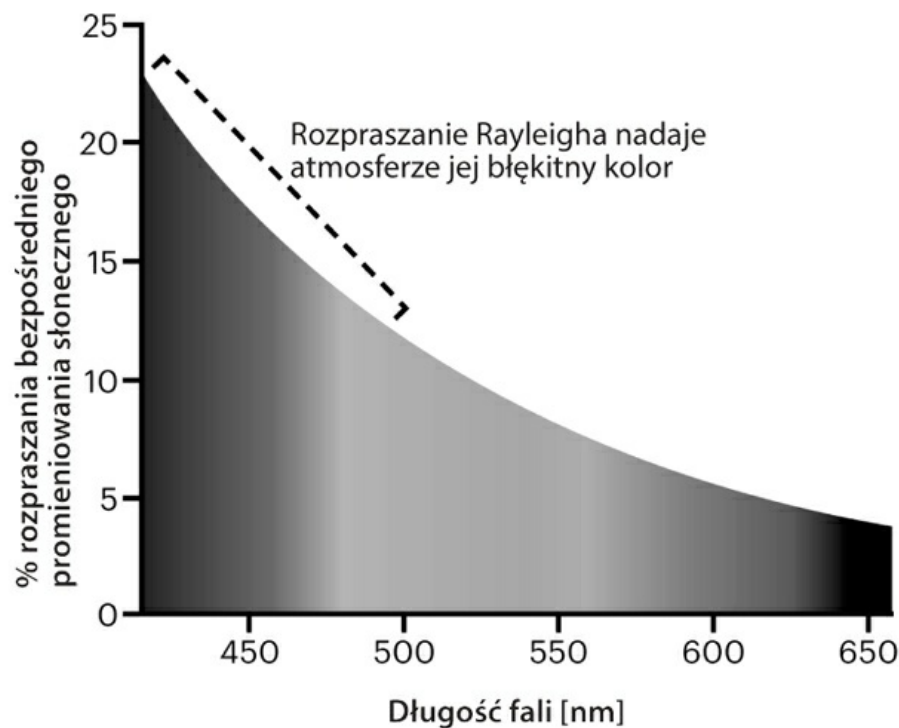
Zmieniające się kolory nieba na Ziemi i głęboka czerwień powierzchni Księżyca podczas zaćmienia są spowodowane przez proces znany jako rozpraszanie Rayleigha, nazwany tak na cześć brytyjskiego fizyka lorda Rayleigha (John William Strutt). Proces można opisać jako elastyczne rozpraszanie fotonów na cząsteczkach tlenu i azotu, z których składa się nasza atmosfera. Wyobraź sobie bile bilardowe odbijające się od siebie – to dobre odzwierciedlenie, jeżeli długość fali nadlatującego światła jest znacząco większa od rozmiarów cząsteczki, a tak właśnie jest w przypadku światła widzialnego przelatującego przez powietrze. Długości fali fotonów widzialnych mieszczą się w zakresie od 400 do 650 nm, a cząsteczki tlenu i azotu są ponad tysiąc razy mniejsze.

Mówiąc dzisiejszym językiem, wzór Rayleigha wskazuje, iż prawdopodobieństwo, że foton ulegnie rozproszeniu, jest odwrotnie proporcjonalne do czwartej potęgi jego długości fali. Oznacza to, że niebieskie fotony (450 nm) mają niemal trzykrotnie wyższe prawdopodobieństwo rozproszenia na cząsteczkach gazu, pokonując atmosferę, niż fotony czerwone o większej długości fali (650 nm). Ilustracja na następnej stronie przedstawia część promieniowania słonecznego ulegającą rozproszeniu na drodze przez atmosferę, gdy Słońce znajduje się bezpośrednio nad głowami. Średnio jeden na pięć fotonów niebieskich ulega rozproszeniu, podczas gdy tylko jeden na 20 fotonów czerwonych zostanie zbity z drogi łączącej prostą linią Słońce z twoim okiem. To właśnie dlatego niebo wydaje się niebieskie, a Słońce ma żółte zabarwienie. Gdy Słońce opada ku horyzontowi i fotony muszą przebyć

dłuższą drogę przez powietrze, szanse na rozpraszanie fotonów rosną – szczególnie dużo fotonów niebieskich ulega rozproszeniu. To właśnie dlatego niebo staje się coraz bardziej pomarańczowe, a nawet czerwone wieczorem, pozostawiając za sobą rosnący dysk czerwieni, gdy Słońce już schowało się za horyzontem.

Dzięki astronautom z misji Apollo możemy zobaczyć, jak Słońce wygląda na niebie z minimalnym lub zerowym wpływem atmosfery. Fotografie wykonane 19 listopada 1969 roku przez zespół astronautów na pokładzie misji Apollo 12 pokazują, że Słońce jest jasne i białe nad „Morzem Burz”, ponieważ żaden z kolorów tęczy nie uległ rozproszeniu, a niebo jest całkowicie czarne.

Z orbity Ziemi nasza atmosfera rzadko jest widoczna, aczkolwiek zdjęcia krawędzi Ziemi wykonane z pokładu Międzynarodowej Stacji Kosmicznej dostarczają fantastycznych widoków cienkiej, niebieskiej linii oddzielającej nas od próżni przestrzeni kosmicznej (zob. strona 16 na wklejce). Dominującą cechą atmosfery widoczną z przestrzeni kosmicznej są jasne białe chmury. Chmury są białe, gdyż składają się z kropli wody, które zazwyczaj mają rozmiary porównywalne z długością fali promieniowania widzialnego. Obliczenia Rayleigha nie mają tutaj zastosowania, a dominujący tu proces rozpraszania to rozpraszanie Mie, nazwane tak na cześć niemieckiego fizyka Gustava Mie. Większe cząstki, takie jak krople wody, rozpraszają światło z prawdopodobieństwem niemal niezależnym od długości fali – i to właśnie owo demokratyczne rozpraszanie jest powodem tego, że chmury na Ziemi są jasnobiałe.



Procent promieniowania słonecznego rozproszonego przez ziemską atmosferę, gdy Słońce znajduje się bezpośrednio nad głowami, w funkcji długości fali.

Bładoniebieska zielona planeta

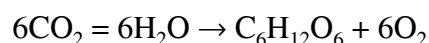
Część 3: Ląd

Pod białymi chmurami, otoczony niebieskimi oceanami, jest ląd. Obszary polarne są białe, pasy równikowe są czerwone niczym pyłowy Mars, ale północna strefa umiarkowana na zdjęciu *The White Marble* jest zielona. Pisząc to i spoglądając na to zdjęcie (zob. strona 16 na wklejce), jestem zdumiony tym, jak zielona jest Europa i północna Azja. Nie widać tu śladu betonu czy autostrad ani miast. Powierzchnie Wielkiej Brytanii, Francji, Niemiec, nizin Norwegii i Finlandii i dalej na wschód równin Rosji, przez pół świata aż po wybrzeże północnego Pacyfiku, są jednorodnie zielone. Pierścień zieleni kończy Ameryka Północna, ledwo widoczna przez chmury przy górnej krawędzi. To miejsca, gdzie możemy być pewni obfitości pożywienia, schronienia i deszczu, ponieważ zieleni rozpoznajemy jako kolor życia. Ale dlaczego rośliny są zielone?

Jak w przypadku wielu prostych pytań, które zadaliśmy w tej książce, odpowiedzi jest wiele, o rosnącej głębi, a na końcu tego ciągu leży odpowiedź najwspanialsza dla każdego naukowca: jeszcze do końca nie wiemy. Z tym ekscytującym i kuszącym przyznaniem się do ignorancji, najwspanialszym i pokornym aktem, zacznijmy od tego, co wiemy.

