





# Copernicus College

Studiuje online, zupełnie za darmo

między innymi:

- Antropologia: biologia-kultura-umysł
- Elementy algebry
- Wprowadzenie do kosmologii
- Nauki kognitywne a natura ludzka
- Wprowadzenie do prawa karnego
- Ewolucja: mechanizmy i konsekwencje



Ciekawe kursy na poziomie akademickim,  
wykłady gwiazd nauki  
i podręczniki - zapraszamy na:

[www.copernicuscollege.pl](http://www.copernicuscollege.pl)



## DZIESIĘĆ LAT CENTRUM KOPERNIKA

Dziesięć lat. Co może wydarzyć w tym czasie? Światło pokonuje ok. 95 bilionów km, a ślimak winniczek – jeśli nie ma akurat nic innego na głowie – nieco ponad 260 km. W naszych ciałach wymienione zostają wszystkie komórki układu kostnego, a wątroby – nawet siedmiokrotnie. Dziesięć lat może znacząco zmienić otaczający nas świat. By to dostrzec, wystarczy uświadomić sobie, że dekadę temu nie istniały jeszcze Bitcoin, Uber, Instagram i iPad.

Centrum Kopernika Badań Interdyscyplinarnych, powołane w 2008 r. przez Uniwersytet Jagielloński i ówczesną Papieską Akademię Teologiczną z inicjatywy ks. prof. Michała Hellera, od samego początku było instytucją inną niż wszystkie. Naszą misją, wyrastającą z krakowskich tradycji filozoficznych, jest prowadzenie badań naukowych i działalności popularyzatorskiej, których celem jest ukazanie, iż nauka stanowi integralną i istotną część kultury.

W czasach daleko posuniętej specjalizacji naukowej i krzykliwych, ale niezbyt głębokich przekazów medialnych, nie jest to misja łatwa. Centrum miało jednak szczęście współpracować z wieloma utalentowanymi naukowcami i popularyzatorami nauki, a także instytucjami, które potrafiły dostrzec wagę naszego przesłania. Dzięki temu w ciągu

dziesięciu lat udało się prowadzić badania naukowe na pograniczu nauk empirycznych, filozofii i teologii, założyć powszechnie doceniane wydawnictwo naukowe, uruchomić pierwszą polską platformę z darmowymi kursami online, zorganizować pięć edycji Copernicus Festival, stworzyć księgarnio-kawiarnię De Revolutionibus, rozpocząć cykl spotkań ze światowej sławy myślicielami Wielkie Pytania w Krakowie, i wiele, wiele więcej.

W rocznicowym katalogu, który oddajemy w Państwa ręce, opisujemy niektóre z naszych inicjatyw i prezentujemy wybór artykułów przybliżających bliskie nam zagadnienia.

Nie wiemy, co wydarzy się w ciągu kolejnych dziesięciu lat, choć możemy mieć pewność, że światło pokona ten sam niewyobrażalny dystans prawie 100 bilionów km, a winniczek nie zdoła dotrzeć z Krakowa do Warszawy. Mamy natomiast nadzieję, że Centrum będzie się dalej rozwijać – dzięki współpracy wybitnych uczonych, entuzjastom i gościom organizowanych przez nas wydarzeń i ciekawości czytelników naszych publikacji.

BARTOSZ BROŻEK

## SPIS TREŚCI

4. Historia Centrum Kopernika Badań Interdyscyplinarnych  
ŁUKASZ KWIATEK

10. Czy matematyka jest poezją  
MICHAŁ HELLER

12. Coraz bardziej ożywiona kropelka  
ŁUKASZ LAMŻA

16. Czy można podglądać umysł  
MATEUSZ HOHOL

19. Narzędzia, spółka zoo  
SZYMON DROBNIK

22. Piękne oblicze chaosu  
SEBASTIAN SZYBKA

26. Centrum Kopernika w liczbach

28. Więcej niż metafora  
MARCIN MIŁKOWSKI

31. Nieprzypadkowy przypadek  
BARTOSZ BROŻEK

34. Historia pewnej nierówności  
PAWEŁ HORODECKI, MICHAŁ ECKSTEIN

38. Piękno równa się prawda  
TOMASZ MILLER

41. Mądrzejsze, niż nam się wydaje – wywiad z Fransem de Waalem

46. Możliwości i granice neurobiologii  
JERZY VETULANI

48. Gdy rozum śpi  
JERZY STELMACH

50. Wpływ Michała Hellera na globalne ocieplenie  
ŁUKASZ LAMŻA



Centrum Kopernika Badań Interdyscyplinarnych jest pozawydziałową jednostką Uniwersytetu Jagiellońskiego

Wydawca: Fundacja Centrum Kopernika  
Redakcja: Łukasz Kwiatek; współpraca: Diana Sałacka  
Skład i korekta: Artur Figarski  
Projekt okładki i infografika: Piotr Zięba

# HISTORIA CENTRUM KOPERNIKA BADAŃ INTERDYSCYPLINARNYCH

Tekst: **ŁUKASZ KWIATEK**

Fotografie: **ADAM WALANUS**

**Dziesięć lat temu nikt nie spodziewał się, że Centrum Kopernika rozrośnie się tak szybko – i tak bardzo rozszerzy profil swojej działalności.**

Na początku była nagroda.

– Jeździłem wtedy z serią wykładów po Australii. Pewnego dnia zadzwonił do mnie Józef Życiński i mówi, że mogę hulać, ile chcę, bo będę miał za co – dostanę Nagrodę Templetona – wspomina ks. Heller. – To było kilka miesięcy przed jej oficjalnym przyznaniem. Życiński był członkiem komisji Nagrody Templetona w poprzednich latach i jakoś udało mu się pierwszemu dowiedzieć – wyjaśnia.

Wbrew zachęce bp. Życińskiego nagrody – wynoszącej 1,6 mln dolarów, to jeszcze więcej niż wartość Nagrody Nobla – ks. Heller nie przełamał. W całości przeznaczył ją na Centrum Kopernika Badań Interdyscyplinarnych, które miało formalizować działalność środowiska od lat gromadzącego się wokół Hellera i Życińskiego. A jeszcze wcześniej – wokół arcybiskupa krakowskiego, kardynała Karola Wojtyły.

## XX w. i początek XXI w.

Od lat 70. ubiegłego stulecia, w siedzibie biskupów krakowskich przy Franciszkańskiej 3, a później w obrębie zimnych murów zrujnowanego klasztoru na ul. Augustiańskiej 7, w pierwszy piątek po 15. każdego miesiąca o godz. 15.15 odbywały się interdyscyplinarne konwersatoria. Każde gromadziło dziesiątki (w okresie świetności nawet ponad dwieście) osób – naukowców, filozofów, intelektualistów. Zjeżdżali na nie ludzie z całej Polski, czasem zapraszano gości z zagranicy. Zwykle wygłaszane były dwa referaty, które miały wywołać dyskusję. Poruszano tematy z pogranicza nauk empirycznych i fi-

lozofii. Konwersatoria ciągnęły się do wieczora, kończąc się – jak wspomina ks. Heller – „wraz z wyjściem przedostatniego dyskutanta”.

Uczestnicy konwersatoriów zaczęli na przełomie 1978/79 roku wydawać biuletyn zatytułowany „Zagadnienia Filozoficzne w Nauce”. Początkowo drukowany w piwnicach krakowskiej kurii – na marnej jakości papierze, w całości przygotowany na maszynie do pisania i kopiowany na powielaczu, kolportowany w liczbie egzemplarzy uzależnionej od zdobytych zasobów bezcennego papieru. Na stronie tytułowej – dla zmylenia władz – widniał napis: „do użytku wewnętrznego”, choć czasopismo trafiało do szerszego grona odbiorców.

Spotkania odbywały się regularnie, nawet w niebezpiecznym okresie stanu wojennego.

– W któryś piątkowy dzień, gdy przypadało nasze konwersatorium, ZOMO użyło gazów łzawiących w rejonie Rynku Głównego. Rynek obstawiono milicyjnymi wozami. Trzeba było przeciskać się wśród nich, gdy chciało się dotrzeć na spotkanie na Franciszkańskiej. Oczyszczyły jeszcze, gdy szło się po schodach na pierwsze piętro. W salonach arcybiskupich zapominało się jednak szybko o wysoce przygodnych realiach, takich jak stan wojenny czy przemówienia sezonowych patriotów. Dyskusja nad kwantowaniem grawitacji i nowymi osiągnięciami w dziedzinie badań nad sztuczną inteligencją przenosiła w inny świat i pozwalała z politowaniem patrzeć na tych poprawiaczy świata, którzy nie rozumieli, jak wielką bronią jest myśl, lecz usiłowali bronić *ancien régime* przy pomocy pałek i gazów – wspominał po latach

na łamach „Zagadnień Filozoficznych w Nauce” Józef Życiński.

Paradoksalnie, po upadku *ancien régime*, gdy z ulic ulotnił się gaz łzawiący, a zdobycie kawy dla gości przestało wymagać, jak wcześniej, zaangażowania pracowników linii lotniczych (znajomych ks. Życińskiego), comiesięczne konwersatoria przestały się odbywać – chyba dlatego, że pojawiło się dla nich zbyt wiele legalnych alternatyw. Jednak część ich stałych bywalców, wraz z nowym pokoleniem studentów i doktorantów, skupili wokół siebie Heller i Życiński, już wtedy cenieni wykładowcy Papieskiej Akademii Teologicznej, zakładając Centrum Badań Interdyscyplinarnych. Później, z konieczności, jego nazwa przemianowana została na Ośrodek Badań Interdyscyplinarnych (w skrócie: OBI).

– Józef Życiński postanowił wyrobić pieczętkę, ale pomylił nazwę i napisał „Ośrodek Badań Interdyscyplinarnych”. A że łatwiej było zmienić nazwę instytucji niż zdobyć nową pieczętkę, zostało OBI – wspomina ks. Heller.

OBI służyło z kilku inicjatyw. Po pierwsze, pojawiały się kolejne numery „Zagadnień Filozoficznych w Nauce”, coraz bardziej profesjonalnie wydawanych, które stały się rozpoznawalnym periodykiem naukowym. Po drugie, pod patronatem OBI zaczęły ukazywać się monografie naukowe – znane jako „Rozprawy OBI” – często były to prace magisterskie, doktorskie i rozprawy habilitacyjne osób ze środowiska. Po trzecie, co roku, najczęściej w maju, organizowano gromadzące setki słuchaczy kilkudniowe konferencje naukowe, znane później jako „Krakowskie Konferencje Metodologiczne” (a mniej formalnie: „konferencje majowe”).



Obchody 80. urodzin ks. Hellera

– OBI to była taka instytucja, która powstała sama z siebie, nie była pryncyjalnie afiliowana, nigdzie rejestrowana – i przez wiele lat bardzo dobrze działała. Na zasadzie wolontariatu, bez żadnych pieniędzy – wspomina ks. Heller. – Gdy dostałem Nagrodę Templetona, to chciałem się tych pieniędzy pozbyć, bo mnie nie były do niczego potrzebne, tylko sprawiały kłopot. Pomyślałem więc, że można sformalizować OBI.

## 2008

Ta myśl została urzeczywistniona w połowie 2008 r., gdy senaty Uniwersytetu Jagiellońskiego oraz Papieskiej Akademii Teologicznej (obecnie Uniwersytetu Papieskiego Jana Pawła II) podjęły uchwałę o powołaniu Centrum Kopernika Badań Interdyscyplinarnych jako jednostki wspólnej obydwu uczelni, ale finansowanej z własnych środków. Uroczysta inauguracja Centrum, z udziałem wiceprezydenta Fundacji Johna Templetona Charlesa Harpera oraz ich magnificencji rektorów PAT i UJ – ks. Jana Dyducha i Karola Musioła – miała miejsce 2 października w Collegium Maius UJ. Przedstawiono wówczas cztery kluczowe obszary działalności Centrum Kopernika: badania naukowe, popularyzację nauki, edukację i działalność wydawniczą. Jednocześnie założona została Fundacja Centrum Kopernika, kierowana przez

ks. Janusza Mączkę, wieloletniego współpracownika ks. Hellera, i Marcina Gorazdę. To właśnie na konto Fundacji trafiła cała kwota Nagrody Templetona.

Pierwszym z czterech „strategicznych” obszarów miało zająć się kilkanaście powołanych grup badawczych, w których skład weszli cenieni naukowcy z całej Polski – fizycy i kosmologowie, filozofowie, historycy nauki, biologowie i ewolucjoniści, psychologowie, matematycy... Grupy działały niezależnie, organizowały własne seminaria i przygotowywały publikacje, których autorzy umieszczali w afiliacji nazwę Centrum Kopernika. Ich działalność dokumentowały drukowane co roku „Copernicus Center Reports”.

Popularyzacji służyć miał przede wszystkim założony na przełomie 2009/10 r. kanał Youtube, na którym zaczęły się pojawiać nagrania coraz liczniejszych wydarzeń organizowanych przez Centrum. Edukacja koncentrowała się na studentach – przeprowadzono dwa międzyuczelniane kursy akademickie, poświęcone „Nauce i Wielkim Pytaniom” i „Nauce i Religii”, dzięki pomocy Wyższej Szkoły Informatyki i Zarządzania w Rzeszowie transmitowane na żywo w internecie. Ta sama uczelnia pomogła w sprawach wydawniczych – pierwsze książki z logiem Copernicus Center Press przygotowano w wydawnictwie należącym do WSiZ-u. Całością działalności Centrum Kopernika od początku kierował Bartosz Brożek.



## COPERNICUS FESTIVAL

Powstał, aby pokazywać, że nauka jest ważną częścią kultury. W trakcie odbywających się w jego ramach wykładów, debat, spotkań, lekcji, warsztatów, koncertów, wystaw i pokazów filmowych szukamy wzajemnych powiązań pomiędzy nauką a filozofią, humanistyką, literaturą, sztuką i innymi dziedzinami tradycyjnie rozumianej kultury. Motywem przewodnim festiwalu jest co roku inne fundamentalne pojęcie lub zjawisko. Dotychczas były to: rewolucje, geniusz, piękno, emocje i przypadek. Najbliższą edycję poświęcimy językowi.

Wydarzenia festiwalowe układają się w kilka pasm. „Śniadania Mistrzów” to spotkania „autorskie” z wybitnymi polskimi intelektualistami. W ramach „Nauki czytania” rozmawiamy z uczniami szkół podstawowych o lekturach szkolnych, szukając wątków filozoficznych lub naukowych, a podczas „Lekcji czytania” dyskutujemy z licealistami o książkach popularnonaukowych. W paśmie „Perceptio” nauka i filozofia spotykają się na przykład z literaturą, muzyką czy sportem. Interaktywna wystawa „Inventio” pokazuje natomiast związki technologii i sztuki. Wieczorami odbywają się wykłady i debaty, a następnie koncerty i pokazy filmowe. Nagrania wielu wydarzeń dotychczasowych edycji Copernicus Festival można obejrzeć na kanale Youtube Centrum Kopernika oraz w serwisie copernicusfestival.com.



### COPERNICUS COLLEGE

Został powołany do życia po to, by rozwinąć edukacyjną działalność Centrum Kopernika. Copernicus College to pierwszy polski e-unwersytet lub, inaczej mówiąc, platforma typu MOOC, czyli serwis umożliwiający studiowanie za darmo, po polsku i przez internet. W zróżnicowanej ofercie Copernicus College znajdują się kursy z takich dziedzin, jak matematyka, fizyka, chemia, medycyna, biologia ewolucyjna, psychologia, nauki kognitywne, prawo, a także filozofia i teologia – prowadzone przez najlepszych polskich uczonych oraz młodych, ambitnych naukowców.

Poza nagraniami wykładów kursy zostały urozmaicone szeregiem materiałów dodatkowych – artykułami naukowymi, fragmentami książek oraz zestawami ćwiczeń i testów – wszystkim tym, co pozwala wygodnie przyswajać wiedzę i rozwijać zainteresowania bez wychodzenia z domu. W Copernicus College znaleźć można również e-podręczniki, pozwalające lepiej przygotować się do przystąpienia do bardziej specjalistycznego kursu, a także przetłumaczone na język polski i wzbogacone o dodatkowe materiały wykłady, wygłoszone przez gwiazdy światowej nauki.

W ciągu pierwszych trzech lat funkcjonowania Copernicus College z jego oferty skorzystało ponad 14 tys. studentów. Więcej na [copernicuscollege.pl](http://copernicuscollege.pl).

PU



Festiwalowy koncert Sławomira Zubrzyckiego na viola organista

### 2009–2012

Początkowo wszystkie inicjatywy Centrum Kopernika finansowane były z odsetek – dla bezpieczeństwa postanowiono nie naruszać „żelaznego kapitału”, jakim były pieniądze z Nagrody Templetona. Plany były jednak większe, dlatego w 2011 r. przygotowany został ambitny projekt „The Limits of Scientific Explanation”, który uzyskał finansowanie Fundacji Templetona w kwocie niemal 2 mln dolarów. To właśnie w tym czasie w Centrum Kopernika pojawiła się znaczna część obecnego zespołu.

Grant Templetona otworzył zupełnie nowe możliwości. Ruszyły badania skoncentrowane na trzech obszarach – fizyce i kosmologii, filozofii i teologii oraz kognitywistyce, zatrudniono doktorantów i post-doców. Dzięki serii konferencji naukowych udało się zdobyć cenne kontakty na całym świecie, a także zwiększyć rozpoznawalność Centrum w środowisku akademickim. W krakowskich kawiarniach zainicjowaliśmy serię wykładów popularnonaukowych „Granice Nauki”, a przy współpracy z portalem Interia.pl uruchomiliśmy serwis popularnonaukowy [granicenauki.pl](http://granicenauki.pl) – dla większości osób związanych z Centrum Kopernika był to poligon szkoleniowy w popularnonaukowej publicystyce. Powstał zespół filmowy, wyposażony we własne kamery. Na UPJP II uruchomione zostały finansowane z grantu dwujęzyczne studia

drugiego stopnia (magisterskie) „Philosophy in Science” oraz studia podyplomowe „Nauka i Religia”. Wreszcie, jako osobną spółkę, powołano wydawnictwo Copernicus Center Press, z Jackiem Włodarczykiem, byłym studentem Hellera i Życińskiego, na czele. Poza przygotowywaniem publikacji naukowych, CCPress dość szybko zaczęło podbijać rynek książek popularnonaukowych. Jedną z pierwszych publikacji nowego wydawnictwa była, niestety już pośmiertna, książka bp. Życińskiego *Świat matematyki i jej materialnych cieni*, którą niemal ukończoną odnaleziono w jego osobistym komputerze.

### 2013–2015

Doceniając działalność Centrum, w 2013 r. Fundacja Johna Templetona przyznała nam kolejny znaczący grant – tym razem na projekt pozanaukowy. Zdobyte pieniądze pozwoliły przede wszystkim sfinansować dwa zupełnie nowe przedsięwzięcia: Copernicus College i Copernicus Festival.

– Nasz kanał Youtube bardzo dobrze się rozwijał, zarówno gdy idzie o liczbę nagrań, jak i ich jakość. Jednocześnie zależało nam na rozwinięciu działalności edukacyjnej. Postanowiliśmy więc spróbować czegoś nowego: e-unwersytetu, podpatrując coraz popularniejsze zagraniczne MOOC-i (platformy masowych, otwartych studiów internetowych), takie jak edX czy Coursera – wyjaśnia Bartosz Brożek. – Nie mieli-



Hanna Damasio, Antonio Damasio, Karen Wynn

śmy oczywiście takich pieniędzy, jak na Zachodzie, ani wielkiego doświadczenia. Ale też w Polsce nie mieliśmy konkurencji, co nas motywowało do pracy. Chcieliśmy być pierwsi – dodaje.

Prace informatyczne ruszyły w 2014 r., pierwszy kurs, przygotowany przez chemika, Andrzeja Koleżyńskiego z AGH, nagrany został w 2015 r. Wersja testowa serwisu uruchomiona została w październiku 2015 r. – w siódmą rocznicę powstania Centrum. Nowy polski e-unwersytet wzbudził spore zainteresowanie – w ciągu kilku dni zarejestrowało się na nim kilkaset osób. Spora część z nich na tyle uważnie wysłuchała wykładów, że zdołała poprawnie rozwiązać testy i uzyskać certyfikat ukończenia kursów.