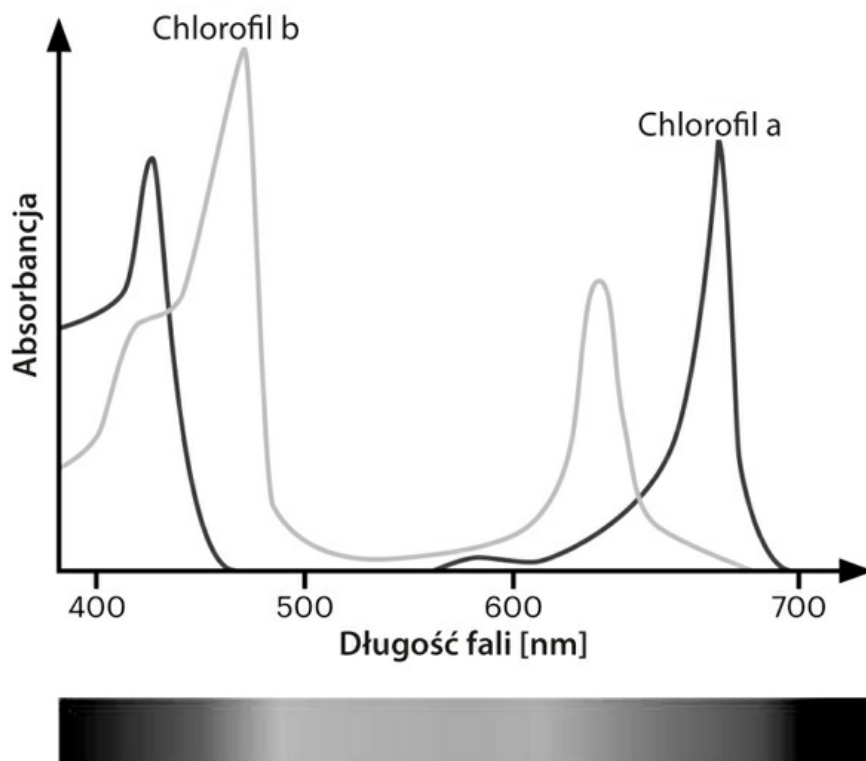
Bardzo prosta odpowiedź mówi nam, że zieleni to kolor, który życie wyrzuca. Tak jak oceany są niebieskie, ponieważ cząsteczki wody nie pochłaniają niebieskich fotonów, tak rośliny są zielone, ponieważ chlorofil, pigment zawarty we wszystkich roślinach zielonych, pochłania fotony niebieskie i czerwone, a fotony zielone odbija w kierunku naszych oczu. Diagram po prawej przedstawia widma absorpcyjne dla dwóch najpowszechniejszych form chlorofilu oznaczonych tu jako *a* i *b*. Pochłaniają one długości fali na obu końcach widma widzialnego, ale pozostawiają jego zielony środek. Aby wykonać kolejny krok na drodze do zrozumienia, dlaczego tak jest, musimy dowiedzieć się trochę o złożonej biologicznej magii fotosyntezy.

Biochemik Albert Szent-Györgyi zauważył pewnego razu: „Życie nie jest niczym innym niż elektronem poszukującym miejsca spoczynku”. Fotosynteza to proces, w którym rośliny wykorzystują energię Słońca do przenoszenia elektronów, a dzisiaj zajmuje ona miejsce w sercu całego łańcucha pokarmowego. Zapewne pamiętasz to podstawowe równanie ze szkoły:



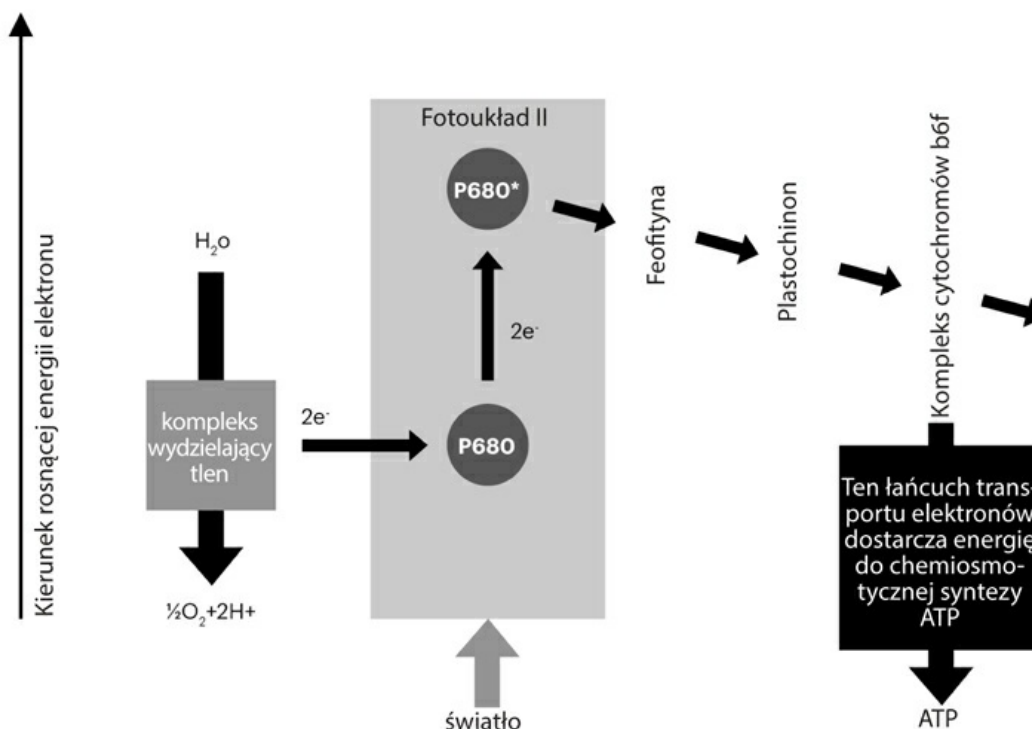
Dokładnie mówiąc, ten proces powinniśmy nazywać fotosyntezą oksygeniczną, bo źródłem elektronów w tym wypadku jest woda, która ulega rozkładowi, uwalniając tlen do atmosfery jako produkt uboczny. Odrywanie elektronów od wody jest ekstremalnie trudne. Gdzieś w zakamarkach twojej pamięci, zapewne pośród wiatraków, znajduje się wspomnienie

szkolnego eksperymentu naukowego: elektrolizy wody. Wodę można rozszczepić na wodór i tlen, przepuszczając przez nią prąd elektryczny, aczkolwiek nie jest to łatwe, ponieważ woda jest bardzo stabilną i ciasno związaną cząsteczką. Gdyby istniał wydajny energetycznie sposób rozszczepiania wody za pomocą obecnej technologii, światowa ekonomia opierałaby się na wodorze, a nie na ropie.



Widma absorpcyjne dwóch blisko spokrewnionych pigmentów fotosyntetyzujących, chlorofilu a oraz b.

Fotosynteza istnieje od bardzo dawna, a jej początki datuje się na co najmniej 3,5 miliarda lat dla jednych z najstarszych organizmów, tak zwanych cyjanobakterii. Te wczesne formy życia nie miały zaawansowanej maszyneryi biochemicznej niezbędnej do rozbijania cząsteczki wody i pobierały swoje elektrony z mniej stabilnych cząsteczek, takich jak siarkowodór, powszechnie dostępny w oceanach wczesnej Ziemi. Tak jak dzisiaj rośliny, przyczepiały te elektrony do dwutlenku węgla, tworząc cukry – budulec żywych organizmów. Posiadały także zdolność do wykorzystania elektronów uwalnianych przez światło słoneczne do wytwarzania ATP, uniwersalnych akumulatorów życia. W pewnym momencie, wcześniej niż 2,5 miliarda lat temu, ewolucyjna innowacja znana jako kompleks wydzielający tlen pozwoliła organizmom zamienić siarkowodór na bardziej dostępną wodę, a całość połączyła się w schemat Z, który jest teraz obecny we wszystkich zielonych roślinach.



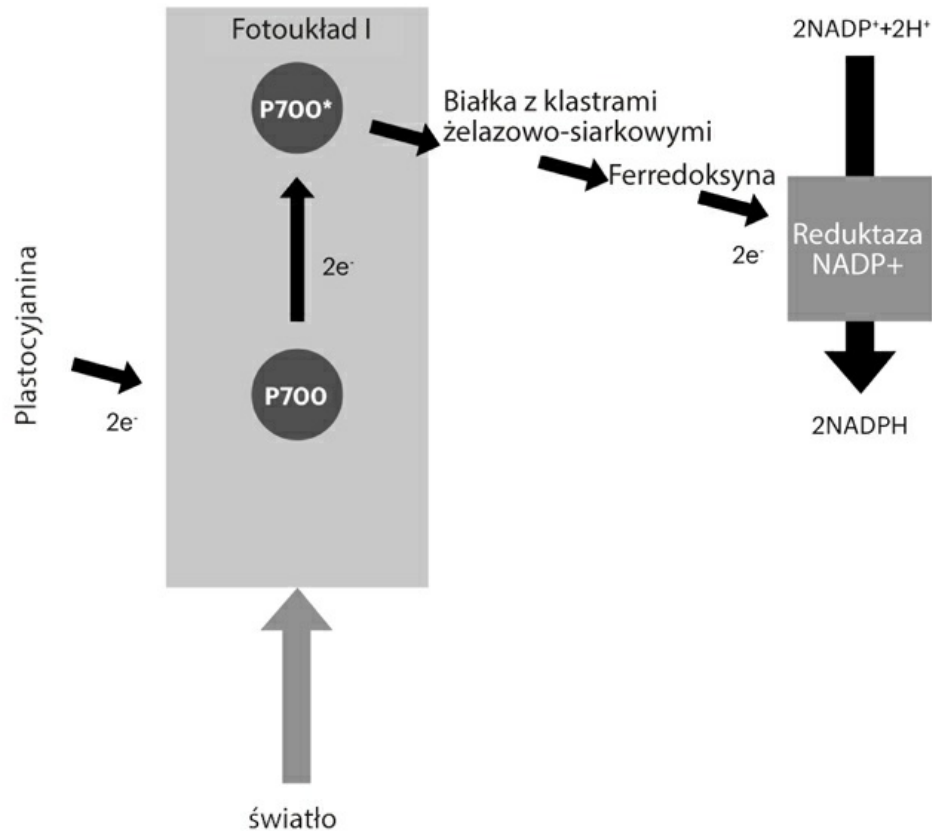
Schemat Z

Schemat Z to jeden z cudów biologii ewolucyjnej. Sam fragment wytwarzający cukier, znany jako fotoukład I, składa się z 46 630 atomów. Fragment ATP to fotoukład II. Kompleks wydzielający tlen ma tak skomplikowaną budowę, że w pełni opisano go dopiero w 2006 roku.

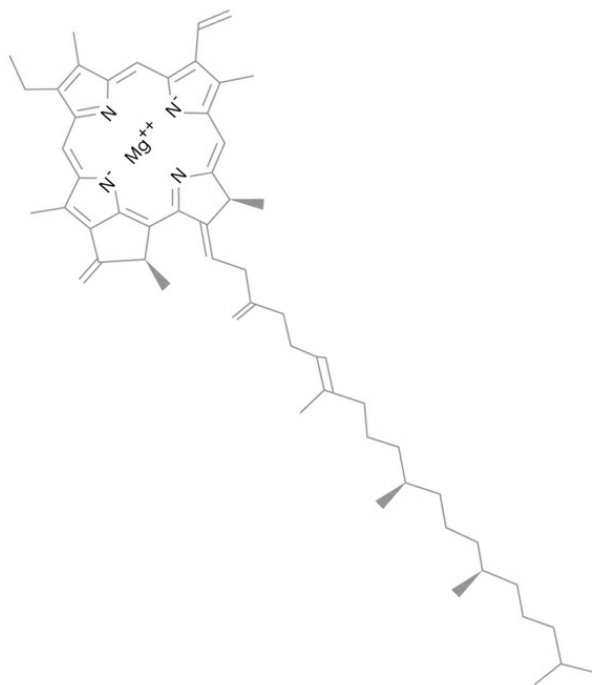
Źródłem zasilania dla tej całej maszyny jest obfity strumień fotonów ze Słońca, a chlorofil jest głównym pochłaniaczem fotonów. Istnieje kilka rodzajów chlorofilu, które spełniają różne funkcje zależnie od ich budowy cząsteczkowej i otaczających je protein. W reakcyjnym sercu fotoukładu II chlorofil pochłania światło najsilniej na długości fali 680 nm, czyli w czerwonym zakresie widma. Pochłonięta energia wywołuje rekonfigurację rozkładu elektronów w cząsteczce, prowadząc do tego, że jeden z nich staje się dostępny dla pierwszego łańcucha transportu elektronów w schemacie Z, który porywa go do wytwarzania ATP. Proces ten sprawia, że mamy do czynienia z chlorofilem o ogromnym apetycie na odzyskanie swojego utraconego elektronu, który zabiera z wody za pomocą kompleksu wydzielającego tlen. Struktura zawierająca cząsteczki chlorofilu to tak zwane centrum reakcyjne P680, i gdy pochłonie ono foton, to jest najsilniejszym znanym biologicznym agentem oksydacyjnym. To właśnie dlatego ma zdolność rozbijania cząsteczek wody, dostarczając przy tym tlen, którym oddychamy, do atmosfery ziemskiej.

Po przejściu przez fotoukład II elektron jest gotowy do wejścia w fotoukład I – biznesowy koniec, zawierający kolejny zestaw cząsteczek chlorofilu wewnątrz innej struktury zwanej

centrum reakcyjnym P700. Pochłania ono światło najsilniej na nieco wyższej długości fali 700 nm, w głębszej czerwieni. W ten sposób chlorofil pochłania światło tak jak poprzednio, ale z innym skutkiem. Teraz staje się najsilniejszym znanym biologicznym agentem redukcyjnym, co oznacza, że jego apetyt skupia się na pozbywaniu się swoich wzbudzonych elektronów na rzecz czegokolwiek – w tym wypadku, poprzez kilka innych elementów maszynarii cząsteczkowej, na dwutlenek węgla. Wynik, po dodaniu kilku protonów, to zamiana CO_2 w cukry. Brakujący elektron uzupełniany jest przez wolny elektron uwolniony przez fotoukład II.



To wszystko może się wydawać niepotrzebnie skomplikowane, ale prawdopodobnie takie nie jest. Gdyby inżynierowi chemii polecić oderwanie elektronów z wody i przyczepianie ich do dwutlenku węgla, prawdopodobnie zaśmiałyby ci się w twarz. Woda nie chce oddawać swoich elektronów, a dwutlenek węgla nie chce ich otrzymywać. Odrywanie elektronów od stabilnych cząstek to coś zupełnie innego niż przyczepianie elektronów do stabilnych cząstek, i właśnie dlatego istnieją dwa osobne centra reakcyjne, które razem umożliwiają barwnikom chlorofilu wykonywanie tak różnych zadań.



Budowa cząsteczkowa chlorofilu A, którego wzór chemiczny to $C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$.

ŁZA ZIELENI

RON McNAIR, FIZYK I ASTRONAUTA NASA O ZIEMI
WIDZIANEJ Z POKŁADU PROMU KOSMICZNEGO,
„NEWSWEEK”, 10 LUTEGO 1986

Schemat Z to wspaniała rzecz, bodaj dlatego każdy organizm na tej planecie, który przeprowadza fotosyntezę oksygeniczną, robi to dokładnie w ten sam sposób. Jest niemal pewne, że proces ten wyewoluował raz, prawdopodobnie w cyjanobakterii gdzieś w pierwotnym oceanie. Te sprytne cyjanobakterie w jakiś sposób przedostały się do komórek innych organizmów i stały się chloroplastami – siedzibą fotosyntezy we wszystkich żyjących obecnie na Ziemi zielonych roślinach. Warto tutaj chwilę się zastanowić i uświadomić sobie, że bez schematu Z w naszej atmosferze byłoby bardzo mało tlenu, a złożone życie na Ziemi po prostu by nie istniało.

Jeżeli dwa centra reakcyjne pochłaniają światło najsilniej w zakresie czerwonym, to dlaczego wszystkie rośliny są zielone? Odpowiedź jest taka, że centra reakcyjne P700 i P680 nie pochłaniają światła słonecznego bezpośrednio. Za to odpowiada złożona sieć różnych pigmentów chlorofilu, a te inne pigmenty, zwane pigmentami dodatkowymi, przekazują światło do centrów reakcyjnych w kaskadzie, która stopniowo zwiększa długość fali w kierunku zakresu czerwieni, umożliwiając rozpoczęcie całego procesu. Pigmenty dodatkowe uwidaczniają się jesienią, kiedy chlorofil ulega rozpadowi jako czerwienie, pomarańcze i złoto jesiennych liści. Dwa najpowszechniejsze pigmenty chlorofilu poza centrami reakcyjnymi pochłaniają światło zarówno w czerwonej, jak i niebieskiej części widma. Wraz z pigmentami dodatkowymi pobierają ponad 90 procent światła słonecznego, pozostawiając tylko bardzo mały wycinek zieleni, który ulega odbiciu.