Jeszcze zanim ruszył Copernicus College, Fundacja Centrum Kopernika dokonała dla wielu zaskakującej inwestycji – w październiku 2013 r. otworzyła księgarnio-kawiarnię De Revolutionibus na ul. Brackiej 14, w budynku należącym do Wydziału Prawa i Administracji UJ. Nazwa, odnosząca się do oryginalnej nazwy dzieła Kopernika *O obrotach sfer niebieskich*, była pomysłem samego ks. Hellera, który od dawna marzył o takim miejscu – gdzie można wypić kawę, znaleźć książkę i wysłuchać wykładu.

Coraz szersza działalność Centrum Kopernika wzbudzała życzliwe zainteresowanie mediów, zwłaszcza „Tygodnika Powszechnego”, z którego wyszła inicjatywa organizacji nauko-

wo-kulturalnego festiwalu. Po wielu spotkaniach doprecyzowujących i rozwijających tę ideę, dzięki wsparciu Miasta Kraków, w maju 2014 r. odbyła się pierwsza edycja Copernicus Festival, poświęcona rewolucjom w nauce i kulturze. Związki Centrum Kopernika z „Tygodnikiem Powszechnym” zostały jeszcze bardziej zacieśnione we wrześniu 2014 r., gdy Fundacja CK objęła część udziałów krakowskiego pisma. Na mocy podjętych ustaleń w „Tygodniku” powstał wtedy dział naukowy, którego członkami zostali przedstawiciele Centrum.

Festiwal, serwis internetowy, kanał Youtube, wykłady otwarte i Copernicus College – to wszystko, co składało na popularyzacyjną i edukacyjną działalność Centrum, doceniła w 2015 roku kapituła konkursu Popularyzator Nauki, organizowanego przez Polską Agencję Prasową i Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Centrum zdobyło główną nagrodę w kategorii dla instytucji naukowych.

### 2016–2017

Mimo naszej szerokiej działalności ścisły zespół Centrum Kopernika, odpowiedzialny za kwestie organizacyjne i logistyczne, nie był duży – przez wiele lat tworzyło go około dziesięciu osób. Mogliśmy jednak korzystać z życzliwości i pomocy wielu kolejnych osób, zwłaszcza utożsamiających się z działalnością Centrum naukowców zatrud-



### DE REVOLUTIONIBUS

Od pięciu lat na Brackiej 14 w Krakowie wyborna kawa spotyka się z ambitną lekturą. Idea towarzysząca od samego początku temu miejscu, to stworzenie przestrzeni do spotkań i debat wokół zagadnień filozoficznych. Co tydzień mają u nas miejsce Granice Nauki – spotkania popularnonaukowe. De Revolutionibus rokrocznie angażuje się w Copernicus Festival.

Jednak nie samą filozofią człowiek żyje. Odbywa się u nas bardzo dużo spotkań poświęconych literaturze. Organizowaliśmy Festiwal Księgarń Niezależnych, co roku partycypujemy w Conrad Festival. Prowadzimy nasz autorski projekt Czas w Literaturze. Jesteśmy nastawieni na współpracę i chcemy integrować środowisko księgarzy. Byliśmy nagradzani w plebiscycie na najlepszą krakowską księgarnię, zorganizowanym w ramach programu Kraków Miasto Literatury UNESCO. Uczestniczymy w projekcie Krakowskie Księgarnie na Medal.

Nowości książkowe poddajemy uważnej selekcji, ponieważ chcemy, by na nasze półki trafiały tylko najlepsze tytuły. Czytelnicy znajdą tu szeroki wybór literatury humanistycznej, beletrystyki, reportaży, literatury dziecięcej, literatury obcojęzycznej oraz poezji. Niedawno poszerzyliśmy ofertę o dział prawniczy. Chcemy by De Revo rozwijało się jako przestrzeń spotkań – z książką, twórcami, czytelnikami. By było miejscem wymiany myśli.

KD, MS



## GRANICE NAUKI

Z tą nazwą od lat kojarzona jest popularyzatorska działalność Centrum Kopernika. Granice Nauki to zarówno serwis internetowy, jak i cykl popularnonaukowych wykładów.

W serwisie opublikowaliśmy kilkaset artykułów, przygotowanych przez znakomitych uczonych i popularyzatorów nauki. Pisali dla nas wybitni krakowscy profesorowie: Jerzy Vetulani, Michał Heller, Jerzy Stelmach, Adam Łomnicki; przeprowadziliśmy wywiady z gwiazdami światowej nauki: neurobiologiem Gregorym Hickokiem, astrofizykiem Nigelem Masonem, filozofem Peterem Godfreyem Smithem, psychologiem Piotrem Winkielmanem. Nie boimy się eksperymentów: infografik w formie psychotestu albo pokazujących zmiany w czasie i przestrzeni. Część z tych treści ukazała się równocześnie drukiem, na łamach dodatków popularnonaukowych do „Tygodnika Powszechnego”, które w naszym serwisie możecie pobrać w całości.

W wykładach skupiamy się na wszechświecie w skali mikro i makro, umyśle ludzi i innych zwierząt, historii i ewolucji życia oraz historii nauki. Nie gonimy za sensacją, unikamy zbyt krótkich form, każdy temat omawiamy w szerszym teoretycznym kontekście, pokazujemy ścieżki, po których krążyła ludzka myśl, zanim znalazła tę właściwą, prowadzącą do naukowego odkrycia.

Więcej na granicenauki.pl.

ŁK



Wykład sir Rogera Penrose'a, 2016

nionych na różnych uczelniach – którzy pisali artykuły popularnonaukowe, nagrywali kursy i wykłady, uczestniczyli w festiwalu, pomagali zapraszać kolejnych gości i pilnowali merytorycznej jakości wszystkich, co robiliśmy.

Dalsza działalność Centrum, zwłaszcza po zakończeniu projektów finansowanych przez Fundację Johna Templetona, wymagała zdobycia kolejnych środków. Udało się je pozyskać m.in. z Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, z budżetu przeznaczanego na działalność upowszechniającą naukę, oraz z Miasta Kraków i Uniwersytetu Jagiellońskiego. Dzięki nim odbywały się coraz bogatsze w treści i różnorodne w formie edycje Copernicus Festival, kanał Youtube oferował kolejne filmy, w serwisie granicenauki.pl pojawiały się nowe artykuły, a w De Revolutionibus odbywały się kolejne serie wykładów popularnonaukowych. W „Tygodniku Powszechnym” ukazała się przygotowana przez nas seria popularnonaukowych dodatków „Wielkie Pytania”. Z kolei Ministerstwo Kultury i Dziedzictwa Narodowego wsparło naszą nową inicjatywę: Naukę Czytania. Naukowcy związani z Centrum Kopernika wyruszyli do szkół podstawowych, gdzie razem z uczniami tropili naukowe wątki w tradycyjnej literaturze dla dzieci.

W lecie 2016 r. doczekaliśmy się nowej siedziby. Po latach korzystania z pomieszczeń Wydziału Prawa i Administracji UJ – oraz z nieformalnego biura w De Revolutionibus – Fundacja Centrum Kopernika osiadła na drugim

piętrze budynku na ul. Szczepańskiej 1. Jeden z pokoi zaaranżowany został na studio nagraniowe wykładów przeznaczonych na Copernicus College.

W październiku 2017 r. wykładem jednego z najśłynniejszych współczesnych filozofów i kognitywistów – Daniela Dennetta – zainaugurowaliśmy nowe przedsięwzięcie: „Wielkie Pytania w Krakowie”. Kilka razy do roku, wspólnie z Uniwersytetem Jagiellońskim i Miastem Kraków, będziemy zapraszali światowej sławy naukowców, by wspólnie z wybitnymi krakowskimi intelektualistami zastanawiali się nad pytaniami, które wywołują egzystencjalny niepokój: czy wszechświat ma sens? Czy istnieje wolna wola? Jaką rolę odgrywa w przyrodzie przypadek? Czy Piękno i Prawda zawsze idą w parze? To tylko kilka przykładów takich pytań. Choć nie mają one ostatecznej odpowiedzi, sama refleksja nad nimi wzbogaca nasze rozumienie świata i porządkuje myśli.

## 2018

Zbliżająca się dziesiąta rocznica powołania Centrum stanowiła dobrą okazję do przeprowadzenia zmian i realizacji nowych pomysłów. Najważniejsza z tych zmian miała charakter instytucjonalny – dzięki zaangażowaniu rektora UJ Wojciecha Nowaka i za zgodą Senatu od października Centrum Kopernika Badań Interdyscyplinarnych zostało pozawydziałową jednostką Uniwersytetu Jagiellońskiego.



Zespół Copernicus Festival 2017

Uniwersytet włączył się w organizację Copernicus Festival oraz w prowadzenie Copernicus College, co pozwoliło znacząco powiększyć nasz zespół. A przede wszystkim – stworzone zostały naukowe etaty dla adiunktów w trzech obszarach: kosmologii, filozofii przyrody i kognitywistyki. Dzięki temu, mamy nadzieję, uda się nam rozwinąć i lepiej skoordynować działalność badawczą.

Szansą na jeszcze większe otwarcie się na nauki humanistyczne jest zapoczątkowany właśnie projekt „Humanistyka w dialogu”. Chcemy prześwietlić niektóre „punkty styczne” nauk empirycznych i humanistycznych oraz stworzyć narzędzia do twórczego, interdyscyplinarnego dialogu.

Postanowiliśmy również rozbudować nasz kanał Youtube – temu służy rozpoczęty niedawno projekt „Nauka na żywo”, dzięki któremu wszystkie organizowane przez nas wykłady popularnonaukowe transmitowane są na żywo w internecie. Na kanale Youtube pojawi się też wiele nowych treści, w zupełnie nowej formie – audycji popularnonaukowych, przeglądu prasy naukowej czy wywiadów z cenionymi naukowcami. To pierwszy krok na drodze do stworzenia profesjonalnej internetowej telewizji popularnonaukowej.

## Spojrzenie wstecz i wpród

Michał Heller: Wyobrażałem sobie Centrum Kopernika trochę tak jak OBI, tylko lepiej zorganizowane. Tymczasem to wszystko się znacznie

rozrosło – i przerosło moje oczekiwania. Zwłaszcza działalność popularyzacyjną, którą bardzo cenię. Ale marzy mi się też, żebyśmy jeszcze mocniej postawili na edukację, najlepiej na każdym poziomie – od przedszkola, do trzeciego wieku. Bo zaniedbań w edukacji nie da się nadrobić nawet świetną popularyzacją. A przy tych zaniedbaniach ginie również rozumienie sensu i znaczenia badań naukowych.

Bartosz Brożek: Centrum nadal prowadzi badania naukowe na najwyższym poziomie, działalność edukacyjną i popularyzatorską. Moim marzeniem jest jednak, żeby udało się nam rozwinąć w trzech kierunkach. Po pierwsze, chcemy otwierać się na nowe problemy (na przykład na styku nauk przyrodniczych i szeroko pojętej humanistyki i sztuki) i przyciągać nowych, zdolnych ludzi. To pozwoli wzmocnić naszą rolę jako forum poszukiwania Ważnych Odpowiedzi na Wielkie Pytania. Po drugie, chcemy być jeszcze bardziej innowacyjni i proponować naukowcom, studentom i wszystkim zainteresowanym nauką i jej miejscem w kulturze nowe, niespotykane gdzie indziej formy dialogu i przekazu idei. Po trzecie wreszcie, Centrum powinno stawać się coraz bardziej międzynarodowe – już nie tylko w zakresie prowadzonych badań naukowych czy poprzez zapraszanie do Krakowa gwiazd światowej nauki, ale także prowadząc działalność edukacyjną i popularyzatorską w taki sposób, by przyciągać widzów i studentów z zagranicy.



## COPERNICUS CENTER PRESS

Pytany o to, jak wyobraża sobie przyszłość Centrum Kopernika, ks. Heller odpowiada, że powinno się ono mieścić się w wielopiętrowym budynku. Na parterze działałaby księgarnia-kawiarnia De Revolutionibus. Wyższe piętra zajmowałyby laboratoria badawcze i aule konferencyjne, studio nagraniowe dla e-universytetu, a nad wszystkim górowałoby wydawnictwo – CCPress. To jeszcze odległa wizja, ale już zaczyna się spełniać!

W ciągu zaledwie sześciu lat istnienia nasza oficyna wydała ponad 150 tytułów. Nasze publikacje (w języku polskim i angielskim) obejmują szerokie spektrum światowej myśli naukowej i filozoficznej: filozofię, teologię, kosmologię, nauki ewolucyjne, matematykę, logikę i neuronaukę. Każda książka jest dla nas nową przygodą. Tytuły wybieramy starannie, aby nasi Czytelnicy otrzymali wiedzę o tym, co w świecie nauki najciekawsze, prekursorskie, najważniejsze.

Autorzy CCPress to światowej sławy autorytety w swoich dziedzinach: Daniel C. Dennett, Robin Dunbar, Joseph LeDoux, Frans de Waal, polscy znakomici naukowcy: Bartosz Brożek, Mateusz Hohol, Łukasz Lamża, Tadeusz Pabjan oraz laureaci Nagrody Templetona – John D. Barrow, Michał Heller i sir Roger Penrose. Nasza misja to szeroko pojęta edukacja i popularyzacja nauki. Dobrze oddaje ją hasło: Wydajemy do myślenia!

PM

# Czy matematyka jest poezją

MICHAŁ HELLER

**Matematyka wydaje się prozaiczna, bo w postaci prostych twierdzeń potrafi wyrażać związki, których prawdziwość jest zagwarantowana ciągami kontrolowanych przez nas wyników. Ale ma również środki, by wyrazić – jak poezja – to, czego nie da się wyrazić w innym języku.**

Zacznę od rzeczy bardzo prozaicznej – od sylogizmu, jakim raczy się uczniów lub początkujących studentów:

Wszyscy ludzie są śmiertelni.  
Adam jest człowiekiem.  
Ścisłe myślący człowiek wyciągnie oczywiście wniosek:  
Zatem Adam jest śmiertelny.

Ale przedstawmy ten sylogizm poecie. Dla niego co innego będzie ważne. Wniosek oczywisty, czyli nieinteresujący. Śmierć to dramat ludzkiego istnienia. Sylogizm jest środkiem zbyt ubogim, by wyrazić nieuchronność tego dramatu. Dramat śmierci można by przedstawić na przykład w ten sposób:

Zajęta zabijaniem,  
robi to niezdarnie,  
bez systemu i wprawy.  
Jakby na każdym z nas uczyła się dopiero.  
Jeżeli dramatu nie da się pokonać,  
trzeba go przynajmniej oswoić:

Kto twierdzi, że jest wszechmocna,  
Sam jest żywym dowodem,  
że wszechmocna nie jest.

Nie ma takiego życia,  
które by choć przez chwilę  
nie było nieśmiertelne.

Śmierć  
Zawsze o tę chwilę przybywa spóźniona

Na próżno szarpie kłamkę  
Niewidzialnych drzwi.

Kto ile zdążył,  
tego mu cofnąć nie może.

O ileż więcej powiedziała Wiśława Szymborska we fragmentach tego wiersza niż suchy sylogizm Arystotelesa. A jednak sylogizm miał w sobie coś z nieuchronności śmierci:

Jeżeli  $p$ , to  $q$ .  
 $p$ .  
A więc  $q$ .

Skąd ten przymus wynikania? Czy jednak nie może być tak, żeby było „nie  $q$ ”? Szymborska mogłaby wyrazić swoją myśl na tysiąc różnych sposobów; sylogizm musi się kończyć jednym, i tylko jednym, wnioskiem. Na tym polega poezja wynikania. Gwiazdy mogą się wypalić, wszystkie wiersze ulec zapomnieniu, niebo i ziemia mogą przeminąć, a wniosek sylogizmu i tak będzie ważny.

Oczywiście sylogizm jest prymitywną formą poezji wynikania. Sięgnijmy więc po bardziej subtelny przykład.

Już Euklides udowodnił, że liczb pierwszych jest nieskończenie wiele; udowodnił – to znaczy podał ciąg wyników takich, że ostatnim zdaniem łańcucha wyników było zdanie: „liczb pierwszych jest nieskończenie wiele”. Do dziś rozmieszczenie liczb pierwszych w zbiorze liczb naturalnych pozostaje zagadką. Na podstawie eksperymentów numerycznych wiadomo na przykład, że w miarę posuwania się w ciągu liczb naturalnych, liczby pierwsze pojawiają się coraz rzadziej. Ale mimo to jest ich nieskończenie wiele. W 1737 r. Leonhard Euler znalazł związek między występowaniem liczb pierwszych a pewną funkcją, która wyglądała dziecinnie prosto, ale

okazała się bardzo bogata w „matematyczną treść”. Złożoność tej funkcji rozpoznał Bernhard Riemann w referacie wygłoszonym z okazji przyznania mu członkostwa Berlińskiej Akademii Nauk. Był rok 1859, ten sam, w którym ukazało się pierwsze wydanie *O pochodzeniu gatunków Karola Darwina*. Funkcja dzeta Riemanna do dziś jest źródłem wielu problemów matematycznych i przedmiotem fascynacji wielu matematyków.

Przyjrzyjmy się jej nieco dokładniej. Wygląda całkiem prozaicznie, jak wiele innych matematycznych formuł:

$$\zeta(s) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^s}$$

gdzie  $n$  jest liczbą naturalną, a  $s = \sigma + it$  liczbą zespoloną, której część rzeczywista jest większa od jeden. Nawet jeżeli spojrzeć na tę funkcję „uzbrojonym okiem” matematyka, to trudno w niej dostrzec coś nadzwyczajnego, ale jeżeli uruchomić aparat wynikania, to zaczynają się ujawniać rzeczy zaskakujące. Już Riemann w swojej oryginalnej pracy wysunął hipotezę, że wszystkie zespolone zera funkcji zeta leżą na prostej  $\sigma = 1/2$ . Mimo niezamordowanych wysiłków, hipoteza ta dotychczas pozostaje nieudowodniona. Na tego, kto przedstawi poprawny dowód, czeka nagroda w wysokości miliona dolarów. Od lat trwają komputerowe próby zmierzenia się z hipotezą Riemanna. Do września 2004 r. sprawdzono 910 miliardów początkowych miejsc zerowych funkcji zeta oraz kilku miliardów odległych miejsc (w okolicy miejsca zerowego o numerze 1023). Hipoteza Riemanna wyszła z tych prób zwycięsko – nie znaleziono kontrprzykładu. Ale dla matematyków to jeszcze nie dowód; dowód musi posługiwać się „cudem wynikania”, a nie „liczeniem na palcach”, choćby to były „palce” superszybkich komputerów.

Funkcja dzeta Riemanna zaskakuje matematyków swoimi własnościami. Nieustannie są odkrywane nowe, coraz mniej spodziewane. Zaskakuje nie tylko matematyków. W latach siedemdziesiątych ubiegłego stulecia odkryto, że istnieje zbieżność statystycznego rozkładu miejsc zerowych funkcji Riemanna z rozkładem poziomów energetycznych jąder atomowych ciężkich

pierwiastków chemicznych. Skąd funkcja dzeta wie o budowie jąder atomowych? Albo odwrotnie: skąd jądra atomowe wiedzą o funkcji dzeta? Przecież funkcja dzeta to czysta matematyka nieskażona żadnymi związkami z doświadczeniem! Czy dotykamy tu jakichś zagadnień, mających związek z podstawami naszego rozumienia tych dwu nauk – matematyki i fizyki?

Zostawmy jednak na boku ten pasjonujący problem. Być może jest jeszcze za wcześnie, by go głębiej drążyć. Powróćmy do czegoś, co mamy szansę lepiej zrozumieć.