Fotosynteza jest skomplikowana i wspaniała. Wykorzystuje niemal całe światło padające na powierzchnię Ziemi do zasilania roślin leżących u podstaw łańcucha pokarmowego naszej planety oraz przy okazji utlenia atmosferę. Dlaczego rośliny nie wykorzystują 100 procent widzialnego widma i nie mają czarnych liści zamiast odbijać 10 procent światła? Tego nie wie nikt. Odpowiedź ta to ważna lekcja biologii ewolucyjnej. Ewolucja przez dobór naturalny nie znajduje optymalnych rozwiązań inżynierskich. Gdyby to inżynier projektował rośliny, miałyby one czarne liście. Zamiast tego organizmy przypominają trochę fuszerkę, wynik czterech miliardów lat mutacji, presji selekcyjnych oraz połączeń genetycznych i fizycznych. Zieleni, która dominuje nad umiarkowanymi regionami planety Ziemia, może być zamrożonym ewolucyjnym przypadkiem.

Bładokolorowe kropki

P o omówieniu pochodzenia kolorów definiujących Ziemię możemy teraz powrócić do początku i skierować swoje umysły na gwiazdy. Czy cokolwiek z tego, co wiemy o odbijaniu i pochłanianiu światła słonecznego na Ziemi, możemy wykorzystać do badania innych światów i do poszukiwania sygnatur życia poza Układem Słonecznym? Odpowiedź jest twierdząca, a astronomowie właśnie tym się zajmują.

Pierwsza planeta odkryta poza Układem Słonecznym to PSR B1257+12 B. Jej odkrycie ogłoszono w styczniu 1992 roku. PSR to skrót od słowa „pulsar” – szybko rotująca gwiazda neutronowa o masie 1,5 masy Słońca, ale o rozmiarach miasta. Pulsary rotują ekstremalnie szybko – gwiazda macierzysta pierwszej odkrytej planety wykonuje pełen obrót wokół własnej osi raz na 0,006219 sekundy. Precyzja pomiaru jest tutaj ważna, ponieważ to właśnie mierząc wahania tempa rotacji, można odkryć obecność planet w pobliżu gwiazd.

W układzie PSR B1257 znamy trzy planety, które otrzymały nazwy: Draugr, Poltergeist i Fobotor. Poltergeista odkryto jako pierwszego. Tak, wiem. Mnie też zaciekały ich nazwy. Poltergeist to tak zwany hałaśliwy duch, Draugr to nieumarła istotna z legend nordyckich, która wciąż żyje w swoim grobie, a Fobotor to uosobienie koszmarów sennych oraz syn Nyks, greckiej bogini nocy. Astronomowie są takimi gotami. Należy tu zaznaczyć, że układ PSR B1257 nie byłby zbyt przyjaznym miejscem dla życia – planety skąpane są w promieniowaniu emitowanym przez ich gwiazdę macierzystą. Draugr znajduje się najbliżej gwiazdy i okrąża ją w 25,262 ziemskich dni. To jak dotąd najmniej masywna odkryta planeta – jej masa to zaledwie dwie masy Księżyca.

Kosmiczny Teleskop Keplera został wyniesiony w przestrzeń kosmiczną 7 marca 2009 roku i wkrótce zrewolucjonizował poszukiwania planet pozasłonecznych. „Kepler” poszukuje okresowych spadków jasności gwiazd spowodowanych przejściem planet na tle ich tarcz obserwowanych z Ziemi. Badając szczegóły spadku jasności oraz wykorzystując dodatkowe dane z obserwacji prowadzonych za pomocą teleskopów naziemnych, można wywnioskować wiele informacji o odkrytych planetach. Gdy piszę te słowa, jest 11 maja 2016 roku, dzień po tym, jak zespół naukowców misji Kepler ogłosił odkrycie 1284 nowych planet. W tej nowej próbie znajduje się 550 kandydatek na planetę podobną do Ziemi, a dziewięć z nich krąży w tak zwanej ekosferze wokół swoich gwiazd macierzystych, czyli w miejscu, gdzie na ich powierzchni mogą panować warunki umożliwiające istnienie mórz i oceanów. 21 planet skalistych mniejszych niż dwukrotność rozmiarów Ziemi odkrytych przez „Keplera” przedstawiono na ilustracji [na stronie 315](#).

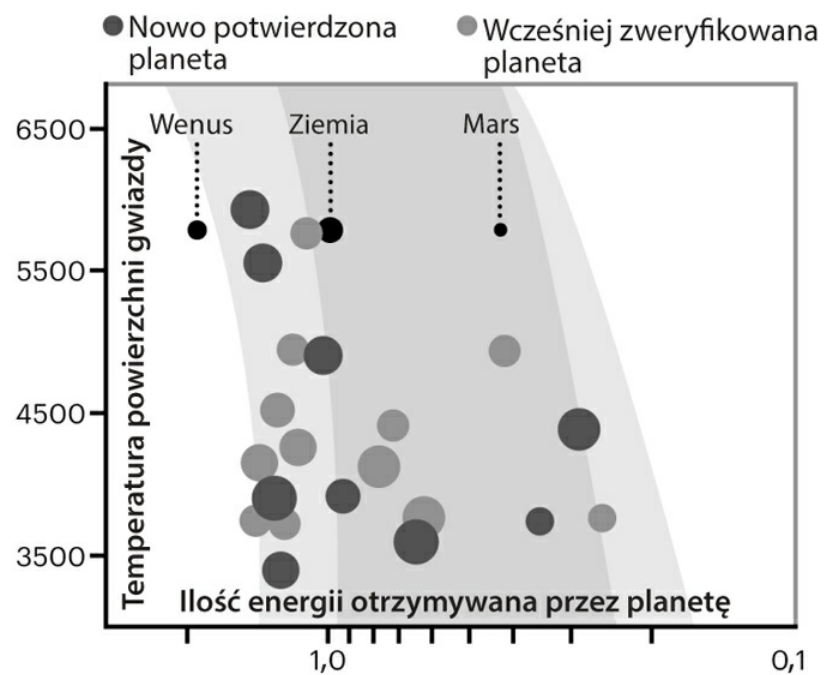
Dane z „Keplera” i instrumentów naziemnych pozwalają na pomiary rozmiarów, masy i parametrów orbitalnych obserwowanych planet, które z kolei można wykorzystać do oszacowania ich gęstości i temperatury oraz składu chemicznego. Idąc dalej, promieniowanie gwiazdy oddziałujące z atmosferą planety musi być analizowane bezpośrednio, i to też

potrafimy robić.

Pierwsza analiza atmosfery dużej skalistej planety została przedstawiona w lutym 2016 roku przez zespół z University College w Londynie i opierała się na danych z Kosmicznego Teleskopu Hubble'a^[14]. Planeta nosząca nazwę 55 Cancri e to jedna z pięciu planet krążących wokół żółtego karła 55 Cancri A, oddalonego od Ziemi o zaledwie 40 lat świetlnych. Gwiazda ta posiada także mniejszego towarzysza – czerwonego karła 55 Cancri B. Planeta ma masę około ośmiu mas Ziemi i atmosferę składającą się z wodoru i helu. Nie wykryto w niej pary wodnej, choć znaleziono ślady siarkowodoru, co według naukowców wskazuje na atmosferę bogatą w węgiel. To egzotyczne, nieprzyjazne miejsce, na którym rok trwa 18 godzin, a temperatura powierzchni przekracza 2000 stopni Celsjusza. Z pewnością nie jest to planeta, na której oczekivalibyśmy znalezienia życia. Znaczenie tych pomiarów skrywa się w udanym odtworzeniu niezwykle słabego widma małej skalistej planety z jasnego, przytłaczającego światła jej gwiazdy macierzystej.

Bezpośrednie obserwacje promieniowania odbitego od egzoplanet znajdują się wciąż w powijakach, ale Kosmiczny Teleskop Jamesa Webba (JWST, James Webb Space Telescope), który zostanie wyniesiony w przestrzeń kosmiczną w październiku 2018 roku, pozwoli na badanie atmosfer planetarnych w niespotykanych dotąd szczegółach. Następca „Keplera”, Transiting Exoplanet Survey Satellite, w przestrzeni znajdzie się w 2017 roku i z pewnością znacząco powiększy liczbę planet podobnych do Ziemi, których obserwacje będzie prowadził JWST, włącznie z planetami o rozmiarach Ziemi krążącymi wokół czerwonych karłów. Odkrycie pary wodnej na takiej planecie byłoby ekscytujące. Odkrycie wysokich poziomów tlenu stanowiłoby dowód na obecność organizmów fotosyntetyzujących. Możemy być bardzo blisko odkrycia, że nie jesteśmy sami we Wszechświecie.

Czy to by coś znaczyło? Wszystkie te planety są poza naszym fizycznym zasięgiem, przynajmniej w najbliższej przyszłości, a prawdopodobieństwo, że mogą one być zamieszkane przez inteligentne istoty, jest – w mojej opinii – ekstremalnie niskie. Jeżeli istnieje tam życie, stawiałbym na mikroby. Ale mogę się mylić. Tak czy inaczej, to dużo znaczy. Światła, które widzimy na nocnym niebie, są silne, majestatyczne, ale bezosobowe. Szczegółowa wiedza o tysiącu planet z lodu, śniegu i ognia nie sprawi, że będziemy lepiej przeżywać nasze życie – ludzka pycha nam na to nie pozwoli. Wydaje mi się, że będziemy potrzebowali wspólnego wstrząsu, aby zacząć „traktować się lepiej i dbać o bladoniebieską kropkę”. Takim wstrząsem może być coś negatywnego. Być może będziemy musieli zabrać się do wspólnej pracy nad klimatem, który niszczymy, a może będziemy musieli zmienić tor lotu zagrażającej nam planetoidy. Może to być też coś pozytywnego. Astronomia zmienia dane w marzenia; jeżeli odkrywamy, że życie jest powszechne we Wszechświecie, czy wciąż możliwe będzie spojrzenie na jasne gwiazdy nocnego nieba i poczucie, że nie jesteśmy jednym narodem pod tymi gwiazdami? Po co badać tęczę? Wtedy będziemy już wiedzieli.



Potencjalne planety podobne do Ziemi w ekosferze swojej gwiazdy odkryte przez Kosmiczny Teleskop Keplera (stan na maj 2016 r.).

CZEMU JEST TYLKO
PIOSENEK O TĘCZACH?
CZY WARTO O NICH
WCIAŻ ŚNIĆ?
TĘCZE, CHOĆ PIĘKNE,
TO TYLKO ILUZJE
I PONOĆ NIE KRYJĄ NIC.
TAK NAM MÓWIONO,
NIEKTÓRZY W TO WIERZĄ,
LECZ TO BŁĄD, POKAŻE CZAS,
KIEDYŚ ZNAJDZIEMY
DRUGI SKRAJ TĘCZ,
ZAKOCHANI, MARZYCIELE I JA.

KERMIT ŻABA, *MUPPETY*

Źródła ilustracji

s. [128](#) © Print Collector/Getty Images; s. [162](#), [167](#) © Brian Cox; s. [190](#) © Wellcome Library, Londyn. Wklejka ze zdjęciami: s. [1](#), [9](#) (na dole), [11](#) © Brian Cox; s. [2](#) (u góry) © Wilson Bentley Digital Archives of the Jericho Historical Society/snowflakebentley.com; s. [2](#) (na dole) © NOAA/Science Photo Library; s. [3](#) © Brian J. Skerry/Getty Images; s. [4–5](#) © Jose Fuste Raga/Getty Images; s. [6](#) © Mondadori Portfolio/Getty Images; s. [7](#) (u góry) © NOAA Archives; s. [7](#) (na dole) © NASA/Science Photo Library; s. [8](#) © Carrie Vonderhaar/Ocean Futures Society/National Geographic Creative; s. [9](#) (u góry) © Sylvester Chong/Getty Images; s. [10](#) (u góry) © Dirk Wiersxwma/Science Photo Library; s. [10](#) (na dole) © BBC; s. [12](#) (u góry) © Arabic Manuscripts Collection/New York Public Library/Science Photo Library; s. [12](#) (na dole) © NASA/JPL/Space Science Institute/Science Photo Library; s. [13](#) (u góry) © David Parker/Science Photo Library; s. [13](#) (na dole) © NASA/SDO/Getty Images; s. [14](#) © The Asahi Shimbun/Getty Images; s. [15](#) © Science & Society Picture Library/Getty Images; s. [16](#) (oba zdjęcia) © NASA.

Podziękowania

*S*ily *Natury* powstają już od dawna. Od stycznia 2014 roku światowej klasy zespół kierowany przez Danielle Peck i Giselle Corbett wykazał się ogromnymi ambicjami intelektualnymi i kreatywnymi oraz dużą dozą stoicyzmu, tworząc program telewizyjny, który towarzyszy niniejszej książce. Chcielibyśmy podziękować wszystkim zaangażowanym w produkcję za wielkie poświęcenie temu projektowi.

W szczególności dziękujemy Matthew Dyasowi oraz Stephenowi Cooterowi za pozostanie w tym projekcie i wyprodukowanie tak pięknie zrealizowanych i przemyślanych filmów. Wsparcia udzielił im niezwykle utalentowany zespół, który tydzień po tygodniu zmagał się z wyzwaniami produkcji o tej skali. Stąd też wielkie podziękowania otrzymują Alex Ranken, Alice Jones, Suzy Boyles, Duncan Singh, Helene Ganichaud, Mags Lightbody, Francesca Bassett, Emma Chapman, Louisa Reid, Robert Hanger, Wendy Clarke, Laura Stevens, Rebecca Hickie, Nik Sopwith, Simon de Glanville, Julius Brighton, Tim Cragg, Paul O'Callaghan, Graeme Dawson, Adam Finch, Lee Sutton, Damien Sung, Andy Paddon, Paul Thompson, Benji Merrison, Vicky Edgar oraz Marie O'Donnell.

Chcielibyśmy także dodać szczególne podziękowania dla Darrena Jonususa, który po raz kolejny ustanowił nowe standardy rzemiosła i kreatywności w zakresie edycji.

Ogromne podziękowania dla Laury Davey, producent generalnej w BBC Science, która przeprowadziła produkcję przez wiele trudnych dni z typowym dla siebie spokojem i wsparciem.

Wielkie podziękowania kierujemy również do profesora Jeffa Forshaw i profesora Matta Cobba za ogrom czasu i myśli, które włożyli w ten projekt.

Zespół z HarperCollins po raz kolejny wykazał się w równej mierze cierpliwością i błyskotliwością. Trzymając nerwy na wodzy w obliczu morderczych terminów i książki bez słów, stworzyli te przepiękne strony wydawać by się mogło z dnia na dzień. Chcielibyśmy podziękować Zoë Bather, Julii Koppitz, Helenie Caldon, Madeleine Penny oraz oczywiście wspaniałemu Mylesowi Archibaldowi (który powinien spędzać mniej czasu w poczekalni dentystycznej).

Andrew chciałby podziękować Annie... ponownie... za jej miłość, wsparcie i cierpliwość w ciągu długich wieczorów, kiedy oddawał się pracy.

Ja pragnę podziękować Uniwersytetowi Manchesterskiemu oraz Royal Society za czas niezbędny do stworzenia *Ukrytych sił Natury*. Ponadto chcę podziękować Sue Rider, mojej nieskończenie mądrej i wspierającej agentce i przyjaciółce.

Brian Cox i Andrew Cohen

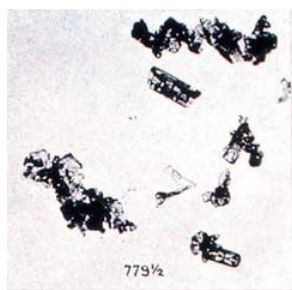
Maj 2016



Scott Carpenter podpisał tę fotografię dla swojego syna George'a na krótko przed swoją śmiercią. Zmarł w wieku 88 lat w październiku 2013 roku.



Wilson Bentley pochłonięty odtwarzaniem unikatowych i delikatnych kształtów płatków śniegu na filmie. Vermont, 1885.



Te zachwycające zdjęcia wykonane przez Wilsona Bentley'a za pomocą mikroskopu przymocowanego do kamery ukazują unikatowość każdego pojedynczego płatka śniegu.



Każdej zimy ciepłe wody Florydy stają się domem dla pozornie jednego z mniej eleganckich kształtów Natury. To zastrzeżenie jest istotne, ponieważ nieporadnie wyglądający manat jest równie dobrze dostosowany do swojego środowiska, co najbardziej estetycznie wyrafinowany motyl do swojego.



Zespoły budujące castells – ludzkie wieże przeczące grawitacji i strachowi – w akcji.