W 1975 r. Siergiej Michajłowicz Woronin (przedwcześnie zmarły matematyk) udowodnił twierdzenie, znane jako twierdzenie o uniwersalności funkcji dzeta. Mówi ono co następuje:

Rozważmy na płaszczyźnie zespolonej pasek

$$P = \{s \in \mathbb{C} : \frac{1}{2} < \text{Re}(s) < 1\}$$

oraz zwarty zbiór  $U$  w  $P$ , taki, że dopełnienie  $U$  jest spójne w  $P$  (czyli  $P$  nie ma „dziur”). Niech  $f: U \rightarrow P$  będzie funkcją ciągłą na  $U$ , holomorficzną wewnątrz  $U$  i nieposiadającą miejsc zerowych wewnątrz  $U$ . Twierdzenie Woronina orzeka, że dla dowolnego  $\epsilon > 0$  istnieje taka wartość  $t = t(\epsilon)$ , że

$$|\zeta(s + it) - f(s)| < \epsilon,$$

dla każdego  $s \in U$ .

Twierdzenie to mówi więc, że jeżeli funkcja  $f$  przedstawia dostatecznie regularną krzywą, niezerującą się w obszarze, na którym jest określona, to krzywą tę możemy z dowolną dokładnością przybliżyć funkcją zeta Riemanna, przesuwając odpowiednio obszar  $U$  wzdłuż osi urojonej.

Jeżeli brzmi to mało poetycko, to wyobraźmy sobie, że zacytowany na początku tego wykładu wiersz Szymborskiej zapisałiśmy pisanymi literami, łącząc je tak, by powstała odpowiednio regularna krzywa. Twierdzenie Woronina stwierdza, że jeżeli odpowiednio przesuniemy obszar  $U$ , to funkcja dzeta odtworzy nam wiersz Szymborskiej (z dowolną dokładnością). Okazuje się, że aby odtworzyć wiersz Szymborskiej, musielibyśmy „pojechać” z obszarem  $U$  bardzo daleko wzdłuż osi urojonej. Tak daleko, że moc obliczeniowa obec-



nych, a nawet zapewne przyszłych, komputerów jest za mała, aby tam dotrzeć. Ale to w niczym nie zmienia sytuacji, że wiersz Szymborskiej tam jest.

Być może tu zaprotestujemy. Nie wiersz Szymborskiej, lecz tylko kształt linii, przy pomocy której ten wiersz został zapisany. Ale czymże innym jest wiersz Szymborskiej, jak nie kształtem, który jako rozpoznajemy? Ostatecznie komputery, które tak wiele mogą, także rozpoznają tylko „kształty” zer i jedynek. I nic ponadto.

Dotykamy tu głębokiego problemu filozoficznego: czy istnieje coś oprócz formy, kształtu? Czy to, co nazywamy treścią, nie jest tylko zagęszczeniem formy? W tym także jest poezja, że funkcja Riemanna podprowadza aż pod takie problemy. A przecież Szymborska była tu tylko pretekstem. Równie dobrze zamiast jej wiersza mogliśmy się posłużyć *Elementami* Euklidesa lub *Dziełami wszystkimi* Szekspira. Musielibyśmy tylko jeszcze dalej przesunąć się wzdłuż osi urojonej.

Jeżeli ktoś jeszcze wątpi w to, że matematyka jest poezją, niech napisze wiersz, poemat, cokolwiek..., w którym zawierałyby się wszystkie utwory poetyckie świata i wszystkie rozprawy naukowe. Jeżeli ideałem poezji jest prostota zapisu przy bogactwie treści, to żaden Szekspir nie napisał nic piękniejszego od funkcji Riemanna.

Stop! Czy nie posunęliśmy się za daleko! Ostatecznie, ściśle rzecz biorąc, funkcja dzeta zawiera tylko wszystkie możliwe kształty. Dobierając odpowiednie parametry  $s$  i  $t$ , możemy odtworzyć dowolną, odpowiednio regu-

larną krzywą. Czy to aż tak dziwne? Upieram się jednak, że matematyka jest poezją, i to poezją najwyższego lotu.

Poezja próbuje wyrazić niewyrażalne przy pomocy metafor, rozmycia reguł gramatycznych, nieoczekiwanych kontrastów znaczeń. Matematyka wydaje się prozaiczna, bo w postaci prostych twierdzeń potrafi wyrażać związki, których prawdziwość jest zagwarantowana ciągami kontrolowanych przez nas wyników. Ale ma również środki, by wyrazić – jak poezja – to, czego nie da się wyrazić w języku innym niż matematyka. Pomyślmy na przykład o różnych twierdzeniach o zmierzaniu do nieskończoności, o twierdzeniach egzystencjalnych, które mówią, że coś istnieje, choć nie potrafimy tego skonstruować, o strukturach – takich jak funkcja Riemanna – zawierających w sobie niewyobrażalnie bogatą treść. W tym widzę poetyczność matematyki.

Ale pomiędzy tym, co tradycyjnie nazywamy poezją, a poezją matematyki istnieje jedna zasadnicza różnica. W matematyce najbardziej poetyczne jest to, że obowiązuje w niej ścisłe wynikanie. Gdyby tylko w jednym miejscu ono zawiodło, wszystko by się zamieniło w kicz i kupę bzdur. Jak w dziele sztuki. Michał Anioł miał powiedzieć, że rzeźba jest już w bryle marmuru, trzeba tylko dłutem odrzucić to, co zbędne. Z tym że ludzkie dzieła sztuki są niedoskonałe: jedna poprawka za dużo i też mamy dzieło sztuki, tylko trochę gorsze i nigdy nie wiadomo, czy nie mogłoby być lepiej. Poezja matematyki jest doskonała, bo jeżeli dysponujemy dowodem, to wiemy, że jest tak jak powinno być.

# Coraz bardziej ożywiona kropelka

ŁUKASZ LAMŻA

Wyobrazić sobie powstanie życia z materii nieożywionej – to zadanie niełatwe, które nie udało się jeszcze nikomu.

Nawet najprostsze organizmy żywe są dziś cudownie finezyjnymi istotkami, których nie da się łatwo rozłożyć na części pierwsze albo stopniowo upraszczać, uzyskując coraz to prostsze, „prawie żywe” obiekty. Spróbujmy może wydzielić trzy główne aspekty świata biologicznego – strukturę, energię i informację – i przyjrzyć się przez ich pryzmat problemowi abiogenezy, czyli wyłonienia się życia z nie-życia. Może coś nam się z tego ulepi?

Ilustracje: Łukasz Lamża  
Opac. graficzne: Marek Zalejski

## STRUKTURA

Podstawową jednostką strukturalną życia jest komórka. Nie do końca wiadomo, dlaczego, ale tak właśnie jest – nie ma życia bez komórek. Komórka to w istocie tylko mały bąbelek tłuszczu, a jednak jest to też twierdza, której wnętrzu jest zazdrośnie chronione przed zagrożeniami z zewnątrz. Wnętrze jest moje, swojskie, bezpieczne. Zewnątrz jest cudze, obce, groźne.

Z chemicznego punktu widzenia (zob.: ENERGIA) zamknięcie pewnej ilości wody w tłuszczowej błonie służy przede wszystkim utrzymaniu w niej wysokich stężeń, pozwalających na przeprowadzanie kluczowych dla życia reakcji chemicznych. Gdyby nie istniała granica wydzielająca miejsce zachodzenia reakcji od środowiska (błona komórkowa), byłby poważny problem ze zgromadzeniem w jednym

## ENERGIA

Życie opiera się na nieustannym opędzaniu się przed chaosem, rozpadem i śmiercią.

Nadszarpnięta błona komórkowa musi zostać naprawiona i wygładzona (zob.: STRUKTURA); trzeba wiecznie zasklepić jakąś ranę, napalić w piecu i wyrzucić śmieci. Wydatkujemy niewiarygodną ilość energii tylko po to, aby nie się nie działo. Ciało dorosłego człowieka, który nic nie robi, spala ok. 60 kalorii co godzinę. Czemu? Cóż, jesteśmy małymi piecykami, których osławione 36,6 stopni Celsjusza nie utrzyma się samo.

Materia nieożywiona tym się różni od ożywionej, że ta pierwsza nie domaga się ciągłego dostarczania energii dla swojego istnienia. Aby zrozumieć tę cechę życia, wystarczy posadzić w jednym pokoju pracownika muzeum i ogro-

## INFORMACJA

Informację zdefiniować równie trudno, co energię. Wiemy natomiast, po czym poznać ich obecność lub brak. Układ pozbawiony energii jest pasywny, martwy, poddaje się środowisku. Układ posiadający energię jest aktywny, żywy, sam to środowisko formuje. Po czym poznać „obecność informacji”? Cóż, brak informacji to szum, chaos, nieporządek. Przypadek. Informacja wprowadza do układu porządek, powtarzalność, kierunkowość. Wprowadza, tfu, cel.

Świat ożywiony tętni od energii (zob.: ENERGIA) i obfituje w struktury (zob.: STRUKTURA), ale trzeba naprawdę się nagimnastykować, aby odnaleźć w nim informację. Informacja – jakkolwiek mętnie zdefiniowana i będąca raczej intuicją niż ostrym jak brzytwa pojęciem – wydaje się wiązać z takimi pojęciami jak kod

miejsu związków chemicznych potrzebnych do przeprowadzenia wielkiej alchemii życia, a po wykonaniu każdego kroku chemicznego produktu natychmiast rozpełzałyby się po świecie.

Z genetycznego punktu widzenia (zob.: INFORMACJA) komórka wyznacza elementarną oś „ja–inni”. Gdyby każda cząsteczka DNA należała do życia jako całości, nie wystąpiłyby to wspaniałe, okrutne zjawisko zwane konkurencją, opierające się na dążeniu do mojego sukcesu. Nie można sobie wyobrazić doboru naturalnego w świecie, w którym informacja genetyczna jest powszechnie dostępna. Podobnie jak nie byłoby motywacji dla innowacyjności gospodarczej w świecie bez patentów i sekretów przemysłowych. Powstanie komórki to kamień milowy na drodze ku życiu.

du zoologicznego, po czym zapytać, w jaki sposób dbają oni o swoje eksponaty.

Krótko mówiąc, kluczową cechą życia jest metabolizm: napędzający się cykl niszczenia środowiska i tworzenia siebie; rozkładania tego, co zastane, i łączenia jego części składowych na swój obraz i podobieństwo (zob.: INFORMACJA); katabolizmu i anabolizmu.

W przyrodzie nieożywionej energii nie brakuje; cały wszechświat wręcz rozpiera gigawaty i terawaty energii. Jest to jednak raczej energia gejzeru niż rzeki; raczej żrebaka niż konia pociągowego. Powstanie życia musiało się wiązać z ujarzmieniem energii. Jest takie pojęcie w termodynamice: energia użyteczna.

O, to, to!

i sygnał; wydaje się domagać istnienia nadawcy i odbiorcy: czegoś/kogoś, co/kto sygnał nadaje, i czegoś/kogoś, co/kto go odbiera i zostaje w ten sposób informowany. Informacja polegałaby więc na nadaniu czemuś formy – sprawiałaby, że coś staje się właśnie takie, a nie inne. To zresztą „robi” informacja genetyczna.

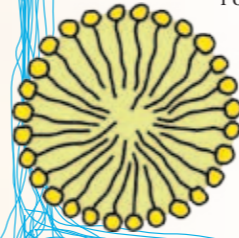
Bardzo trudno jest wyobrazić sobie początki informacji. W komórkach żywych nawet najprostsze komunikaty są tak złożone, że nie sposób wyobrazić sobie ich wyłonienia się z czegoś, co w ogóle nie jest komunikatem. Zdanie „KUP CHLEB” nie mogłoby wyewoluować metodą drobnych modyfikacji z litery „K”. Istota i pochodzenie informacji to jedna z największych zagadek biologii.

## 1. NAJMNIJSZA KROPELKA

Komórkę żywą opisaliśmy przed chwilą jako kropelkę tłuszczu. Cóż jest tak szczególnego w tłuszczach? Są to związki chemiczne składające się z dwóch podstawowych elementów strukturalnych, które można określić jako „główkę” i „ogon” (lub ogony).

Co istotne, główka jest nieodmiennie hydrofilowa, czyli „wodolubna”, dążąca do kontaktu z cząsteczkami wody, zaś ogonki są hydrofobowe, czyli „wodolękliwe”, wołające unikać wody i otaczać się innymi cząsteczkami hydrofobowymi.

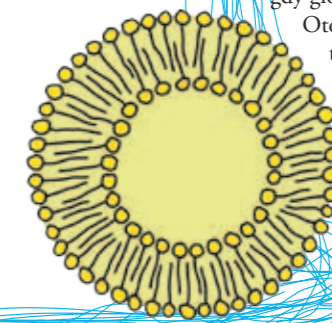
Wpuszczone do wody cząsteczki tłuszczu będą więc spontanicznie organizować się przestrzennie tak, aby jak najwięcej główek i ogonków było „zadowolonych”. Najprostszym przepisem na to jest micela – kuleczka zbudowana z wielu cząsteczek tłuszczu z ich „ogonkami” skierowanymi do środka, a „główkami” – na zewnątrz.



## 2. KROPELKA Z WNEŹTRZEM

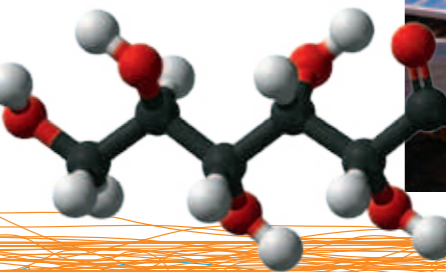
Micela to dopiero początek. Wyobraźmy sobie nieco inną konfigurację cząsteczek tłuszczu, która wychodzi naprzeciw hydrofobowości ogonków i hydrofilowej naturze główek: kuleczkę składającą się z dwóch warstw cząsteczek zetkniętych ze sobą ogonkami. Główki warstwy zewnętrznej „wystają” na zewnątrz, podczas gdy główki warstwy wewnętrznej „celują” do środka.

Oto liposom. Jest to rewolucyjny projekt, ponieważ teraz udało się uzyskać wewnątrz – oto fragment pierwotnego oceanu zostaje od niego oddzielony. Liposom to pierwszy wielki krok na drodze do komórki żywej. Wszystkie współcześnie żyjące organizmy składają się z komórek mających w zasadzie postać liposomu.



## 3. CHEMIA ALBO SŁOŃCE

Istnieją dwa główne źródła energii dla organizmów: słoneczna i chemiczna. Stąd – fototrofia i chemotrofia. Rośliny są fototrofami – posiadają w swoich komórkach barwniki fotosyntetyczne, np. chlorofil, czyli miniaturowe płaskie antenki łapiące fotony światła słonecznego i przekazujące ich energię dalej. Ostatecznie jest ona „wlewana” w wiązania chemiczne, np. glukozy, która zostaje utworzona poprzez pracowite zlepianie cząsteczek dwutlenku węgla (CO<sub>2</sub>, zobacz obok strukturę). My sami jesteśmy chemotrofami i korzystamy z energii tychże samych wiązań:



po zjedzeniu glukozy zostaje ona rozłożona na 6 cząsteczek CO<sub>2</sub>, który wydychamy.

Pierwsze formy życia były najprawdopodobniej chemotroficzne – „wynalezienie” aparatu do fotosyntezy było sporą innowacją. Tak czy inaczej nie sposób wyobrazić sobie organizmu żywego, który w jakiś sposób nie „podkrada” energii z otoczenia.



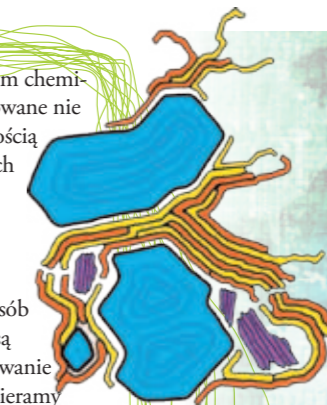
## 4. ŻYCIE MINERALNE



Cairns-Smith zauważył, że gdy kolejne blaszki minerału ilastego są w jakiś sposób uporządkowane – wyobraźmy sobie talię kart, w której naprzemiennie ułożone są kolory „czarne” (piki i trefle) oraz „czerwone” (kiery i karo) – to owo uporządkowanie przestrzenne zostanie „skopiowane”, gdy platek takiego minerału pęknie (przedzieramy talię na pół). Jest to sytuacja do pewnego stopnia przypominająca sekwencję DNA oraz jej kopiowanie. Cairns-Smith twierdził, że pierwszymi formami życia były właśnie mikroskopijne grudki minerałów, zaś stosiki minerałów ilastych stanowiły w nich odpowiednik DNA.

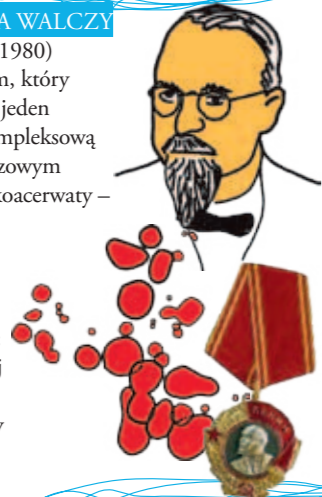
Alexander Graham Cairns-Smith (1931–2016) był szkockim chemikiem organicznym, który postanowił „wymyślić” życie zbudowane nie ze związków organicznych, tylko minerałów. Jego wielką miłością były minerały ilaste, zbudowane w skali atomowej z ułożonych luźno, jedna na drugiej, cienkich blaszek składających się z atomów krzemu i tlenu – trochę jak talia kart. Blaszki te chętnie łączą się z różnymi związkami chemicznymi, dzięki czemu każda blaszka może być odrobinę inna.

Cairns-Smith zauważył, że gdy kolejne blaszki minerału ilastego są w jakiś sposób uporządkowane – wyobraźmy sobie talię kart, w której naprzemiennie ułożone są kolory „czarne” (piki i trefle) oraz „czerwone” (kiery i karo) – to owo uporządkowanie przestrzenne zostanie „skopiowane”, gdy platek takiego minerału pęknie (przedzieramy talię na pół). Jest to sytuacja do pewnego stopnia przypominająca sekwencję DNA oraz jej kopiowanie. Cairns-Smith twierdził, że pierwszymi formami życia były właśnie mikroskopijne grudki minerałów, zaś stosiki minerałów ilastych stanowiły w nich odpowiednik DNA.



### 5. KROPELKA, KTÓRA WALCZY

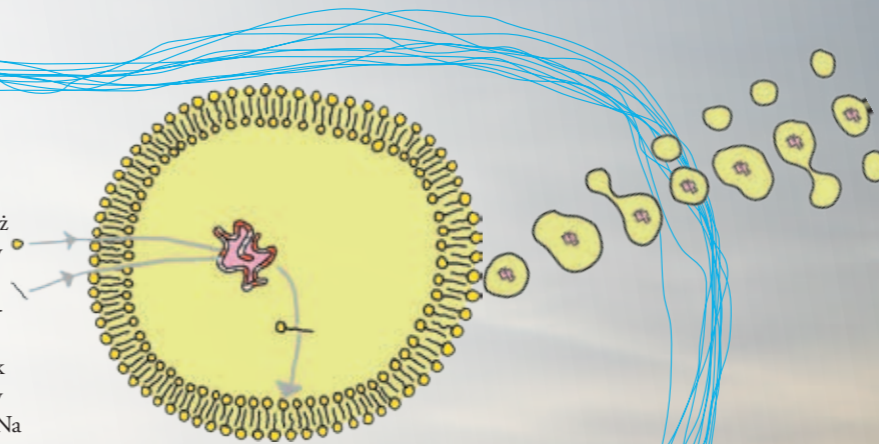
Aleksandr Oparin (1894–1980) był sowieckim biochemikiem, który w latach 20. XX wieku jako jeden z pierwszych przedstawił kompleksową teorię powstania życia. Kluczowym elementem jego teorii były koacerwaty – maleńkie kuleczki zbudowane z różnych związków organicznych, utrzymywane w całości przez siły hydrofobowe. Miały one powstawać spontanicznie w „pierwotnej zupie” na młodej Ziemi. Koacerwaty zbudowane były z różnych związków, miały więc różne tempo wzrostu,



rozmiar i zdolność do rozmnażania się. Tęgo typu dynamika miałyby doprowadzić do zajęcia ewolucji. Zdaniem Oparina w „ciepłym bajorku” z czasem dominowałyby coraz to bardziej żwawe i drapieżne koacerwaty, zdolne ostatecznie na przykład do zjedania sąsiednich koacerwatów. Równoległe do Oparina nad koacerwatami pracował John B.S. Haldane, brytyjski biolog. Haldane otrzymał Medal Darwina; Oparin – Order Lenina.

### 6. KROPELKA, KTÓRA ROŚNIE

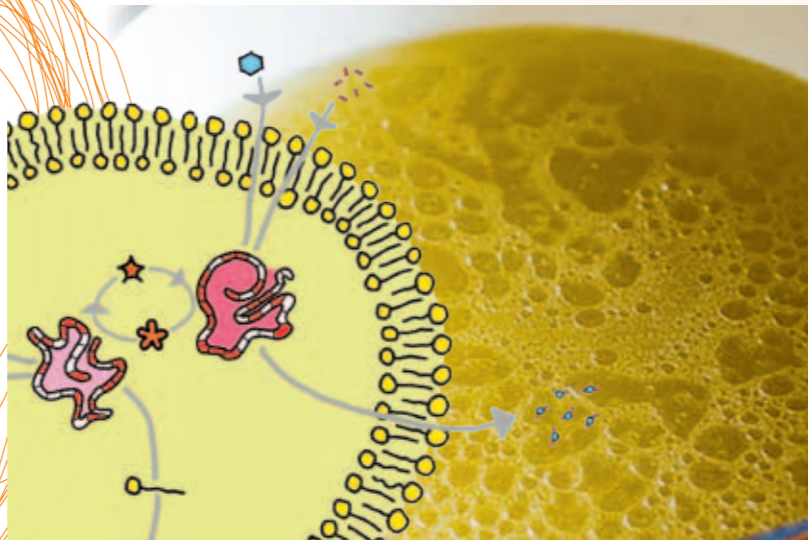
Aby poznać jeden z sekretów życia, wystarczy pochylić się nad talerzem rosołu (poniżej) i przez chwilę przeganiać łyżką oka. Małe oka są jędrne: po zamieszaniu zupy łyżką przemieszczają się grzecznie, ale raczej nie rozpadają. Duże oka to już raczej ameboidalne tłuszczowe kałuże – wystarczy delikatnie zamieszać rosoł, a rozleją się na boki i rozpadną. Oto napięcie powierzchniowe w działaniu. Wyobraźmy sobie kroplkę tłuszczu, która „zasysa” z otoczenia elementy składowe cząsteczek tłuszczu (np. kwasy tłuszczowe), a następnie łączy je ze sobą, tworząc składniki swej własnej błony. Na ilustracji obok przedstawiona została taka właśnie hipotetyczna kroplka, pośrodku której znajduje się pojedyncza cząsteczka białka zdolnego do przeprowadzania odpowiedniej reakcji chemicznej. Po pewnym czasie liposom taki urósłby, sflaczał i pod



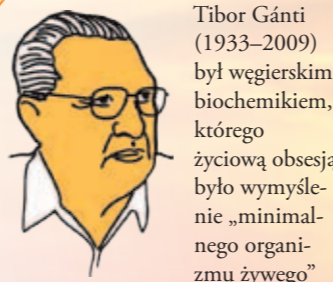
wplywem przypadkowych ruchów cieczy sam z siebie rozpadł się na dwie mniejsze kroplki. Jest to elementarny model wzrostu i rozmnażania się komórek.

### 7. POCHWYCIĆ ENERGIĘ

Energia lubi uciekać, rozmiękać się na drobne. Kawa stygnie, laptop się wyładowuje, a zapal do pracy rozwiewa się w bezmyślne klikanie. Energia w postaci rozproszonej to zaś po prostu ciepło. Wspomniana wcześniej hipotetyczna „kradnąca energię” kroplka tłuszczu to więc tylko mikroskopijny grzejniczek. Prawdziwy metabolizm zaczyna się wtedy, kiedy ów import energii zostanie choćby częściowo sprzęgnięty z jakąkolwiek „użyteczną” reakcją chemiczną. Wróćmy do naszej kuleczki, która buduje własną błonę komórkową. W rzeczywistości, aby z „ogonka” i „główki” utworzyć cząsteczkę tłuszczu, potrzebna jest energia. Wyobraźmy więc sobie, że tuż obok białka przeprowadzającego tę reakcję znajduje się inne – które rozбивa cząsteczki glukozy i „kasuje” zgromadzoną w ich wiązaniach energię. Bingo! Przekaz energii dokonuje się za pośrednictwem „waluty” – cząsteczki-pośrednika, reprezentowanej tu przez pięciopięciopalcikową gwiazdkę, występującą w dwóch stanach: „naładowany” (gwiazdka gruba) i „pusty” (gwiazdka chuda).



### 8. CHEMICZNA SIEĆ ŻYCIA



Tibor Gánti (1933–2009) był węgierskim biochemikiem, którego życiową obsesją było wymyślenie „minimalnego organizmu żywego”

– minimalnego zbioru reakcji chemicznych, które „zazębiają się” ze sobą (pewna ilość związków wchodzi z zewnątrz, potem produkty jednej reakcji są zawsze substratami kolejnej, aż ostatecznie pewne związki są usuwane z układu) oraz

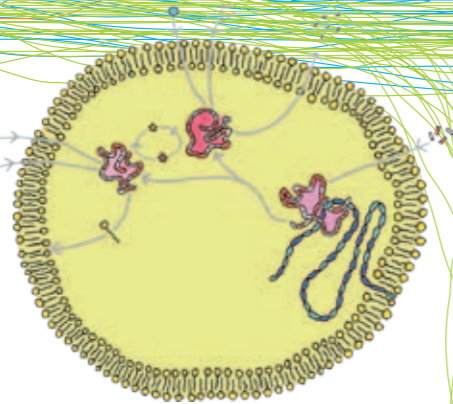
„mają sens” ze względu energetycznego (tj. reakcje dostarczające energii przeważają nad reakcjami pochłaniającymi energię).

Jego ukochanym dzieckiem był chemoton (Gánti opisał go w książce *Podstawy życia*) – hipotetyczny obiekt chemiczno-obliczeniowy spełniający te właśnie kryteria. Do dzisiaj nie wiadomo, czy pierwsze życie na Ziemi mogło być podobne do chemotonu.

### 9. NARODZINY WZORCA

W „standardowych” komórkach niemal wszystko robią białka: przeprowadzają reakcje chemiczne, budują rozmaite włókienka wzmacniające komórki, rozplatają i splatają DNA... i tak dalej. Aby jednak mogły to robić, muszą mieć odpowiedni kształt – białka działają bowiem, popychając, przesuując i zahaczając. Gdy więc konstruowaliśmy naszą „protokomórkę” z elementarnym metabolizmem (patrz obok), cicho – i niezbyt realistycznie – założyliśmy, że odpowiednie białka po prostu są na miejscu. W rzeczywistości kształt białek jest zakodowany w DNA.

Dodajmy więc do naszej kuleczki krótką nitkę DNA (po prawej na dole), która zawiera białka potrzebne naszej rosnącej protokomórce do życia. Dodajmy, że teraz do dwóch białek



od powiedzialnych za nasz „minimalny” metabolizm dołączyło jeszcze jedno, przeprowadzające odczyt genów i konstruuje białka z aminokwasów (białe i czerwone paseczki wpływające do komórki z prawej strony).

### 10. DROGA NA SKRÓTY?

Z życiem jest pewien fundamentalny problem – nie ma białek bez DNA (bo białka powstają na podstawie przepisu genetycznego), nie ma DNA bez białek (ponieważ białka „opiekują się” DNA i przeprowadzają proces odczytu zawartej w nim informacji). To trochę jak problem jajka i kury.



Brytyjski biochemik Leslie Orgel (1927–2007) postanowił rozwikłać tę zagadkę, skupiając się na RNA – niepozornym chemicznym bliźniaku DNA pośredniczącym w procesie odczytu informacji genetycz-



nej. Krótkie nici RNA, zwane mRNA, to „odpisy” genów, na podstawie których powstają białka – RNA może więc stanowić substytut DNA. To jednak nie koniec: istnieją bowiem cząsteczki RNA mogące pełnić funkcje enzymatyczne (czyli asystować przy przeprowadzaniu reakcji chemicznych), a więc zastępować białka. Stąd hipoteza świata RNA, jedna z najpopularniejszych dziś teorii na temat tego, jak mogło wyglądać bardzo wczesne życie.

### 11. ŻYCIE MINERALNE

NA KONIEC krótka uwaga otrzewniająca. Wszelkie wspomniane tu „minimalne formy życia” są – trzeba to jasno powiedzieć – śmiesznie proste w porównaniu z nawet najprostszymi formami życia. Nie wliczamy tu wirusów, czyli małych pakietów z informacją genetyczną. Nie są one organizmami, ale raczej podstępnyimi sygnałami, które potrafią zmuszać komórki do tworzenia swoich własnych kopii. Najprostsze organizmy mają ok. 300-400 genów. Większość to tzw. house-keeping genes, czyli geny „utrzymania domu” – minimalny, jak się wydaje, zestaw pozwalający na wytworzenie „od zera” wszystkich swoich składników, zdobycie i obróbkę pożywienia, obronę przed zagrożeniami, rozmnożenie się itd. Wszelkie próby tworzenia organizmów o znacząco mniejszej liczbie genów kończą się klęską. Cóż, wszystkie znane nam organizmy żywe mają za sobą miliardy lat ewolucji. Jeżeli nosimy w sobie ślady po pierwotnym tłustym błotku, są one bardzo dobrze ukryte.



# Czy można podglądać umysł

MATEUSZ HOHOL

**Badania neuronaukowe nie są łatwe: wymagają aparatury, wiedzy i świadomości ograniczeń. Łatwo się za to tworzy w tej dziedzinie mity.**

Można zaryzykować stwierdzenie, że spośród wszystkich dziedzin wiedzy największy postęp dokonuje się obecnie w neuronauce, czyli dyscyplinie badającej mózg oraz wpływ zachodzących w nim procesów na zachowanie całego organizmu. Również jak w żadnej innej dyscyplinie postęp ten wzbudza społeczne zainteresowanie – eksperymenty i teorie neuronaukowe opisywane są przez media, a nawet stają się przedmiotem kawiarnianych dyskusji, zaś książki neuronaukowców zajmują wysokie miejsca na listach bestsellerów.

Dzieje się tak przede wszystkim dlatego, że badania prowadzone przez neuronaukowców często dotyczą odwiecznych problemów filozoficznych, takich jak natura świadomości, istnienie wolnej woli czy podstawy moralności, i skłaniają przynajmniej do przeformułowania lub doprecyzowania tych pytań, a czasami wręcz proponują odpowiedzi podważające potoczne wyobrażenia o ludzkiej naturze. Co więcej, liczba projektów naukowych z przedrostkiem „neuro” w nazwie może przyprawić o lekki zawrót głowy – napotykamy już nie tylko neuropsychologię czy neurokognitywistykę, ale także: neuroestetykę, neuroekonomię, neurofilozofię, neuroetykę, a nawet i neuroteologię.

Łatwo więc ulec pokusie uznania, że to właśnie neuronauka jest dyscypliną, która rozstrzygnęła już (lub robi to niebawem) ważne problemy kondycji ludzkiej. Popularyzatorzy nauki, dziennikarze, a nawet sami uczeni często zapominają jednak, że czym innym są dane uzyskiwane za pomocą skomplikowanej i niezwykle kosztownej aparatury, a czym innym teoretyczne interpretacje tych danych.

## Warsztat podglądacza

Neuronaukowcy dysponują współcześnie wieloma – dobrze wypróbowanymi oraz stosunkowo nowymi – metodami badawczymi. Do tej pierwszej grupy należą m.in. badania wpływu uszkodzeń mózgu (lezji) na zachowanie oraz rejestrowanie aktywności elektrycznej pojedynczych neuronów. Drugą grupę stanowią natomiast metody obrazowania aktywności całego mózgu lub wybranych jego struktur za pomocą technik bazujących na rezonansie magnetycznym (MR).

Choć całkiem niedawno neuroanatomia wzbogaciła się o zaawansowaną technikę wizualizacji struktury mózgu, opartą na śledzeniu dyfuzji cząsteczek wody (DTI), największą uwagę przykuwa funkcjonalne obrazowanie rezonansem magnetycznym (fMRI). Główna zaleta tej upowszechnionej w latach 90. XX wieku metody wiąże się z możliwością „podglądania”, jak aktywność mózgu zmienia się w czasie wykonywania rozmaitych zadań. Co kilka sekund (w praktyce około trzech) generowany jest nowy obraz, co pozwala „przyłapać mózg na gorącym uczynku”, gdy mierzy się on z zadaniami postawionymi przez badacza. Bódcze wyświetlane są za zwyczaj w specjalnych okularach lub odtwarzane za pomocą słuchawek, zaś badana osoba udziela odpowiedzi poprzez naciśnięcie odpowiedniego przycisku.

Sama aktywność mózgu mierzona jest pośrednio. Bezpośrednio pomiarowi podlega tzw. sygnał zależny od poziomu utlenowania krwi (używa się skrótów BOLD, od *blood-oxygen-level-dependent*). Pomiar jest możliwy, gdyż utlenowana hemoglobina

reaguje na silne pole magnetyczne wytwarzane przez aparaturę inaczej niż nieutlenowana. Przestrzeń skanu dzieli się na trójwymiarowe jednostki zwane wokselami (woksel to jakby piksel obdarzony trzecim wymiarem), które nakładane są na anatomiczną mapę mózgu. Zakłada się, że obszary mózgu (a właściwie odpowiadające im woksele), które zaangażowane są w wykonywanie konkretnych zadań, zgłaszają zapotrzebowanie na większą ilość „paliwa” – stąd transportowana powinna być do nich większa ilość tlenu niż do obszarów mózgu, które nie uczestniczyły bezpośrednio w przetwarzaniu danego bodźca lub rozwiązywaniu danego problemu. Naukowcy zakładają więc, że mapa przemian metabolicznych, obserwowanych w poszczególnych wokselach, pokrywa się z mapą szczególnie aktywnych w danej sytuacji struktur mózgowych. Znane z mediów obrazy (kolorowe lub czarno-białe) prezentujące wyniki badań powstają w rezultacie skomplikowanych procedur matematycznych.

## Stare problemy

W teorii wszystko wygląda świetnie. Baczniejsze przyjrzenie się eksperymentom pokazuje jednak, że rzeczy są znacznie bardziej skomplikowane, niż wydają się na pierwszy rzut oka. Poucza o tym także historia nauki. Na przełomie XVIII i XIX wieku ogromną karierę zrobiła frenologia, spopularyzowana przez austriackiego psychologa i neurologa Franza Josepha Galla. Uczony ten przekonany był, że poszczególne obszary kory mózgowej odpowiedzialne są za konkretne aspekty psychiki ludzkiej i cechy zachowania jednostki. Założenie to samo w sobie nie jest kontrowersyjne – wiemy bowiem współcześnie, że np. inne struktury mózgu odpowiedzialne są za emocje (np. kora wyspy), a inne za przetwarzanie informacji wzrokowych (np. obszar V4 w korze potylicznej odpowiada za widzenie barwne). Swego rodzaju potwierdzeniem idei frenologii było zlokalizowanie ośrodków Broki i Wernickego, odpowiedzialnych odpowiednio za generowanie i rozumie-

nie mowy. Gall poszedł jednak znacznie dalej. Twierdził bowiem nie tylko, że funkcje psychiczne ściśle łączą się z organami mózgu („wykazał” aż 27 takich powiązań), ale że natężenie cech psychicznych łączy się z wielkością tych organów. Przypominał tu innego słynnego uczonego tych czasów, antropologa i kryminologa Cesarego Lombroso, który w kształcie czaszki upatrywał przyczyn skłonności przestępczych. Wątpliwość budzić mogą same stosowane przez Galla „metody badawcze”. Co prawda, gdy ogłosił on, że ze względu na rozmiar płatów czołowych mózgu ludzkie zdolności poznawcze są znacznie lepiej rozwinięte niż u innych zwierząt, to opierał się na anatomii porównawczej, jednak gdy połączył wielkość oczu ze świetnymi zdolnościami pamięciowymi, wystarczającym „dowodem” stała się obserwacja jednego „okazu” – własnego kolegi. Co ciekawe, frenologia wyszła poza mury uniwersytetów i przeistoczyła się w swego rodzaju ruch społeczny. Oceny tego zjawiska dokonywane przez historyków nauki nie są jednoznaczne – jedni we frenologii widzą szkodliwą szarlatanerię, zaś inni burzliwe początki współczesnych nauk o mózgu.

Da się zaobserwować spore podobieństwo pomiędzy frenologią Galla a niektórymi interpretacjami współczesnych danych, uzyskiwanych choćby za pomocą fMRI. Niektórzy twierdzą nawet złośliwie, że mamy do czynienia z powrotem do frenologii, czy też z neofrenologią. Wśród naukowców nie brakuje wciąż zwolenników rozpowszechnionego w latach 80. ubiegłego stulecia, a nawiązującego do pomysłu Galla poglądu, że organizacja mózgu ma charakter modułarny. Zgodnie z tą ideą konkretne moduły – obszary zarówno kory mózgowej, jak i starsze ewolucyjnie struktury podkorowe – odpowiadają za nasze zachowania, zdolności poznawcze, emocje i treści umysłu. Zwolennicy tego poglądu twierdzą, że fMRI pozwala nam uzyskać „obrazy umysłu”, które rozumiane są całkiem dosłownie. Czy znajdujemy się więc na dobrej drodze, aby dowiedzieć się wszystkiego o mózgowym podłożu życia naszych umysłów?

Wiele pozwala sądzić, że odpowiedź jest twierdząca. Warto zachować jednak dozę zdrowego rozsądku i sceptycyzmu.

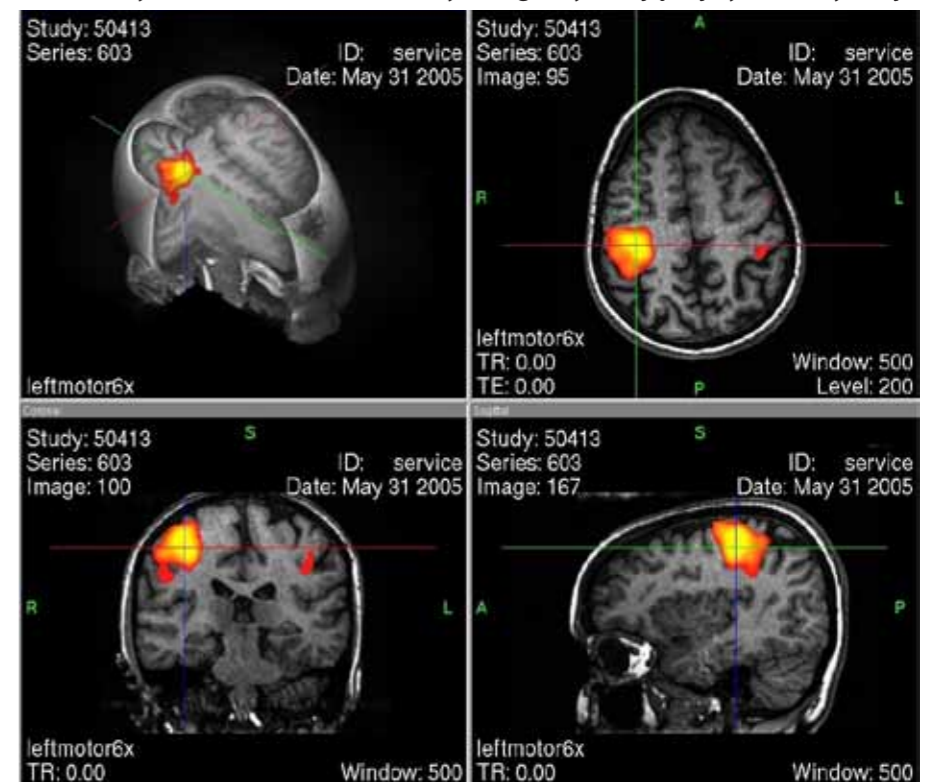
## Czy przez dziurkę od klucza widać wszystko?