Jedna z najsłynniejszych prac Moneta *Les Coquelicots* (Maki) przedstawia idealny moment w czasie, pewnego letniego dnia 1873 roku na francuskiej wsi.



To ziarniste czarno-białe zdjęcie zajmuje historyczne miejsce w archiwach meteorologii. Fotografia wykonana za pomocą satelity TIROS-3 stanowi pierwszy przypadek odkrycia huraganu na podstawie zdjęć satelitarnych i jest jednym z pierwszych zdjęć tropikalnego cyklonu zrobionych z przestrzeni kosmicznej.



Sondy Voyager wyniesione zostały w przestrzeń kosmiczną w 1977 roku, aby nigdy nie powrócić z misji badania zewnętrznych rejonów Układu Słonecznego. Ze swoich podróży w przestrzeń międzygwiazdą przesłały na Ziemię zdjęcia Jowisza i Saturna.



Efekt zmienności przyciągania grawitacyjnego i siły odśrodkowej Księżyca widoczny jest na całym świecie w pływach. Przyptywy i odpływy zmieniają codziennie wygląd wybrzeży, a obecnie mamy dostęp do technologii monitorowania i przewidywania ich, tak abyśmy mogli wykorzystać te informacje do celów morskich – jak również dla przyjemności, na przykład do surfowania!



W sercu wulkanu Ijen znajduje się największy kwasowy krater na świecie; spokojny i piękny, jest jednocześnie jednym z najbardziej ekstremalnych środowisk naturalnych na Ziemi.

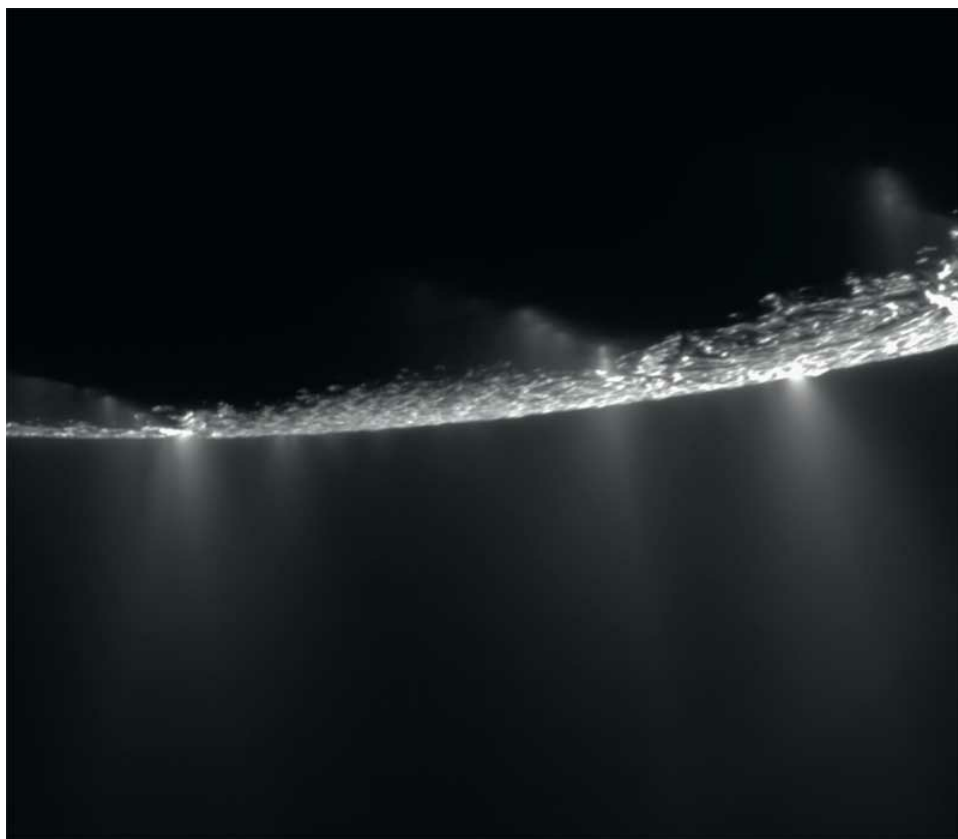


Odkrycie kryształów cyrkonu w paśmie górskim Jack Hills dostarczyło nam dowodów na to, że atmosfera 4,4 miliarda lat temu była bardzo podobna do dzisiejszej.