Jedną z zadziwiających cech mózgu jest jego plastyczność. Przejawia się ona m.in. w tym, że funkcje uszkodzonych struktur przejmowane mogą być przez zdrowe – dzięki temu możliwa jest choćby rehabilitacja osób, których mózgi uległy uszkodzeniu (neuronauka porzuciła spotykany jeszcze niekiedy w szkołach mit, jakoby mózgi osób dorosłych nie były podatne na żadne zmiany). Oczywiście plastyczność ta ma swoje granice, jednak z pewnością trzeba zapomnieć o możliwości przyporządkowania jeden-do-jeden danej funkcji do określonej struktury mózgowej. Co więcej, jedno z najważniejszych odkryć neuronauki ostatnich lat dotyczy tzw. neuronów lustrzanych. Badacze z Parmy odkryli, że te same neurony kory motorycznej mózgu aktywowane są zarówno wtedy, gdy makak sam chwyt przedmiot, jak i wtedy, gdy tylko obserwuje analogiczną czynność wykonywaną przez

inną małpę (np. naukowca). Okazuje się więc, że pewne komórki, czy też ich zespoły, mogą kodować informacje dotyczące pozornie tak odległych sfer aktywności jak widzenie (percepcja) i chwytanie czegoś (działanie). Nie istnieje więc mózgowy „moduł chwytania” odseparowany od „modułu widzenia”.

Jeśli chodzi o samo obrazowanie mózgu za pomocą funkcjonalnego rezonansu magnetycznego, problemy sprawia pośredni charakter tej techniki. Jak pamiętamy, faktycznie mierzona jest nie tyle aktywność mózgu, co skorelowane z nią przemiany metaboliczne – sygnał BOLD. Z badań aktywności pojedynczych neuronów, gdzie pomiar dokonywany jest za pomocą mikroelektrod wprowadzanych bezpośrednio do tkanki, wiadomo, że nie wszystko, co dzieje się w naszych mózgach, odciska swe piętno w postaci sygnału rejestrowanego przez aparaturę rezonansu magnetycznego. Pewne eksperymenty pokazują, że sygnał BOLD, informujący o zmianach poziomu krwi niosącej tlen, wcale nie musi się ściśle wiązać z aktywnością komórek nerwowych. Oczywiście, wiedza ta nie podważa całkowicie fundamentalnego założenia

Skany fMRI. Zaznaczone obszary mózgu wykazują najwyższe aktywacje



nia, na którym opiera się najpopularniejsza i prawdopodobnie najlepsza technika obrazowania aktywności mózgu, jaką obecnie dysponujemy, ale pokazuje, że nie mówi nam ona wszystkiego. Problemem jest ponadto rozdzielczość aparatury. W odstępach czasowych, gdy uzyskiwane są kolejne obrazy, w mózgu dzieje się bardzo dużo.

Jeszcze innym przykładem „problemów z fMRI” jest przyznanie w 2012 r. Craigowi Bennettowi, Abigail Baird, Michaelowi Millerowi i George’owi Wolforowi nagrody Ig Nobla (potocznie nazywanej „antynoblem”). Wykorzystując aparaturę MR oraz statystykę, zauważyli oni „mózgowy sygnał”... martwego łososia atlantyckiego. Przykład ten pokazuje, że ograniczenia techniczne to nie wszystko. Na domiar złego, niektórzy uczeni swobodnie podchodzą do standardów badawczych.

Niekiedy trudno również wnioskować, czy uczestnik eksperymentu, rozwiązujący jakiś problem leżący w klaustrofobicznych warunkach, w głośnej i niewygodnej maszynie, nierzadko nawet przez godzinę, w normalnych życiowych warunkach zachowałby się tak samo. Np. w badaniach dylematów moralnych może paść pytanie – skądinąd bardzo życiowe – o to, czy uczestnik ściągałby na egzaminie, wiedząc, że gdyby spostrzegł to profesor,

mógłby zastosować zbiorowe kary. Czy badany w prawdziwym życiu postąpiłby dokładnie tak, jak odpowiedział w eksperymencie?

Oczywiście, każdy eksperyment naukowy wiąże się z uproszczeniami. Jest wręcz tak, że nowożytna nauka narodziła się, gdy zamiast poszukiwania ostatecznej natury doceniono wartość idealizacji. Jednak w przypadku badania zachowań w sytuacjach społecznych i moralnych, które interesują neuronaukowców i ekscytują popularyzatorów, uproszczenia te mogą być szczególnie trudne do zaakceptowania. Sceptyk mógłby powiedzieć, że warunki panujące w fMRI i wiedza, że uczestniczy się w sztucznej, zaranżowanej przez zespół badawczy sytuacji eksperymentalnej, nie może prowadzić do rzetelnej wiedzy. To zdecydowanie zbyt radykalny sceptycyzm, jednak życie bogate jest w niuanse, których nie da się włączyć w plan eksperymentalny.

### Neuronauka – to skomplikowane

Neuronauka może się chlubić ogromnymi sukcesami, ale zdrowy sceptycyzm, powstrzymujący wyciąganie zbyt pochopnych wniosków, bez wątplenia jej nie zaszkodzi. Podobnie jak nie ma w świecie dwóch identycznych odcisków palców, nie ma również

dwóch takich samych mózgów. Tak samo jak gołym okiem widzimy różnice w wyglądzie ludzi, tak nawet laik zauważy, że obrazy dwóch różnych mózgów silnie się od siebie różnią. Mózg nie jest ponadto ściśle zaprogramowanym komputerem – a przynajmniej jest nie tylko nim. Skomplikowana maszyna neuronalna sterowana jest licznymi substancjami chemicznymi, zwanymi neurotransmiterami. Modułują one połączenia międzyneuronalne, a te z kolei wpływają na nasze nastroje i zachowania – także te społeczne.

Maszyna, która czyni nas tym, kim jesteśmy, jest naprawdę skomplikowana i subtelna. Podróż w głąb mózgu to fascynująca przygoda i naprawdę warto się w nią udać.

Prócz książek i artykułów nie zaszkodzi zabrać w nią jednak także zdrowego rozsądku.

Dr **MATEUSZ HOHOL** jest kognitywistą, adiunktem w Centrum Kopernika Badań Interdyscyplinarnych Uniwersytetu Jagiellońskiego. Jego badania dotyczą poznania matematycznego.

Artykuł pochodzi z dodatku do „Tygodnika Powszechnego” Wielkie Pytania: Granice nauki”, TP 40/2014. W dodatku skupiamy się na możliwościach i ograniczeniach metody naukowej. Ks. Michał Heller pisze o idei Wielkich Pytań, Łukasz Lamża o granicach wszechświata, Bartosz Brożek o koncepcji podwójnej prawdy, rozmawiamy z psychologiem Piotrem Winkielmanem o ucieleśnionym umyśle. W środku także infografika – wielkie i mniejsze pytania w historii nauki.

Cały dodatek jest dostępny online i do pobrania pod adresem: [www.wielkiepytania.pl/WP01.pdf](http://www.wielkiepytania.pl/WP01.pdf)



Aparatura do obrazowania metodą rezonansu magnetycznego



## Narzędzia, spółka zoo

**SZYMON DROBNIAK**

### Uznajemy je za atrybuty człowieczeństwa i dowody wyraźnej przewagi ludzkiej inteligencji nad jej przejawami u zwierząt. Czy słusznie?

Choć nie grozi nam spotkanie słońca wbijającego młotkiem gwoździe albo czapli powalającej piłą łańcuchową drzewa, to jednak zwierzęta mogą zaskoczyć nas swoją pomysłowością i szerokim wachlarzem sposobów na dopięcie swego, zahaczających o to, co moglibyśmy nazwać „wykorzystaniem narzędzi”.

Czym właściwie są narzędzia? Intuicyjnie rozumiemy przez nie przedmioty takie jak młotek, piła czy strzykawka – każde to samodzielny obiekt, stworzony z materiałów w taki sposób, by nadać mu nową, jasno określoną funkcję. Kluczem jest tutaj celowe przekształcenie naturalnie występujących obiektów i materiałów. Przecież drewno i rudy żelaza nie powstały po to, by pomóc nam wbijać gwoździe. Podobnie węglowodory aromatyczne i organiczne związki azotowe nie istnieją dlatego, że da się z nich uformować strzykawkę.

W przypadku zwierząt problem jest znacznie bardziej złożony: skrzydlatego czy kudłatego zwierzęcia nie zapytamy, czy danego obiektu używa on z premedytacją w innym niż „typowy” celu. Czasami tego typu ocena jest bardzo trudna.

#### Uwaga na dzięcioły

Rozważmy taki przykład: od wielu lat biorę udział w badaniach ptaków dziuplaków na Gotlandii. To prawdziwy ptasi raj na samym środku południowego Bałtyku. Od lat 80. XX w. Uniwersytet w Uppsali utrzymuje tam dużą populację sikor i muchołówek, gnieźdzących się w drewnianych budkach, których zachowania i biologię przybywają badać naukowcy z całego świata. Gotlandia ma wielką przewagę

nad innymi siedliskami dziuplaków na kontynencie europejskim: tamtejsze ptaki właściwie nie mają naturalnych wrogów – zdiczałych i udomowionych kotów, kun, łasic i innych ssaków drapieżnych, dziesiątkujących leśne populacje dziuplaków choćby w Polsce. Ale jest jeden naturalny przeciwnik, dość nietypowy: dzięcioł duży. Dzięcioły to także drapieżniki, z reguły jednak żywią się owadami oraz ich larwami wydobywanymi spod kory drzew. Nie gardzą także innymi źródłami zwierzęcego pokarmu, a bezbronne pisklęta ptaków to łup niemalże idealny: nie uciekają, są łatwe do znalezienia i najczęściej łatwe do zdobycia, w końcu niewielka sikorka czy muchołówka nie ma wielkich szans z dzięciołem. Gotlandzkie dzięcioły wypracowały bardzo ciekawy sposób zdobywania swoich pisklacznych przekąsek: podlatują do drewnianej budki lekkiej i siadają na jej przedniej ścianie, umieszczając dziób tuż przed otworem budki. Gniazdo najczęściej znajduje się na samym dnie budki, zabezpie-

czonej dodatkowo przez ornitologów deszczką, przybitą wokół otworu wlotowego, dlatego sięgnięcie przez dziurę do samego gniazda jest niemal niemożliwe. Dzięcioł wykorzystuje jednak zachowanie piskląt, które słysząc ruch i drapanie pazurków na zewnątrz budki, spodziewają się pojawienia się rodziców z pokarmem. Zaczynają więc podskakiwać, by znaleźć się jak najbliżej wylotu budki i wygrać rywalizację z rodzeństwem o kęs pokarmu. Dzięcioł tylko na to czeka i bez problemu wyławia przez dziurę podekscytowane i niepodejrzewające niczego pisklęta. Czy takie zachowanie dzięcioła to już „użycie narzędzia”?

Oczywiste jest, że dzięcioł wykorzystuje tutaj samą formę i materiał budki – nie udało nam się jak dotąd zaobserwować podobnej taktyki w naturalnych dziuplach, wydrążonych w pniu drzewa. W dodatku nie jest to żadna „automatyczna” zdolność posiadana przez wszystkie dzięcioły – do tej pory widziałem takie zachowanie tylko na Gotlandii, gdzie liczba zawieszonych na drzewach budek musiała stworzyć odpowiednie warunki do nauczania się tego typu techniki. Jest to więc umiejętność związana z konkretną populacją (lub populacjami) tego gatunku.

#### Ptasie spiżarnie

Przyjrzyjmy się innemu interesującemu przykładowi. Dzierżba gąsiorka to niewielki ptak drapieżny, który żywi się dużymi owadami, niewiel-

Dzięcioł duży



kimi gryzoniami, jaszczurkami i pisklętami innych gatunków. Dzierzba chwyta każdego dnia sporo ofiar, lecz nie zjada ich wszystkich od razu. Zamiast tego wykorzystuje kolce głogu czy tarniny do urządzenia sobie malej, prywatnej spiżarni, w której nabija na ciernie złowione zdobycze. Czeka ją one tam, czasami nawet kilka dni, na spożycie. Czy takie użycie roślinnych cierni może być już zaklasyfikowane jako „używanie narzędzia”? Czy młode dzierzby od początku swojego życia wiedzą, jak mają postępować ze swoimi zdobyczami – czy też muszą zdobyć tego typu umiejętności, ucząc się ich od starszych i bardziej doświadczonych ptaków? Takie pytania wydają się na pierwszy rzut oka trywialne – jakby sam fakt wykorzystania roślin w tak przebiegły sposób nie był dość fascynujący w przypadku zwierząt. Są to jednak pytania kluczowe, bo w ich bezpośredniej konsekwencji natrafimy na poważniejsze kwestie, takie jak pochodzenie złożonych narzędzi i technologii.

Tak trudno precyzyjnie ocenić, kiedy zwierzęta używają narzędzi, również dlatego, że istnieje wiele ich definicji. Według niektórych badaczy narzędzie to po prostu „obiekt zachowywany lub przenoszony w celu użycia go w przyszłości”. Inni opisują je jako „obiekt inny niż części ciała zwierzęcia, używany jako »przedłużenie« go w wykonywaniu czynności”, albo też „obiekt zmodyfikowany do spełniania jakiejś roli, przez który zwierzę wywiera wpływ na środowisko i który służy zwierzęciu w osiągnięciu jego celu”. Najpopularniejsza definicja zaproponowana przez Benjamina Becka określa użycie narzędzia jako „wykorzystanie zewnętrznego, nieprzyczepionego do niczego obiektu do lepszego manipulowania środowiskiem, innym obiektem, osobnikiem, lub po prostu do wpływania na samego użytkownika narzędzia; użytkownik narzędzia jest w całości odpowiedzialny za poprawne ustawienie i orientację narzędzia”.

Skomplikowane, prawda? A to nie koniec – nawet jeśli wydaje się, że te warunki są spełnione, dochodzi cała masa bardziej wyrafinowanych detali związanych z psychologią użycia dane-

go obiektu. Czy narzędziem jest coś, czego użycie powstaje metodą prób i błędów? Prymatologia zna wielu przykładów użycia nowych, nieznanych obiektów w określonym celu właśnie dzięki metodzie prób i błędów. Orangutany potrafią się w ten sposób nauczyć używać grabi – i gdy już to osiągną, skrzętnie wykorzystują taką umiejętność do zdobywania pokarmu, a nawet przekazują ją innym osobnikom w grupie. Jedno jest pewne: do podstawowych czynników decydujących o szczególnie sprawnym przyswajaniu wiedzy o używaniu nowych narzędzi należy wielkość mózgu. W obrębie tej samej grupy zwierząt – np. wśród naczelnych czy ptaków – gatunki o większym mózgu znacznie łatwiej i częściej wykorzystują przedmioty w sposób, który nazwalibyśmy „użyciem narzędzi”.

### Młoty i kowadła

Najstojniejszym przykładem są oczywiście narzędzia szympansov, odkryte i pokazane światu przez ich niestrudzoną badaczkę, Jane Goodall. Zaobserwowała ona, że małpy te potrafią wykorzystywać cienkie patyczki (wcześniej „wyprodukowane” – zerwane i oczyszczone z liści) do „łowienia” termitów przez dziurki w ich kopcach. Od tego czasu poznaliśmy znacznie więcej składników „skrzynki narzę-

### Bonobo używający patyka jako narzędzia



dziowej” szympansov. Potrafią one również używać kamiennych „młotów” i „kowadeł” do rozłupywania orzechów, grubych konarów do kopania w poszukiwaniu podziemnych uli czy bulw roślin, zwitków liści jako gąbki do przenoszenia wody zgromadzonej w zagłębieniach drzew oraz zaostzonych dzid do polowania na drobne, skryte w dziuplach ssaki.

Szympansy nie są zresztą wyjątkowe: większość małp posiada takie zdolności. Kapucynki także używają kamieni do rozłupywania orzechów. Orangutany potrafią wykorzystywać zwitki liści do zmiany wysokości swoich okrzyków godowych, a goryle nauczyły się używać kawałków patyków do badania głębokości przekraczanych rzek i strumyków. Inne obdarzone dobrze rozwiniętym mózgiem ssaki również korzystają z wyrafinowanych narzędzi. Delfiny z Zatoki Rekinów w zachodniej Australii nakładają sobie na wydłużone pyszczki osłonki z morskich gąbek, by chronić się przez otarciami

w czasie buszowania po dnie. Z kolei delfiny z przybrzeżnych wód Florydy wzbijają z dna oceanu kłęby mułu, z mętnej wody tworząc kolistą pułapkę. Zmusza to ryby do wyskakiwania z niej prosto w paszczę czekających na nie waleni.

Z całą pewnością nie możemy wszystkich tych przypadków przypisać metodzie prób i błędów – są one

zbyt skomplikowane, by taka metoda pozwalała dojść do określonego zastosowania narzędzia w odpowiednim krótkim czasie. Wszystkie te gatunki najprawdopodobniej wykorzystują w swojej metodzie uczenia się tzw. wgląd (ang. *insight*), czyli umiejętność przewidywania właściwości otaczającego je świata oraz konsekwencji swoich działań. W niektórych sytuacjach są to działania naśladowane wcześniejsze doświadczenia zwierząt. Naukowcy sądzą np., że zastawiające swoje mułowe pułapki delfiny widziały wcześniej zachowanie się ryb napotykalających skłębiony osad z dna morza. Czym innym jednak jest samo zaobserwowanie zjawiska, a czym innym jego generalizacja i przełożenie na określone, abstrakcyjne zachowanie, przybliżające zwierzę do jego celu. Nie wiemy, czy zwierzęta są w stanie – tak jak ludzie – tworzyć w swoich umysłach całkowicie oderwane od rzeczywistości „mapy świata”, za pomocą których – znając fizyczne właściwości różnych obiektów – „planują” ich przyszłe wykorzystanie. Według niektórych interpretacji zwierzęta nie tyle wyobrażają sobie mniej lub bardziej abstrakcyjne właściwości obiektów (jak ich sztywność, fakturę czy ciężar), co po prostu używają bezpośrednich, łatwych do zaobserwowania cech, takich jak wielkość, kolor i kształt. Istnieją natomiast dowody na to, że niektóre gatunki przechodzą na ten bardziej zaawansowany poziom.

Wspomniane kapucynki kierują się głównie fizycznymi cechami kamieni (wielkością), wybierając najodpowiedniejsze młotki do swoich kowadeł. Kiedy jednak podrzuci się im spreparowane kamienie wyglądające identycznie, ale różniące się gęstością (czyli również ciężarem), są one w stanie dość szybko zmienić „sposób myślenia” z psychologicznego na bardziej fizyczny. Zamiast kierować się wyłącznie rozmiarem kamieni, dobierają je także pod kątem ciężaru.

### Od narzędzi do technologii

Nawet jeśli zwierzęta nie tworzą w swoich głowach kompletnych map

właściwości swojego otoczenia, to efekty, jakie osiągają, są niebywałe. Poza naczelnymi w używaniu narzędzi przodują ptaki, zwłaszcza krukowate. Szczególną sławą cieszą się kruki z Nowej Kaledonii, które używają wręcz metanarzędzi – jedne narzędzia służą im do zdobycia innych, bardziej zaawansowanych. Kruki te nauczyły się np. wykorzystywać patyki do wyciągania drewnożernych larw z dziur w pniach drzew. Nie tylko jednak tworzą właściwe narzędzia, ale także modyfikują je, zakrzywiając ich końce, oraz – jeśli nie mogą znaleźć odpowiedniego narzędzia – tworzą narzędzie pośrednie (mniejszy, elastyczny patyk), za pomocą którego sięgają po sztywniejsze, zakrzywione i ostre patyki. Niektórzy naukowcy ryzykują nawet stwierdzenie, że mamy tutaj do czynienia z prototechnologią.

Świat zwierzęcych narzędzi jest niezwykle bogaty – ciągle jednak niewiele wiemy o czynnikach, jakie wspierają ich ewolucję. Narzędzia są kosztowne, wymagają czasu i zasobów – które można by inaczej spożytkować (np. na poszukiwanie pokarmu). Środowisko życia musi jakoś wspierać ich ewolucję, czyli znacznie zwiększać sukces osobników korzystających z narzędzi. Okazuje się na przykład, że kapucynki używają swoich kamiennych młotków i kowadeł do zdobywania wysokotłuszczowego pokarmu (orzechów) tylko w środowiskach ubogich w inne źródła pożywienia. Podobnie ptaki używające gałązek i kolców do „łowienia” swoich ofiar w otworach roślin wykazują takie uzdolnienia wyłącznie w siedliskach suchych i surowych, gdzie dostęp do łatwiejszych w łapaniu ofiar jest ograniczony. Są to bardzo ważne obserwacje, bo wskazują, jak precyzyjnie dostrojone musiałyby być warunki środowiska, które umożliwiły i promowały rozwój ludzkich narzędzi w naszej ewolucyjnej historii. Choć wiele musimy tutaj przypisać naszym rozwiniętym mózgom oraz społecznemu przekazywaniu wiedzy – to środowisko było jednym z bardziej istotnych graczy w tym ciągle dość tajemniczym procesie.

Przed naukowcami stoi jeszcze wiele pytań dotyczących ewolucji i bio-

logii zwierzęcych narzędzi. Jak niewiele wiemy, pokazują np. niedawne odkrycia sprytnych ośmiornic, które potrafią używać połówki rozłupanych orzechów kokosowych jako natychmiastowej osłony przed drapieżnikiem oraz swoistego „pojazdu”: skryta w takim kokosie ośmiornica potrafi się szybko „odturlać” z miejsca zagrożenia. Czy to już narzędzie? A może protonarzędzie, surowy materiał dla ewolucyjnych sił, z którego w przyszłości może się wyłonić coś bardziej złożonego, pełnoprawnie określanego właśnie terminem „narzędzie”? Takich zagadek biolodzy behawioralni mają przed sobą mnóstwo. Ich odkrywanie stanowi jedną z najbardziej fascynujących i satysfakcjonujących dziedzin zoologii.

Przybliży nas także do zrozumienia sił, które napędzały rozwój naszej własnej technologii: badając zwierzęta, dowiadujemy się również czegoś o nas samych.

Dr **SZYMON DROBNIAK** jest biologiem ewolucyjnym, pracownikiem Uniwersytetu Jagiellońskiego i Uniwersytetu Nowej Południowej Walii w Sydney.

Artykuł pochodzi z dodatku do „Tygodnika Powszechnego” „Wielkie Pytania: Człowiek a zwierzę”, TP 41/2016. W dodatku skupiamy się o zasypywaniu metafizycznej przepaści między ludźmi i zwierzętami. Joanna Bagniewska pisze o sposobach leczenia się zwierząt, Michał Kuźmiński o ewolucji ludzkiej diety, Krzysztof Cipora o zmyśle liczby u ssaków, ptaków, a nawet ryb i owadów, Bartek Kucharzyk o zmianach paradygmatów w etologii i psychologii.

Cały dodatek jest dostępny online i do pobrania pod adresem: [www.wielkiepytania.pl/WP02.pdf](http://www.wielkiepytania.pl/WP02.pdf)



# Piękne oblicze chaosu

SEBASTIAN SZYBKĄ

**Czy z chaosu może wyłonić się porządek? Teoria chaosu udziela odpowiedzi na to pytanie – ale tylko tym, którzy nie boją się wejść choć na parę kroków w świat matematyki. Korzyści z tej niewinnej wycieczki są jednak potężne...**

*Matematyka, będąc językiem, może być użyta nie tylko do informowania, ale między innymi, aby uwodzić.*

Benoît Mandelbrot,  
*Fractals: Form, Chance and Dimension*, 1977

Słownik PWN definiuje „chaos” jako stan bezładu, całkowity brak porządku. W publikacjach naukowych słowo to ma obecnie inne znaczenie. Co prawda ciągle kojarzy się ono z bałaganem i brakiem przewidywalności, lecz w tle zawsze pojawia się struktura nadrzędna – to, co jest nieuporządkowane z bliska, oglądane z szerszej perspektywy staje się uporządkowane i piękne.

Tak rozumiany chaos można scharakteryzować za pomocą dwóch określeń: jest on nieprzewidywalny, a zarazem deterministyczny. Te dwa przymiotniki zdają się sobie przeczyć. To między innymi dlatego ta arcydzieła i fundamentalna cecha świata przez setki lat pozostawała niezauważona.

Czym jest więc chaos deterministyczny i czym ten cudownie uporządkowany uwodzicielski bałagan różni się od prawdziwego bezładu? Aby to zrozumieć, posłużmy się przykładem.

## Prosty przepis na wielki bałagan

Wyobraźmy sobie biegacza, który przygotowuje się do zawodów. Każdego wieczoru upublicznia on informację o dystansie pokonanym danego dnia, ale plan jego przyszłych treningów ukryty jest tajemnicą. Czy zna-

jomość dotychczasowych zwyczajów pozwoli nam odgadnąć jego plany na przyszłość? Liczba kilometrów pokonywanych przez biegacza każdego dnia nie jest większa od, powiedzmy, 18 km i tworzy ciąg liczb, który wydaje się przypadkowy. Może więc plan treningowy jest losowy?

Zaryzykujmy pierwszą, być może naiwną hipotezę: każdego dnia rano sportowiec trzykrotnie rzuca kostką i przebiega tyle kilometrów, ile łącznie wypadnie oczek. Taką zabawę określamy mianem procesu stochastycznego. Analizując dotychczasową aktywność sportowca (np. rozrzut przebywanych odległości i ich wartość średnią), można podjąć próbę weryfikacji naszej hipotezy. Jeśli okaże się ona prawdziwa, to nie można przewidzieć dystansu, jaki przebiegnie biegacz następnego dnia, ale można określić prawdopodobieństwo danego wyniku. Seria rzutów kostką nie jest procesem deterministycznym. Jest to proces losowy. Odległość, którą przebiegnie biegacz jutro, nie zależy od tego, ile przebiegł dzisiaj, ani od historii jego treningów.

Nauka zna wiele przykładów zjawisk, które należy opisywać właśnie w podobny sposób – jako procesy stochastyczne. Procesy takie opierają się na zjawiskach losowych. Ta losowość może mieć charakter fundamentalny, który nie wynika z niekompletności modelu czy też teorii (np. rozpad promieniotwórczy opisywany w ramach mechaniki kwantowej), lub być wynikiem złożoności i niemożności dokładnego opisanie systemu (tak jak rzut kostką). Istnieje cały aparat matematyczny, który umożliwia zrozumienie właściwości procesów sto-

chastycznych, a jednym z pionierów badań tego zagadnienia, obok Alberta Einsteina, był krakowski fizyk Marian Smoluchowski.

Powróćmy jednak do naszego sportowca. Wyobraźmy sobie, że hipoteza o rzutach kostką okazała się fałszywa: pojawiły się pewne przesłanki świadczące o istnieniu prostej reguły. Najprostszy nietrywialny plan mógłby być np. taki: każdego dnia, wraz ze wzrostem formy, biegacz przebiega trochę więcej.

Niech  $d_n$  oznacza dystans pokonywany  $n$ -tego dnia. Załóżmy, że dystans przebywany dnia następnego ( $d_{n+1}$ ) spełnia równanie  $d_{n+1} = r \times d_n$ , gdzie  $r$  jest pewną stałą. Inaczej mówiąc, każdego dnia przemnażamy dystans z poprzedniego dnia przez tę samą liczbę  $r$ . Jeśli liczba ta będzie większa od 1 i jeśli pierwszego dnia biegacz trenował chociaż trochę, to przebiegany przez niego dystans będzie codziennie wzrastał. Znając odległość pokonaną podczas pierwszego treningu ( $d_1$ ), z łatwością można wyznaczyć plan na dowolny dzień, rozwiązując nasze równanie.

Niestety, jest to zbyt prosty schemat, by mógł być dla nas użyteczny. Przebiegany dystans nie powinien rosnać w nieskończoność, a odległości pokonywane każdego dnia powinny sprawiać wrażenie przypadkowych.

Czy w ogóle istnieje prosta reguła, która równocześnie spełniałaby te dwa warunki?

Na początek spróbujmy uwzględnić fakt, że maksymalny przebiegany dystans to 18 km. Po ciężkim treningu należy się odpoczynek, więc do równania dodamy człon, który nam to zapewni. Jedną z najprostszych możliwości ma postać  $d_{n+1} = r \times d_n \times (1 - d_n/18)$  km. Jest to równanie, które może wyglądać na złożone, ale w istocie jest bardzo podobne do poprzedniego i różni się od niego tylko członem w nawiasie – to dzięki niemu dystans czasami może się też zmniejszać. Można wykazać, że jeśli pod  $r$  podstawimy dodatnią liczbę mniejszą lub równą 4, to odległość wskazywana przez nowy wzór nigdy nie przekroczy 18 km.

Tym razem, inaczej niż w przypadku poprzedniego równania, tylko dla kilku wartości  $r$  istnieje ściśle rozwiąza-

nia umożliwiające wyliczenie dystansu przebieganego dowolnego dnia bez obliczania wszystkich wcześniej pokonywanych dystansów. W ogólnym przypadku, żeby wyliczyć, ile kilometrów pokona biegacz, powiedzmy, setnego dnia, należy pracować po kolei wyznaczać, jedna po drugiej, wszystkie odległości pokonane przez niego w ciągu poprzednich 99 dni.

Możemy wypróbować nowy wzór, sprawdzając, jak plan treningów na najbliższy rok zależy od wyboru stałej  $r$ . Zakładamy, że biegacz pierwszego dnia przebiegł 5 km (czyli  $d_1 = 5$  km). Wykres będzie bardziej przejrzysty, jeśli przedstawimy tylko dwa ostatnie tygodnie pierwszego roku treningów.

Na przykład obliczenia pokazują, że dla  $r = 2$  po pierwszym tygodniu zmiennego treningu biegacz powinien przebiegać codziennie 9 km. Jeśli  $r = 3,2$ , to po 10 dniach zmiennego treningu biegacz powinien pokonywać na przemian trochę ponad 14 km i trochę ponad 9 km. Gdy stała  $r$  ma wartość bliską 4, to długości tras wyglądają na przypadkowe. Świadczy o tym nieuporządkowane rozrzucenie punktów z prawej strony wykresu. Przykładowo, dla  $r = 4$ , po zaokrągleniu do pełnych kilometrów, drugiemu i trzeciemu tygodniowi treningów odpowiada ciąg odległości: 16, 8, 18, 1, 2, 8, 18, 1, 3, 9, 18, 0, 0, 0 km.

Nie ma wątpliwości, że wzór, którego używamy, jednoznacznie determinuje ciąg pozornie przypadkowych liczb. W przeciwieństwie do sytuacji, w której o długości treningu decyduje rzut kostką, ten bałagan nie jest losowy, ale deterministyczny. Jest coś niezwykłego w tym, że tak skomplikowana sekwencja liczb została zakodowana w tak prostym wzorze.

To jednak nie koniec niespodzianek. Najciekawsze dopiero przed nami.

## Chaos zwycięża komputery

Wyobraźmy sobie, że za pomocą naszego wzoru potrafimy odtworzyć pierwszy miesiąc treningów.

Obliczenia prowadzimy na kalkulatorze, który wyświetla maksymalnie 10 cyfr. W kolejnych krokach obliczeń zawsze podstawiamy pełny

wynik, ale na kartce dla wygody zapisujemy wynik przybliżony za pomocą liczb całkowitych. Tak otrzymany ciąg liczb porównujemy z informacją podawaną przez biegacza, który tak samo zaokrąglą wyniki (z wyjątkiem pierwszego dnia, kiedy podał wynik bardzo dokładnie). Poprawność miesięcznych przewidywań upewnia nas o słuszności odgadniętego wzoru. Niespodziewanie pierwszego dnia kolejnego miesiąca (32. dzień treningów) biegacz ogłasza, że pokonał dystans 2 km, podczas gdy nasze obliczenia przewidują 3 km. Przez trzy kolejne dni nasze przewidywania są znowu trafne, lecz potem zgodność zostaje całkowicie utracona. Wzór przestał działać. Jak to możliwe?

Zachęcam do samodzielnego sprawdzenia wyniku. Rezultat takiego zbiornego eksperymentu byłby zaskakujący. Początkowo przewidywania nas wszystkich byłyby zgodne i plan treningu na miesiąc, a może nawet trochę dłużej, dałoby się odgadnąć. Po tym czasie obliczenia całkowicie przestałyby się zgadzać. Co dziwniejsze, wyniki zależałyby od modelu użytego kalkulatora lub komputera, a nawet od samego sposobu zapisu wzoru i kolejności wykonywanych operacji. Jeśli biegacz, planując treningi, używał naszego wzoru i korzystał z kalkulatora, to jego plan po pewnym czasie również stanie się niezgodny z „prawdziwym” planem ukrytym w strukturze naszego prostego równania. Jest tak, jak zapowiadałem. Chaos, chociaż deterministyczny, okazał się nieprzewidywalny.

W celu wyjaśnienia tej zagadki rozważmy kolejny matematyczny eksperyment. Jak zmieniłby się plan treningów, gdyby zamiast równych 5 km sportowiec pierwszego dnia przebiegł 5 km i 10 cm? Te 10 cm wydaje się bez znaczenia. To nie jest nawet połowa długości buta. A jednak okazuje się, że nowy plan uwzględniający dodatkowe 10 cm już po dwóch tygodniach będzie się całkowicie różnił od poprzedniego. Nasz wzór, który generuje chaos, ma ciekawą własność zwaną wrażliwością na warunki początkowe – drobne różnice w obliczeniach bardzo szybko narastają. Właśnie dlatego

obliczenia o skończonej dokładności po stosunkowo małej liczbie kroków będą dawały odmienne wyniki zależne od użytego narzędzia. Pozornie nieistotne, pojawiające się na najdalszych miejscach po przecinku różnice w zaokrągleniu liczb dosyć szybko dają o sobie znać. Bez względu na to, czy korzystamy ze starego kalkulatora, czy z wartego miliarda superkomputera, możliwość przewidywania wcześniej czy później się załamie.

Czy nie ma jednak sposobu, aby pokonać chaos? W odróżnieniu od procesów stochastycznych (na przykład rzutów kostką) krótkoterminowe przewidywania dla układów chaotycznych mogą być bardzo precyzyjne. Jeśli obliczenia będziemy prowadzić ręcznie, wykorzystując kartkę i ołówek (albo programy komputerowe, które potrafią operować ułamkami, nie zamieniając ich na liczby o skończonej dokładności), i jeśli dystans pokonywany pierwszego dnia będzie zadany przez liczbę wymierną (taką, którą da się zapisać w postaci ułamka dwóch liczb całkowitych), to wynik uzyskany w każdym kroku będzie również liczbą wymierną. Będzie to wynik dokładny, bez żadnych przybliżeń. Obliczenia prowadzone w ten sposób możemy kontynuować dowolnie długo, ale nie jest to metoda bardzo efektywna: już w 29. dniu do zapisania wyniku w pełnej postaci trzeba wykorzystać ponad pół miliarda cyfr. Czas potrzebny do ręcznego zapisania takich liczb na papierze (pomijając czas niezbędny na obliczenia) przekracza czas życia pojedynczego człowieka. Nawet dla współczesnych komputerów przeprowadzenie tego typu obliczeń nie jest zadaniem łatwym (mój domowy komputer po osiągnięciu 29. dnia odmówił dalszej współpracy).

Podejmijmy jeszcze jedną próbę pokonania chaosu. Nasz wzór dla  $r=4$  posiada ściśle rozwiązanie, tzn. dystans przebiegnięty dowolnego dnia można wyznaczyć w jednym kroku po prostu na podstawie długości treningu w pierwszym dniu, bez znużonego wyliczania wszystkich odległości. Jest to bardzo niezwykła cecha, bo dla pozostałych wartości  $r$ , dla których pojawia się chaos, ściśle rozwiązanie nie istnieje.

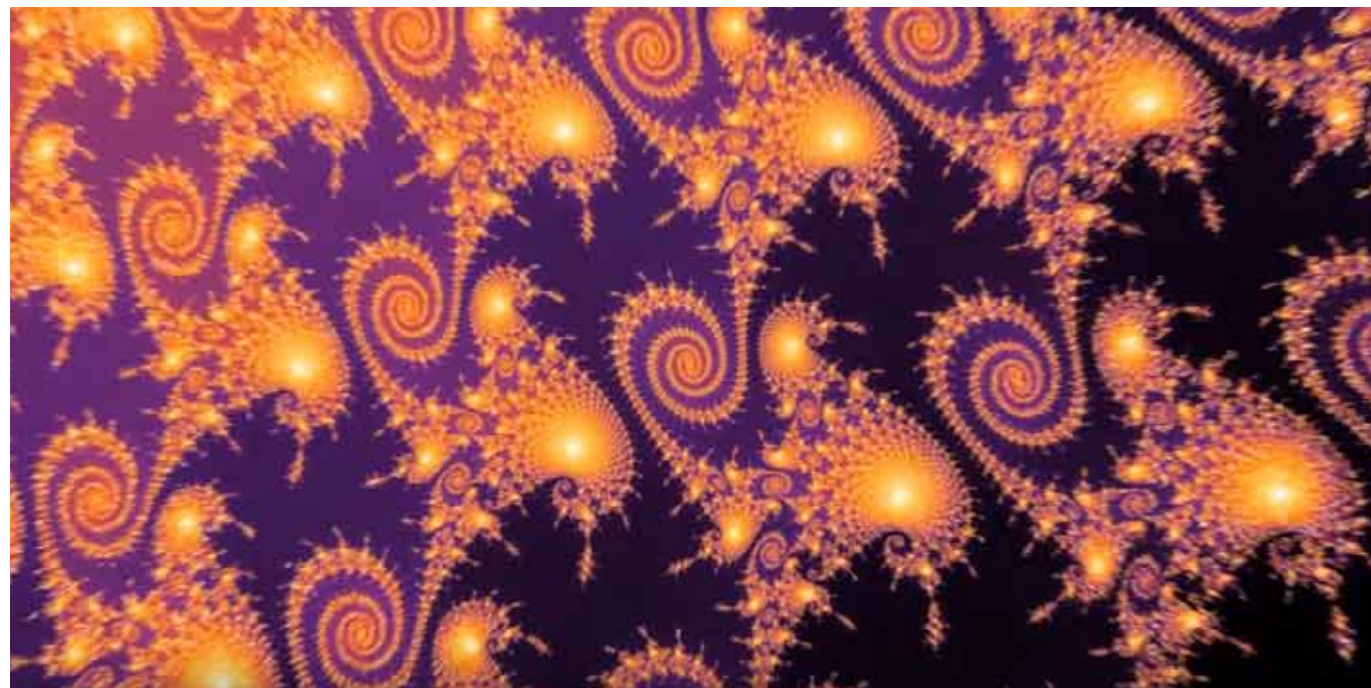
je. Możliwość użycia tego rozwiązania znacznie zwiększa naszą efektywność w wyznaczaniu planu treningów. Dla niektórych wartości  $d_1$  możemy przewidywać plan treningowy na dowolną liczbę lat (takie rozwiązania nie są chaotyczne, lecz periodyczne). Dla pozostałych wartości  $d_1$  w ścisłym rozwiązaniu pojawiają się liczby niewymierne i jeśli chcemy poznać dokładny wynik, to znowu jesteśmy skazani na obliczenia numeryczne (choć tym razem o wiele mniej żmudne), a co za tym idzie: nasze zdolności przewidywania są ograniczone.

Dla fizyka źródło problemu leży jednak gdzie indziej. Liczbę kilometrów przebytych pierwszego dnia znamy na podstawie pomiaru, a dokładność każdego pomiaru jest ograniczona. Jeśli, mierząc ten dystans, pomylimy się nawet o milimetr (to jest naprawdę niewiele przy odległości 5 km), to nasz wzór sprawi, iż ta pomyłka po pewnym czasie całkowicie zmieni plan treningów. Możliwość wyznaczenia wyniku na wiele dni naprzód nic tu nie pomoże, bo nie potrafimy wyeliminować błędu ukrytego w samym pomiarze.