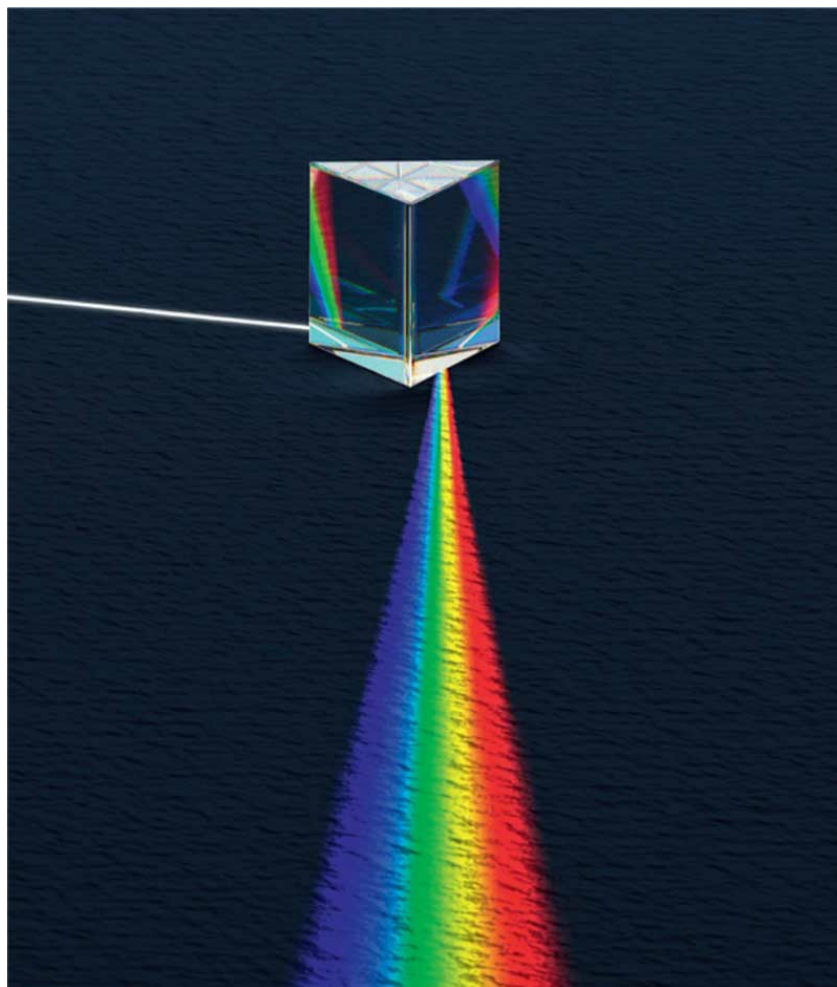




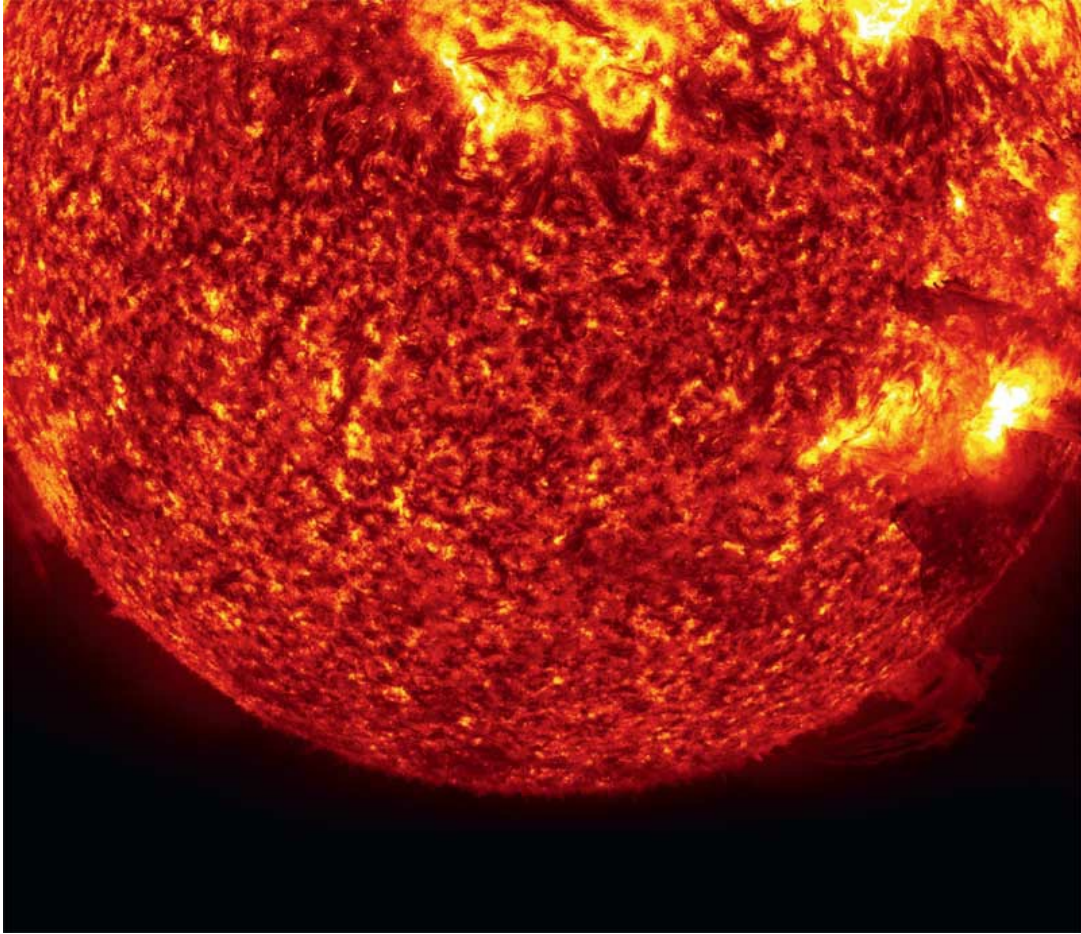
Przepiękny manuskrypt Kamala al-Din al-Farisiego zawierający matematyczne wyjaśnienie procesu powstawania tęczy.



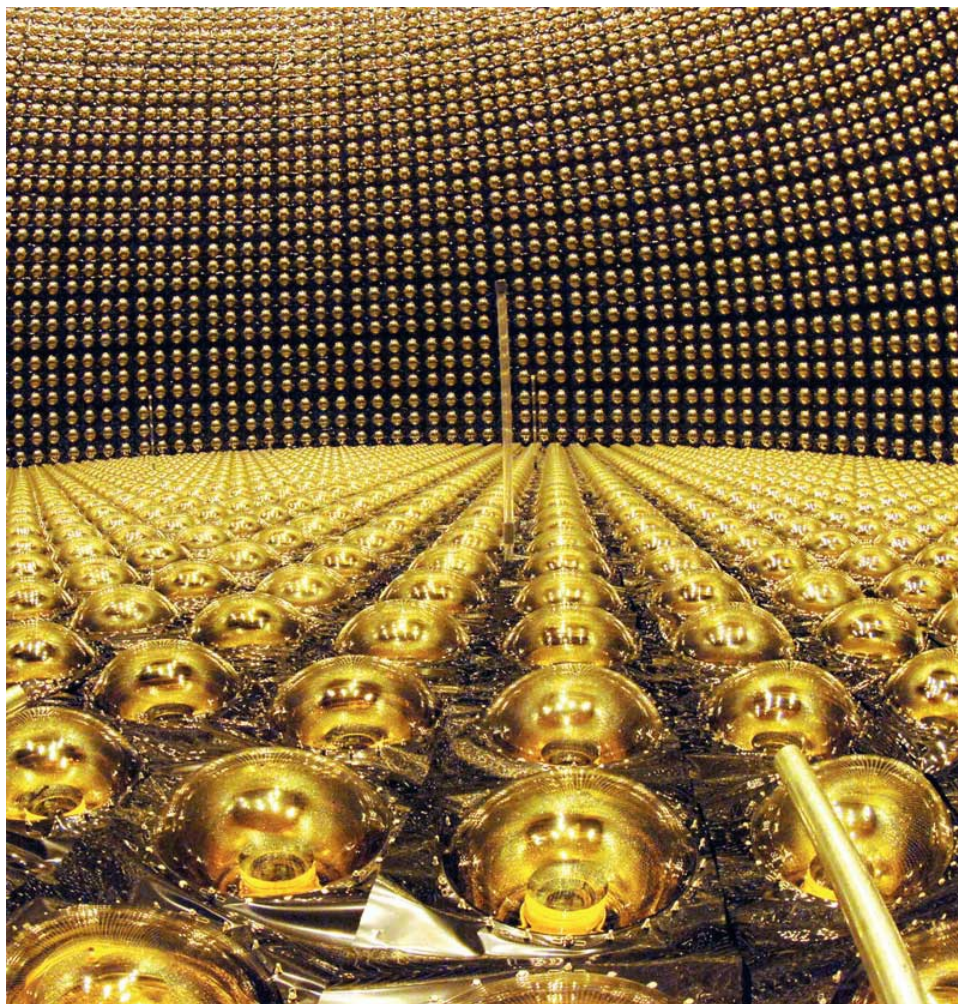
Lodowe fontanny Enceladusa sfotografowane przez sondę Cassini podczas jej ostatniego przelotu w pobliżu tego księżycyca w październiku 2015 roku.



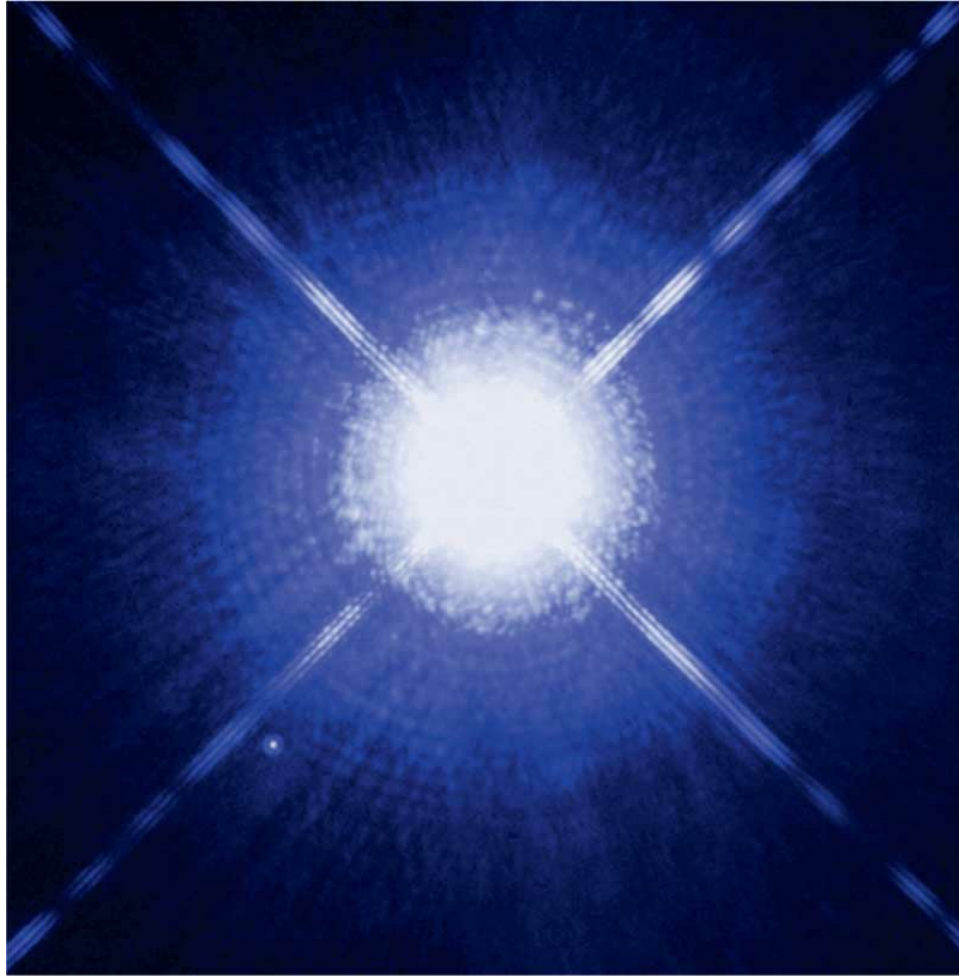
Pryzmat demonstrujący efekty refrakcji i odbicia. Promień białego światła uderza w pryzmat i jest rozpraszany na przeciwnej ścianie. Część promieniowania ulega refrakcji, wychodząc z pryzmatu i tworząc widmo.