Obiecałem Czytelnikom determinizm bez przewidywalności i dotrzymałem słowa. Obiecałem też ukryty porządek i piękno. Opowiem o nich,

*Wizualizacja fragmentu zbioru Mandelbrota.*

*Po przybliżeniu w wielu obszarach ukazują się kolejne, niezwykle złożone struktury*



umieszczając nasz przykład w szerszym kontekście.

### Piękno i porządek

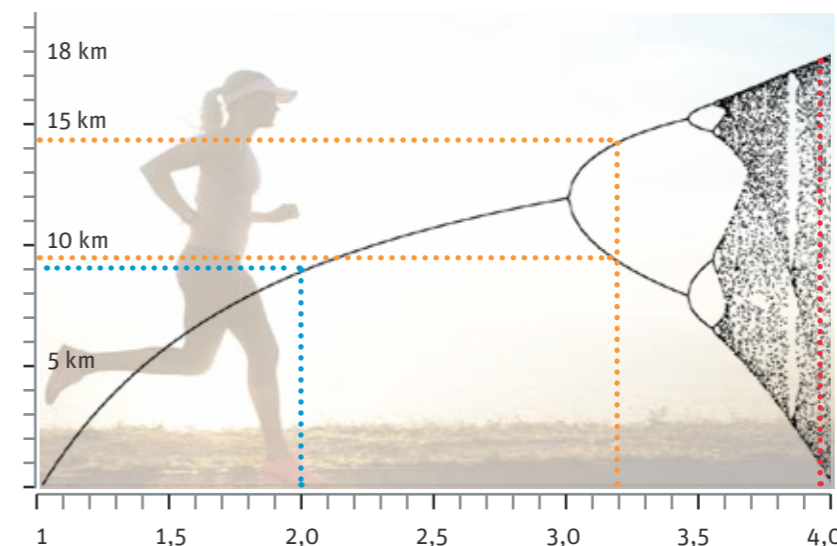
Rozważany przez nas wzór nosi nazwę odwzorowania logistycznego. Jest to jeden z najprostszych przykładów odwzorowań chaotycznych. Wśród pionierów badań tego odwzorowania można wymienić polskiego matematyka ze szkoły lwowskiej, Stanisława Ulama, który w trakcie prac w ramach Projektu Manhattan próbował wykorzystać własności odwzorowania logistycznego do stworzenia generatora liczb losowych dla pierwszego na świecie komputera (ENIAC). Samo równanie w sposób bardzo naturalny pojawia się w biologii w modelach wzrostu populacji. Odwzorowanie logistyczne to szczególnie przypadek tzw. odwzorowań rekurencyjnych, czyli takich, które w wyniku iteracji definiują ciąg liczb. W matematyce istnieje wiele innych typów równań, a chaos może pojawić się praktycznie we wszystkich z nich.

Piękno i porządek zawarte w chaosie najłatwiej uwidocznić, wykorzystując fraktale, czyli struktury geometryczne pojawiające się wszędzie tam, gdzie pojawia się chaos. Skoro mowa o pięknie, to odwołajmy się do sztuki.

Z matematycznego punktu widzenia rzeźbiarze tworzą dwuwymiarowe struktury zanurzone w trójwymiarowej przestrzeni. Malarze wykorzystują dwuwymiarowe powierzchnie, aby za pomocą śladów pędzla (jednowymiarowe krzywe) i plam tworzyć swoje dzieła. Niewielu artystom, wyjątkiem jest na pewno Salvador Dalí i jego „Crucifixion (Corpus Hypercubus)”, udało się wyłamać z tych przestrzennych przyzwyczajęń. Niewątpliwie nasz mózg w toku ewolucji najlepiej przystosował się do podziwiania piękna w dwóch lub trzech wymiarach.

Natura nie zna takich ograniczeń. Być może czytelników nie zachwyci dzieło sztuki, które zawiera w sobie odwzorowanie logistyczne – zanurzone jest ono w jednym wymiarze.

Spójrzmy wobec tego na przykład bardziej zbliżony do naszych malarzkich upodobań. Rozważmy bardzo proste odwzorowanie  $z_{n+1} = z_n^2 + z_0$ , które operuje na tzw. liczbach zespolonych. Nie wdając się w szczegóły: każda liczba zespolona odpowiada punktowi na płaszczyźnie, a samo odwzorowanie wyróżnia pewien zbiór punktów  $C$ , który śmiało można nazwać dziełem sztuki. Zbiór  $C$  został odkryty w 1979 r. przez urodzonego w Warszawie francuskiego



Oś pionowa: długości tras przypadające na dwa ostatnie tygodnie pierwszego roku treningu w zależności od wyboru stałej  $r$ . Oś pozioma: wielkość stałej  $r$ , zakres 1,0 – 4,0.

Dla  $r = 2$  (niebieski) nasz wzór pokazuje, że biegacz przez ostatnie dwa tygodnie pierwszego roku treningów powinien pokonywać codziennie taki sam dystans 9 km (dlatego 14 czarnych punktów odpowiadających dwóm tygodniom treningów nakładają się na siebie).

Dla  $r = 3,2$  (pomarańczowy) nasz wzór przewiduje, że biegacz pokonywać będzie naprzemiennie trochę ponad 9 km i trochę ponad 14 km (14 punktów rozdziela się na dwie grupy, stąd nad  $r = 3,2$  widzimy dwa punkty).

Plan treningów jest naprawdę interesujący, gdy  $r$  jest bliskie 4 (14 punktów rozbiega się w sposób pozornie przypadkowy). Stąd czarne punkty są „rozsypane” chaotycznie po prawej stronie rysunku.

matematyka Benoîta Mandelbrota. Na ilustracji obok widać fragment tego zbioru.

### Chaos wokół nas

Chaos deterministyczny nie jest wyłącznie ciekawostką matematyczną. W opisie układów fizycznych pojawia się on powszechnie. Choć może nie wszyscy zdają sobie z tego sprawę, to spotykamy się z nim na co dzień, np. gdy dolewamy mleka do ciepłej kawy. Nie potrafimy wiarygodnie przewidywać pogody na dłużej niż kilka dni, bo jak zauważył matematyk i meteorolog Edward Lorenz, ruch skrzydeł motyla w Brazylii może wywołać tornado w Teksasie. Chaos pojawia się również w Układzie Słonecznym. Mieszkając na jednym z czterech mniejszych księżyców Plutona, mielibyśmy okazję podziwiać chaotyczne zachody Słońca. Nawet ruch Ziemi i innych planet rozpatrywany w bardzo długiej skali czasu

podlega prawom nieprzewidywalności chaosu.

Parę lat temu wraz z profesorem Tadeuszem Chmajem badaliśmy, w ramach teorii grawitacji Einsteina, możliwość utworzenia miniaturowych czarnych dziur za pomocą specjalnie dobranych fal grawitacyjnych. Odkryliśmy, iż pusta przestrzeń i czas mogą wibrować chaotycznie. Ruch skrzydeł motyla może wywołać tornado, ale może też wpłynąć na proces formowania się czarnych dziur!

Piękno chaosu deterministycznego przejawia się nie tylko w fantastycznej i nieskończenie skomplikowanej strukturze związanych z nim fraktali. Bardzo proste równania, zapisane za pomocą szkolnej matematyki, kryją w sobie bogactwo, które ilustruje głęboką prawdę o otaczającym nas świecie. Prawda ta, będąc w zasięgu ludzkich umysłów, pozostawała niedostrzeżona przez setki lat. Jej odkrycie wniosło do naszego rozumienia deter-

minizmu więcej niż wszystkie dysputy prowadzone na ten temat od czasów Newtona.

Determinizm nie oznacza przewidywalności. Myślę, że Newton, Laplace i inni wielcy minionych wieków byłiby tym faktem zaskoczeni, ale i głęboko oczarowani.

Obliczenia i diagram wykonano w systemie algebry komputerowej Wolfram Mathematica.

Zobacz także:

- Darmowe oprogramowanie umożliwiające wizualizację trójwymiarowych fraktali: [www.mandelbulber.com](http://www.mandelbulber.com)
- Fraktale na usługach sztuki: [vimeo.com/juliusshorsthuis](https://vimeo.com/juliusshorsthuis)

Dr hab. **SEBASTIAN SZYBK** pracuje na Uniwersytecie Jagiellońskim w Zakładzie Astrofizyki Relatywistycznej i Kosmologii (Obserwatorium Astronomiczne). Specjalizuje się w teorii grawitacji Einsteina.

Artykuł pochodzi z dodatku do „Tygodnika Powszechnego” „Wielkie Pytania 3: Porządek i chaos”, TP 48/2016. W dodatku zajmujemy się spontanicznym wyłanianiem się uporządkowanych struktur w przyrodzie. Mateusz Hohol i Kinga Wołoszyn-Hohol piszą o tym, jak dobór naturalny porządkuje świat ożywiony, Łukasz Lamża – o przyroście złożoności we wszechświecie, Michał Eckstein – fizycznych układach chaotycznych, Łukasz Kwiatek – o rozwoju systematyki biologicznej.

Cały dodatek jest dostępny online i do pobrania pod adresem: [www.wielkiepytania.pl/WP03.pdf](http://www.wielkiepytania.pl/WP03.pdf)



# Centrum Kopernika w liczbach

**4,5 mln**

wyświetleń  
filmów na kanale  
Youtube



**23 000**  
subskrybentów  
kanału Youtube

**14 000**

studentów  
Copernicus College



**250** artykułów  
popularnonaukowych



**180**

wykładów  
popularnonaukowych

**16**

dodatków  
do Tygodnika  
Powszechnego



**5**

edycji  
Copernicus  
Festival

**2 300**

udostępnionych  
filmów



**157**

tytułów  
wydanych  
przez CCPress

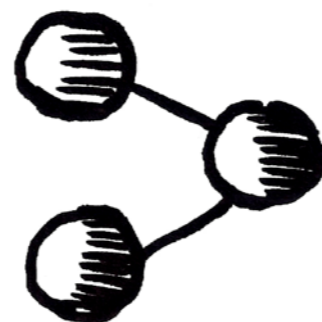
**73 000**

kaw podanych  
w De Revolutionibus



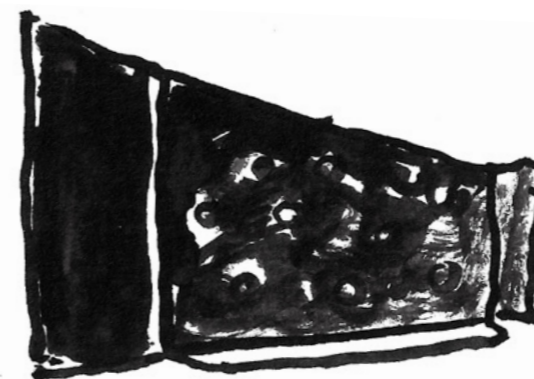
**40 000**

gości  
Copernicus  
Festival



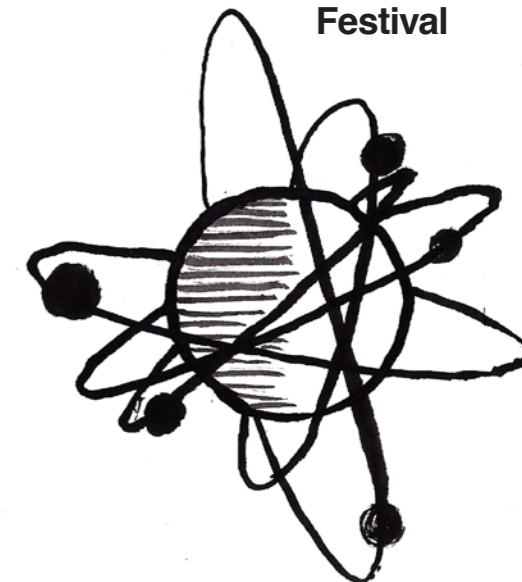
**550**

publikacji  
naukowych



**120**

lekcji  
przeprowadzonych  
w liceach i szkołach  
podstawowych



**30 000**

polubień  
na Facebooku



**270**

wykładów  
na Copernicus  
College



**50**

konferencji  
naukowych



**1**

książka  
Michał Heller



## Więcej niż metafora

MARCIN MIŁKOWSKI

**Choć niektórzy będą się zrywać, nie da się ukryć, że ludzki mózg przypomina komputer. Służy bowiem do przetwarzania informacji.**

Układ nerwowy można badać w różnych celach, nie tylko po to, aby się dowiedzieć, jak przebiegają procesy poznawcze, czy szerzej – psychiczne. Wynajęty przez spiskowców toksykolog może się interesować np., w jaki sposób najszybciej otruć Jamesa Bonda i zatrzymać pracę jego mózgu (inaczej Bond odpali specjalny gadżet, który...). Chociaż knucie spisków, by panować nad światem, jest ciekawsze i zapewne bardziej opłacalne, skupię się tutaj na wyjaśnianiu procesów psychicznych.

Od początku drugiej połowy XX wieku wykorzystuje się w tym celu modele obliczeniowe, czyli stosuje komputerowe symulacje. Typowe uzasadnienie tej praktyki badawczej jest proste: symulacje komputerowe pozwalają trafnie przewidywać i wyjaśniać procesy poznawcze, ponieważ mózg w rzeczywistości jest komputerem. Precyzyjniej należałoby to powiedzieć nieco inaczej: układ nerwowy służy do przetwarzania informacji. Pogląd ten nazywa się komputacjonizmem.

Komputacjonizm cały czas budzi gorące, niemal ideologiczne spory. Wiele z nich odżywa też w kontekście sztucznej inteligencji. Wskazuje się często, że mózg jest układem biologicznym, że nie przypomina typowego komputera z ładowanymi do pamięci programami, że zdrowego rozsądku nie udało się sztucznej inteligencji przechrzyć... Filozoficzni straceńcy – i to nie byle kto, bo np. bardzo znany filozof amerykański John Searle – posuwają się do tezy, że komputery wręcz nie istnieją, bo przecież to, czy coś jest komputerem, jest jedynie kwestią dość swobodnej interpretacji rzeczywistości.

Podobnie twierdził, a nawet dowodził matematycznie Hilary Putnam,

inny wybitny filozof. A sceptyk taki jak Saul Kripke doda: nie można być pewnym, czy komputery naprawdę są komputerami, czyli na pewno wykonują to, co zamierzył programista.

nazywam tych filozofów „straceńcami”, bo przecież na pewno nie traktują poważnie takich poglądów. Searle zapewne nie pisze swoich tekstów, wpatrując się w ścianę w swoim gabinecie – chociaż twierdził, że można ją opisać poprawnie jako komputer wykonujący edytor tekstów WordStar. Kripke przypuszczalnie odrzuca wątpliwości, czy telefon komórkowy na pewno różni się od książki, która źle wykonuje oprogramowanie Android, kiedy próbuje przy jej pomocy zadzwonić. Wbrew pozorom te straceńcze argumenty trudno zbić, ale tutaj, zamiast się z nimi mierzyć, pokrótce zrekonstruuję powody, dla których komputacjonizm pozostaje i pozostanie bezkonkurencyjny w badaniach nad działaniem umysłu.

### Cóż to jest poznanie?

Trudno powiedzieć, na czym polega specyficzny charakter procesów poznawczych – na przykład w odróżnieniu od procesów emocjonalnych czy regulacji temperatury ciała, za które również odpowiada mózg. Można by powiedzieć, że aby poznawać cokolwiek, trzeba myśleć. Myśli zaś muszą mieć jakąś treść. Jednak wtedy docieramy do trudnego pojęcia – treści – którego niektórzy badacze procesów poznawczych kijem nawet ruszać nie chcą. Co robić? Obniżmy wymagania. Jeśli nie chcą oni mówić o treści, to raczej nie zaprzeczają, że procesy poznawcze muszą polegać na odbiorze i przetwarzaniu informacji. Co prawda

pojęcie informacji też jest trudne, ale rodzi mniej kontrowersji wśród kognitywistów czy filozofów umysłu.

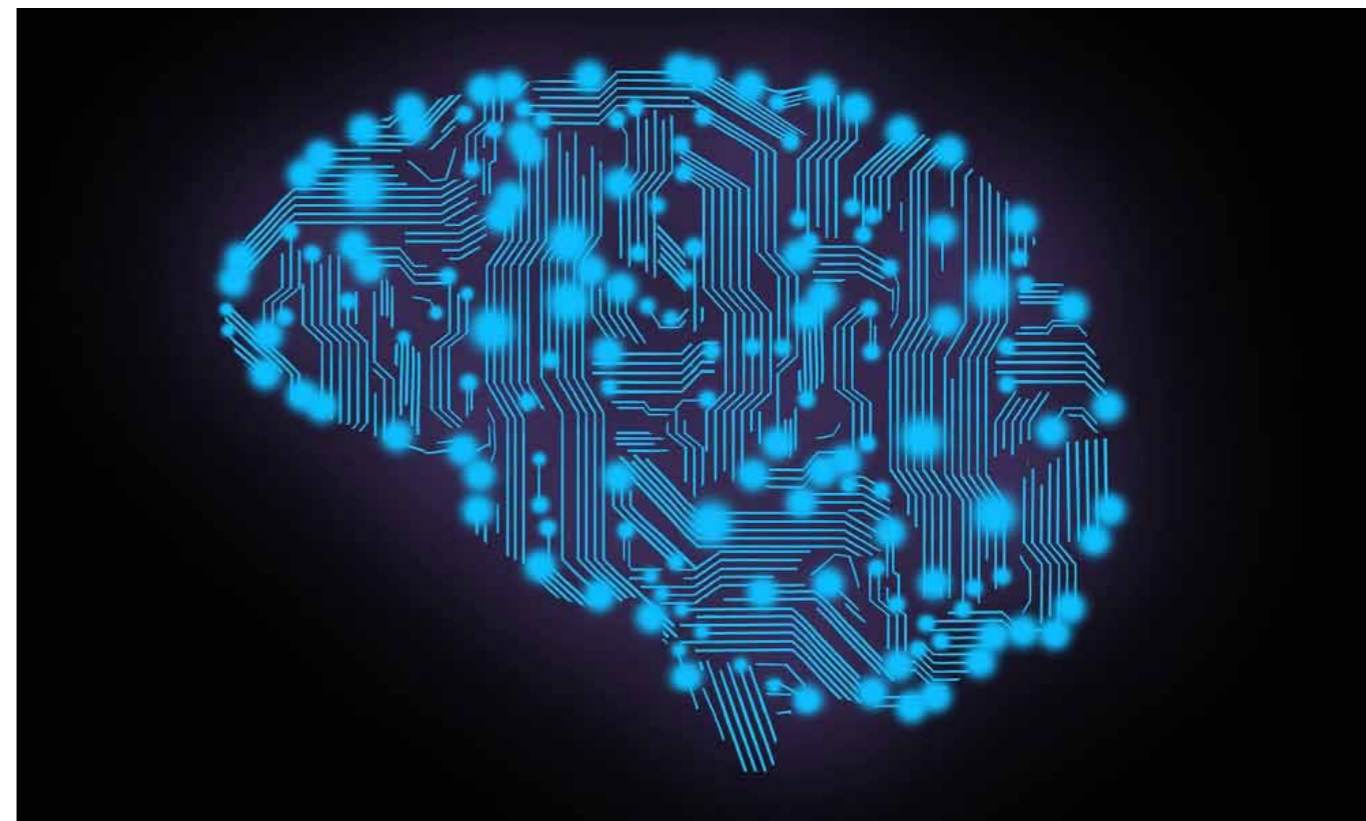
O informacji w najprostszym, strukturalnym sensie można mówić wtedy, kiedy coś, a mianowicie nośnik informacji, może się zmienić – być co najmniej w dwóch stanach. Te zmiany muszą być rejestrowane przez inny układ – tylko wtedy czynią istotną różnicę. Jeśli są rejestrowane (przez jakiegokolwiek odbiorcę), to stany nośnika mogą nieść informacje. To minimalne pojęcie informacji: nie możemy jeszcze powiedzieć, o czym taka informacja jest i czy jest prawdziwa – ale informacje prawdziwe i o czymś są także strukturalne. Informacja strukturalna jest więc najmniejszym wspólnym mianownikiem wszystkich bardziej skomplikowanych ujęć informacji.