Koronalne wyrzuty masy oraz rozbłyski słoneczne dowodzą niesamowitej energii Słońca – jedna taka eksplozja ma moc porównywalną z miliardem bomb wodorowych.



Detektor neutrin Super-Kamiokande znajduje się pod górą Ikeno w Japonii; tam, 1000 metrów pod ziemią, naukowcy badają neutrina słoneczne i atmosferyczne.



Biały karzeł Syriusz B świeci bardzo jasno, podczas gdy Słońce stopniowo wypromieniowuje swoje ciepło, aż zostanie po nim tylko ciemniejący czarny karzeł.



The White Marble – zdjęcie Ziemi od strony bieguna wykonane w ramach Blue Marble 2012 za pomocą satelity Suomi NPP (NASA).



Cienka błękitna linia oddzielająca naszą planetę od próżni przestrzeni kosmicznej widziana z pokładu Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS).

Przypisy

[1] Ogólnie przyjmuje się, że „Passereau” wykorzystane zostało tutaj jako dowcip, łączący wróbla (*moineau*) z francuskim poetą Jeanem Passeratem, który napisał noworoczny wiersz o Niczym. Prostackie, ale zabawne!

[2] Istnieje wiele sposobów układania na płaszczyźnie elementów o więcej niż jednym kształcie; parkietaż Penrose’a stanowi szczególnie ciekawy przykład, w którym płaszczyzna może być złożona z zestawu nieokresowych elementów, tworzących nigdy niepowtarzający się wzór.

[3] Szczegóły dotyczące tego, gdzie znajdują się elektrony w jakiegokolwiek cząsteczce, są bardzo trudne do obliczenia. Szczegóły otrzymujemy, rozwiązując równania Schrödingera w sferycznie symetrycznym potencjale generowanym przez jądro atomowe. Jeżeli chcesz poznać więcej szczegółów i jesteś zainteresowany dokładniejszym opisem teorii kwantowej, znajdziesz je w mojej książce napisanej wspólnie z Jeffem Forshawem zatytułowanej *Kwantowy Wszechświat*.

[4] Aktualnie przyjmuje się pewną nieścisłość między różnymi pomiarami promienia protonu, która może wskazywać na coś interesującego, czego jeszcze nie znamy. Zob. przykładowo <http://arxiv.org/pdf/1502.05314.pdf> – to techniczny artykuł, ale zachęcam do rzucenia okiem, ponieważ pięknie przedstawia on precyzję współczesnej fizyki cząstek.

[5] George Orwell, *Politics and the English Language*.

[6] Nie są to symetrie w przestrzeni trójwymiarowej, takie jak symetria obrotowa sześcianu. Są to bardziej abstrakcyjne symetrie.

[7] **Najmniejsze rozmiary okrągłej skały a wysokość najwyższych gór na Ziemi.** Wyobraź sobie duży skalny sześcian leżący na powierzchni innej dużo większej skalnej kuli, takiej jak na przykład planeta (wybraliśmy sześcian, aby jakoś sobie to wyobrazić, ale kształt nie ma tu znaczenia). Gdy sześcian będzie za duży, to jego ciężar sprawi, że skała pod nim ustąpi, a sześcian zanurzy się w niej. Oczywiście, aby skała zaczęła się odkształcać i ustępować, potrzeba dużego ciężaru. Przykładowo granit może wytrzymać ciśnienie 130 milionów N/m², zanim zacznie się odkształcać – to trochę ponad 1000 razy więcej niż ciśnienie atmosferyczne. Przyjmijmy, że nasza wielka skalna kula ma wytrzymałość na ściskanie rzędu 100 MPa, oznaczmy ją za pomocą P . Teraz musimy poznać ciężar naszego sześcianu, przyjmując, że jego wysokość to h . Jego ciężar równy jest jego masie pomnożonej przez GM/R^2 (z praw Newtona), gdzie M to masa wielkiej kuli, a R to jej promień. Jeżeli gęstość sześcianu wynosi $d = 3000 \text{ kg/m}^3$ (typowa dla skał), to jego masa wynosi $d \times h^3$. Masa kuli podobnie wynosi $M = 4/3 \times 3,14 \times R^3 \times d$ (3,14 to matematyczna liczba pi i wykorzystaliśmy tutaj wzór na objętość kuli). Do naszych celów 3,14/3 bliskie jest 1, co nie robi większej różnicy (naszym celem jest zgrubne oszacowanie, a nie precyzyjne obliczenia). Razem oba wyniki oznaczają, że ciężar sześcianu wynosi $d \times h^3 \times G \times 4R \times d$. Ten ciężar naciska na podłoże, które ustąpi, jeżeli ciężar jest większy niż wytrzymałość na ściskanie skały, na której stoi, czyli $P \times h^2$. Innymi słowy, podłoże ustąpi pod sześcianem, jeżeli $h^3 \times G \times 4R \times d^2$ jest większe od $P \times h^2$. To wskazuje, że h musi być mniejsze niż $P/G/4/R/d^2$. Jeżeli ta maksymalna wartość h jest mniejsza niż 10% promienia kuli, powierzchnia kuli nie zostanie znacząco odkształcona przez sześcian (tj. sześcian będzie niewielkim odkształceniem na powierzchni większej kuli). Wprowadzenie $h/R = 0,1$ mówi nam, że promień planet R musi być większy od pierwiastka kwadratowego z $P/G/4/d^2/10\%$. Wprowadzenie liczb daje nam promień równy nieco ponad 600 kilometrów. Liczby tej nie należy brać zbyt dosłownie, ponieważ wykorzystaliśmy typowe wartości gęstości i wytrzymałości na ściskanie, a będą one różne dla różnych planet, planetoid czy komet. Nie powinno nas to jednak zrażać w stosunku do tego, co osiągnęliśmy. Nasze obliczenia mówią nam, że skały o promieniu większym niż 600 km będą

wydawały się gładkie, gdyż większe struktury na ich powierzchni będą w nią wnikały i będą przez nie pochłaniane. Skoro już przy tym jesteśmy, możemy szybko oszacować rozmiary największych gór na Ziemi i na Marsie. Już to obliczyliśmy powyżej. Maksymalne rozmiary sześcienniej góry na Ziemi wynoszą $P/G/4/R/d^2$. Na Ziemi kombinacja GM/R^2 (gdzie M to masa Ziemi, a R to jej promień) nazywana jest przyspieszeniem grawitacyjnym g , a jego wartość zbliżona jest do 10 m/s^2 . Oznacza to, że nasza góra zaczęłaby wnikać w podłoże, gdyby była wyższa niż $P/d/g$, czyli miała około 3,3 km. Jeżeli natomiast góra jest stożkiem, a nie sześcianiem, wysokość wzrasta mniej więcej trzykrotnie do około 10 km, co odpowiada wysokości największych gór na Ziemi. Na Marsie grawitacja na powierzchni ma wartość około 40% grawitacji ziemskiej, co oznacza, że największe góry na Marsie powinny mieć wysokość $10 \text{ km}/40\% = 25 \text{ km}$, czyli tyle co wysokość Olympus Mons.

[8] Pete i Dud – popularna w latach sześćdziesiątych para komików, w których wcielali się Peter Cook i Dudley Moore. Ich skecze były emitowane na antenie BBC (przyp. red.).

[9] Dla wysokości 97 metrów (wysokość wieży Asinelli) na północnej szerokości geograficznej 44,5 stopnia (Bologna) oraz $\omega = 7,3 \times 10^{-5}/\text{s}$ (prędkość kątowna Ziemi) odchylenie równa się 1,8 centymetra. Szczegóły tego obliczenia można znaleźć na przykład w książce *Dynamics and Relativity* (Wiley) autorstwa Forshaw oraz Smith.

[10] Widać to w definicji odległości w czasoprzestrzeni. Przyjmij, że $\Delta x = 0$, ponieważ jesteś we własnym układzie odniesienia, i zauważ, że $\Delta s / \Delta t = c$.

[11] Elizabeth A. Bell, 14518–14521, doi: 10.1073/pnas.1517557112.

[12] Mówiąc precyzyjnie, powinniśmy zaznaczyć, że jest to prawda tylko w stanie równowagi.

[13] Zob. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/themes/physics/fusion.

[14] Zob. <http://arxiv.org/abs/1511.08901>.