Połączmy więc obie kwestie: systemy poznawcze muszą tak oddziaływać ze swym otoczeniem, by odbierać zeń informacje, jeśli mają to otoczenie poznać. Jeśli zaś mają poznać swoje własne stany, to także muszą odebrać informacje, np. o położeniu głowy ze zmysłu równowagi. Te stany zaś nie wywołują od razu zmian w zachowaniu czy we wnioskowaniu: ilekroć patrzę na mój niewygodny fotel, nie mam tych samych wniosków („Pora kupić coś wygodnego!”). Raz myślę, żeby się nie potknąć, a innym razem, gdzie odłożyć na chwilę książkę. Aby coś takiego mogło się dziać, informacje muszą być przetwarzane, a więc w sposób regularny wywoływać zmiany w innych nośnikach informacji. Wtedy można mówić o przetwarzaniu informacji.

### Od maszyny matematycznej do komputera

Pojęcie „komputer” w języku polskim zadomowiło się stosunkowo późno, zaczęto go używać wraz z upowszechnieniem się domowych komputerów w latach 80. XX wieku. Wcześniej mówiono o maszynach matematycznych, których jednak nie należy mylić z matematycznymi modelami działania komputerów (urządzeń).

Komputer jest więc urządzeniem – układem o swoistej organizacji, który realizuje obliczenia. Ma części, które



oddziałują ze sobą – np. nośniki pamięci stałej. Powiemy, że komputer realizuje pewien model obliczeń tylko wtedy, kiedy jego działanie – a więc wszystko to, co można uzyskać z niego, obsługując go – poprawnie można przewidzieć i wyjaśnić w kategoriach tego modelu.

Wyobraźmy sobie, że Faust dostaje do analizy komputer Mefistofeles 2.0, którego funkcją jest, jak głosi instrukcja, „zawsze przeczyść”. Faust stawia hipotezę, którą opisuje jako pewien formalny model obliczeń, że po wprowadzeniu napisu „TAK” Mefistofeles wypłuje napis „NIE”. Ba, nawet po wprowadzeniu napisu „NIE”, Mefistofeles cały czas odpowiada „NIE”. A to znaczy, że przewidywania modelu się sprawdzają. Ważne jest, żeby Mefistofeles 2.0 był urządzeniem, które ma funkcję realizacji takich obliczeń – tzn. nadano mu właśnie taką strukturę, aby obliczał to, a nie co innego. Wynik obliczeń powinien również być wykorzystywany do sterowania jakiegoś innego urządzenia (przez co będziemy rozumieć także wykorzystanie go przez użytkownika, na którego ten wynik jakoś wpłynie poznawczo).

Mamy też matematyczną teorię obliczeń, której fundament stanowią ba-

dania genialnego matematyka Alana Turinga (1912–1954). Opisany przez niego matematyczny model maszyny – zwany później na jego cześć „maszyną Turinga” – to formalizacja intuicyjnie stosowanego przez matematyków od wieków pojęcia „algorytm”. „Algorytm” rozumie się więc ściśle jako zapis operacji, które może zrealizować maszyna Turinga, posługująca się bardzo ograniczonym repertuarem operacji elementarnych. Odpowiadają one temu, co zupełnie mechanicznie zrobiłby rachmistrz posługujący się jedynie potencjalnie nieograniczoną ilością papieru, ołówkiem i gumką: zapisywałby symbol, zmazywał go, przesuwiał się w lewo lub w prawo na kartce (czy taśmie). Turing pokazał, że może istnieć także maszyna uniwersalna: taka, która potrafi wykonać dowolne obliczenie dostępne dla wszystkich innych maszyn Turinga (z których każda realizuje jedynie zestaw z góry określonych operacji). I twierdził, że taka maszyna obliczy wszystko, co daje się efektywnie obliczyć – chociaż są i tacy, którzy twierdzą, że fizycznie możliwe są obliczenia funkcji nieobliczalnych przez maszynę Turinga. Są one zwane „funkcjami hiperobliczeniowymi”.

Wyłano sporo atramentu na opisanie

wszystkich warunków, które muszą spełnić fizyczne układy, aby zasługiwały na miano „komputer”, ale my możemy pozostać na dość ogólnym poziomie. Ważne jest więc, by fizyczny układ miał funkcję obliczania i właściwą strukturę. Ma zatem być mechanizmem służącym do obliczania zgodnie z jakimś matematycznym modelem obliczeń, a jego działania nie można prościej i bardziej elegancko wyjaśnić. I tak wiadro z wodą nie jest komputerem, gdyż poziom wody nie stanowi oczekiwanego wyniku, o ile użytkownik wiadra nie stosuje go do wykonywania obliczeń. Skąd to zastrzeżenie? Komputer może być hydrauliczny – w połowie XX wieku istniał chociażby model gospodarki keynesowskiej, zrealizowany jako skomplikowany wodny komputer MONIAC, a są też (nieco żartobliwe) prace teoretyczne pokazujące możliwość wykorzystania wiader z wodą do obliczania funkcji logicznych wspomagających rozpoznawanie wzorców przez sieci neuropodobne. Podobnie zwykły kamień polny nie jest komputerem, bo gdy leży na łące, nie wylicza żadnej prostej funkcji stałej (np. to, że leży na lewo od jabłonki, nie oznacza, że daje wynik „12”). To da się prościej wyjaśnić. Grawitacją.

## Mózgi biologiczne i elektronowe

Skoro wiemy już w przybliżeniu, co to znaczy, że urządzenie fizyczne jest komputerem, przejdźmy do mózgów. Już u zarania drugiej połowy XX wieku zaczęto określać maszyny matematyczne mianem „mózgów elektronowych”. Wskazywano, że komputery rozwiązują problemy, których istoty nie da się z góry określić. Tak jak uniwersalna maszyna Turinga. Co więcej, możliwości maszyny biorą się z dużej ilości elementarnych operacji – tak jak możliwości mózgu biorą się z oddziaływań dużej ilości stosunkowo prostych neuronów. A jednocześnie wskazywano, że maszyny mogą posługiwać się opisami innych maszyn, przetwarzać symbole czy też informacje.

Mówiąc krótko, argumentacja ta odwołuje się do kilku cech mózgów: elastyczności czy też uniwersalności; złożoności, wynikającej z interakcji neuronów; oraz do przetwarzania informacji. Nawet jeśli komputery mają te cechy, to nie wystarczą one do ustalenia, czy mózg jest komputerem. Pominięto bowiem to, czy rzeczywistość mózgu ma strukturę wewnętrzną odpowiadającą określonym modelowi obliczeń i czy ta struktura została wyselekcjonowana – chociażby przez dobór naturalny – do realizacji zadań z zakresu przetwarzania informacji.

Dlaczego mózg miałby do tego służyć? Dlatego, że procesy poznawcze, w przeciwieństwie do procesów metabolicznych, nie polegają po prostu na dostarczaniu organizmowi energii. Przewidywanie przyszłych stanów otoczenia jest kluczowe dla przeżycia wszelkich organizmów, które mogą jakoś do tych przyszłych stanów się przygotować. Nie możemy wyjaśnić przygotowania się organizmów do stanów przyszłych – jeśli są zupełnie nowe – inaczej niż przez odwołanie do informacji mówiących o otoczeniu.

To wskazuje nam, że informacyjne działanie mózgu może być istotnie biologiczną adaptacją, a więc zapewnia organizmowi lepsze przystosowanie do otoczenia i na przykład umożliwia zwierzętom lepsze planowanie ruchu. Dlatego często im lepsze planowanie ruchu, tym większy mózg. (Porównaj-

my mózg słonia z układem przetwarzania informacji u ruchomej rośliny, np. roszciki).

## Symulacje i spekulacje

Hipotezy o obliczeniowym charakterze mózgu inspirowały wiele spekulacji, których nie sposób było potwierdzić bezpośrednio metodami eksperymentalnymi. Jednak można było tworzyć symulacje komputerowe, dostarczające danych tak dokładnych, że nie dałoby się ich uzyskać z badań nad biologicznymi mózgiami. I chociaż pierwsze obliczeniowe modele mózgu – a zaproponowali je pionierzy cybernetyki, Warren McCulloch i Walter Pitts, w 1943 r. – wydawać się mogą dzisiaj jedynie ciekawostką, to z czasem powstały coraz dokładniejsze modele działania zarówno pojedynczych neuronów, jak i całych ich zespołów.

I tak z jednej strony mamy coraz dokładniejsze badania elektrofizjologiczne nad mózgiami zwierząt i ludzi. W laboratoriach hoduje się też kultury komórek nerwowych, badając ich działanie jako sieci neuronowych (służą one więc bezpośrednio jako komputery). Wyników eksperymentalnych jest coraz więcej – a do spektakularnych należą chociażby uhonorowane w 2014 r. Nagrodą Nobla odkrycia map poznawczych w mózgu szczura (John O’Keefe oraz May-Britt Moser i Edvard Moser). Mapy poznawcze są symulowane obliczeniowo, a jednocześnie rezultaty tych symulacji porównywane są z wynikami eksperymentalnych badań na zwierzętach. Rozpędu nabierają też badania anatomiczne – coraz dalej idą próby prześledzenia przebiegu całej sieci nerwowej u różnych organizmów (tzw. konektomu, mapy wszystkich połączeń neuronalnych). Znamy już konektom niciania *C. elegans*, a także fragmenty konektomu muszki owocowej czy siatkówki i pierwszorzędowej kory wzrokowej u myszy.

Z drugiej strony, coraz dokładniejsze są same modele obliczeniowe – zarówno pojedynczych neuronów, jak i całego mózgu. Istnieją bardzo dokładne modele opisujące elektrofizjologiczne cechy pojedynczych neuronów, dzięki którym bada się np. pochodzenie fal

mózgowych, które zarejestrować można elektroencefalografem. Istnieją też symulacje poznawcze, które w przybliżeniu opisują działanie całego mózgu. Największą i najbardziej udaną taką symulacją jest obecnie SPAUN – model mózgu opracowany w laboratorium kanadyjskiego profesora neuronauki i filozofa Chrisa Eliasmitha. SPAUN jest w stanie realizować wiele różnych zadań poznawczych, m.in. rozwiązywać testy na inteligencję, rozpoznawać pismo odręczne i uczyć się przez warunkowanie.

I właśnie dzięki temu, że w badaniach uwzględnia się zarówno modele komputerowe, jak i wyniki empiryczne, wczesne spekulacje cybernetyczne przedzierzgnęły się w systematyczne badania neuronauki obliczeniowej. Komputacjonizm jest nadal niesłychanie płodną hipotezą roboczą, a obalić go można tylko w jeden sposób: pokazując, że mózg w ogóle nie służy do przetwarzania informacji, w tym informacji o otoczeniu.

To jednak zadanie tylko dla straceńców.

Prof. **MARCIN MIŁKOWSKI** jest kognitywistą i filozofem, pracuje w Zakładzie Logiki i Kognitywistyki w Instytucie Filozofii i Socjologii PAN.

Artykuł pochodzi z dodatku do „Tygodnika Powszechnego” „Wielkie Pytania: Umysł – ciało”, TP 07/2017. Dodatek opowiada o tym, jak współczesna nauka rozmywa granice między tym, co umysłowe, a tym, co cielesne. Justyna Hobot i Michał Wierchoń wyjaśniają, czym jest synestezja, Piotr Sikora pisze o teologii ciała, rozmawiamy z Dominiką Dudek o awariach mózgowej maszynerii, a z Gregorem Hickokiem o neuronach lustrzanych.

Cały dodatek dostępny jest online i do pobrania pod adresem: [www.wielkiepytania.pl/WP04.pdf](http://www.wielkiepytania.pl/WP04.pdf)



## Nieprzypadkowy przypadek

**BARTOSZ BROŻEK**

**Odgrywa kluczową rolę w najważniejszych koncepcjach naukowych, od kosmologii, przez teorię ewolucji, neurobiologię i kognitywistykę, aż po filozofię. Jego wszechobecność nie może być przypadkowa.**

*K*atar Stanisława Lema to piękna, głęboka medytacja nad rolą i miejscem przypadku w świecie zamieszkiwanym przez *Homo sapiens*. Dzieło to, choć określić by je można mianem kryminału, jest w istocie rozprawą filozoficzną. Fabuła jest tu drugorzędna: główny bohater, były amerykański astronauta, prowadzi śledztwo dotyczące serii tajemniczych zgonów. Podobieństwa między tymi zdarzeniami każą przypuszczać, że na południu Włoch działa niebezpieczny morderca. Z czasem jednak coraz więcej wskazuje na to, że „mordercą” tym jest zwykły zbieg okoliczności: przypadek.

### Niejedno ma imię

Jedna z najbardziej pamiętnych scen *Kataru* to rozmowa, w której Saussure każe nam zastanowić się nad następującą kwestią: w ogrodzie stoi drewniany stół nabijany na obwodzie miedzianymi ćwiekami. „Czy uważa pan za możliwe – pyta swego rozmówcę Saussure – puścić na ten stół pipetką z wysoka tyle kropel wody, ile jest gwoździ, tak żeby każda kropla trafiła łąpek?”. Musimy oczywiście przyznać, że to mało prawdopodobne, jeśli w ogóle możliwe. „Ale przecież wystarczy – ciągnie Saussure – żeby przez pięć minut padał deszcz, a każdy gwoździec na pewno dostanie swoją kroplę wody...”.

W tym krótkim dialogu Lem w mistrzowski sposób pokazuje ważny aspekt zjawisk przypadkowych: to, czy uznamy jakieś zdarzenie za – mniej lub bardziej prawdopodobne – zbieg okoliczności, zależy od „układu odniesienia”, w którym się znajdujemy, czyli od posiadanej wiedzy i sformułowanych na jej gruncie oczekiwań.

Ludzki umysł jest nie tylko narzędziem gromadzenia i katalogowania informacji. Rejestrowane dane służą regulacji zachowań organizmu. Uczymy się nie po to, żeby wiedzieć, ale by wiedzę tę, często nieświadomie, wykorzystywać do skutecznego działania. Umysł to zatem wyrafinowana maszyna projektowa, która nieustannie zbiera i filtruje informacje, by stworzyć i odpowiednio modyfikować „plan”, wedle którego działa organizm. Plan ten z konieczności musi zawierać przewidywania zdarzeń w środowisku. Gdy napotykanne okoliczności wpisują się w te przewidywania, organizm może działać w miarę skutecznie (w zależności od jakości „planu”). Zdarza się jednak, że dzieje się coś sprzecznego z oczekiwaniami. Czujemy się wtedy zaskoczeni i mówimy o przypadku lub zbiegu okoliczności, a nasze umysły podejmują wysiłek szybkiej adaptacji „planu” do niespodziewanych warunków. Jest to subiektywne rozumienie przypadku, zależne od tego, czy pewne zdarzenie „wpisuje się” w nasze przewidywania, w „plan” działania naszego organizmu.

O przypadkach można mówić jednak także w sposób obiektywny. Gdy dysponujemy dobrą probabilistyczną teorią opisującą pewien wycinek rzeczywistości, np. termodynamiką, mechaniką kwantową albo teorią zachowań konsumentów na rynku żywności, za przypadkowe uważać będziemy każde zdarzenie, którego prawdopodobieństwo jest mniejsze niż 1, czyli takie, które – zgodnie z naszą teorią – nie jest w pełni zdeterminowane. Taki obiektywny przypadek nie musi być uznany za przypadek w sensie subiektywnym (i odwrotnie).

Można nawet postawić tezę, że wiele dyskusji na temat przypadkowości i konieczności wzięło się w rozmaite nieporozumienia i pseudoproblemy ze względu na napięcie pomiędzy obiektywną i subiektywną wizją przypadku. Gdy pojedyncza kropla trafia w gwoździec, mówimy o niezwykle zbiegu okoliczności, odbierając to zdarzenie jako (subiektywnie) bardzo przypadkowe; gdy gwoździec zostaje trafiony kroplą w trakcie ulewy, poczucie przypadkowości znika, choć z matematycznego punktu widzenia jest to ciągle przypadkowe (istnieje pewne bardzo małe prawdopodobieństwo, że żadna kropla ulewnego deszczu nie uderzy w główkę gwoździa).

Nasze umysły nie są naturalnie przystosowane do myślenia w kategoriach rachunku prawdopodobieństwa. Eksperymenty psychologiczne, m.in. te przeprowadzone przez Daniela Kahnemana i Amosa Tversky’ego, wykazały to ponad wszelką wątpliwość: gdy natrafiamy na problem, który łatwo uległby analizie statystycznej, najpewniej popełnimy błąd. Umysł jest niezmordowany w upraszczaniu świata: ujmujemy rzeczywistość w proste, prototypowe kategorie, a napotykając niezgodność między oczekiwaniami a tym, czego faktycznie doświadczamy, uciekamy się (znów: zwykle nieświadomie) do rozmaitych sztuczek, które przywrócą spójność naszej wizji świata. Gdy okazuje się to niemożliwe, popadamy w dezorientację. Im bardziej przypadkowe (mało oczekiwane) zdarzenie, tym dezorientacja większa. Jak to pięknie ujęła Wisława Szymborska w wierszu *Wszelki wypadek*: „Ocalałeś, bo byłeś pierwszy. / Ocalałeś, bo byłeś ostatni. / Bo sam. Bo ludzie. Bo w lewo. Bo w prawo. / Bo padał deszcz. Bo padał cień. / Bo panowała słoneczna pogoda”.

### Marzenie Laplace’a

W wydanym w 1814 r. dziele *Essai philosophique sur les probabilités* Pierre Simon de Laplace pisze: „Powinniśmy uznawać aktualny stan wszechświata jako efekt jego poprzedniego stanu i jako przyczynę stanu kolejnego. Jeśli zatem założy się istnienie inteligencji,





Pierre Simon de Laplace

która potrafiłaby zrozumieć wszystkie siły poruszające naturą i położenie, w którym znajdują się wszystkie byty składające się na naturę – inteligencję wystarczająco potężną, by poddać te dane analizie – zawarłaby ona w jednej formule ruchy najcięższych ciał niebieskich i najlżejszych atomów. [Inteligencja ta] nie odczuwałaby żadnej niepewności, gdyż przyszłość, jak i przeszłość byłyby dla niej jak terażniejszość”.

Laplace’ański demon – inteligencja przewyższająca wielokrotnie nasze niedoskonałe umysły – to piękny eksperyment myślowy, który wyraża dwie tezy: ontologiczną i epistemologiczną. Laplace zakłada, że rzeczywistość fizyczna rządona jest przez ściśle deterministyczne prawa przyrody; równocześnie zauważa, że poziom złożoności zdarzeń rozgrywających się na arenie wszechświata jest zbyt duży, by mogły go w pełni pojąć ograniczone ludzkie umysły. Tezy te pełnią też swoistą funkcję terapeutyczną: łagodzą nasz niepokój i karmią potrzebę porządku i pewności. W świecie zjawisk fizycznych nie ma przypadków, są one wyłącznie produktem naszej niewydolności poznawczej.

Sprawy skomplikowały się na początku XX w. wraz z powstaniem mechaniki kwantowej. Wbrew marzeniom Laplace’a okazało się, że ruchów „najcięższych ciał niebieskich i najlżejszych atomów” nie da się zamknąć w jednej

formule. Podczas gdy te pierwsze zdają się podlegać w pełni deterministycznym prawom ogólnej teorii względności, te drugie opisać można jedynie wykorzystując rachunek prawdopodobieństwa.

Choć niezwykle sukcesy mechaniki kwantowej wywołały zrozumiałe zachwyty fizyków, wielu z nich, na czele z Albertem Einsteinem, nie chciało się zgodzić, że teoria ta stanowi ostateczny opis rzeczywistości. Einstein w liście do Maxa Borna pisał: „Mechanika kwantowa jest niewątpliwie imponująca. Ale wewnętrzny głos mówi mi, że to jeszcze nie to. Teoria wyjaśnia wiele, ale nie prowadzi nas bliżej do zrozumienia tajemnic Staruszka. Ja w każdym razie jestem przekonany, że On nie gra w kości”. A w innym liście do tego samego adresata dodaje: „Ty wierzysz w Boga, który gra w kości, a ja w zupełne prawo i porządek w świecie, który, na swój opętańczy sposób, próbuje zrozumieć”.

Skąd wzięło się tak uporczywie powtarzane przez Einsteina przekonanie, że mechanika kwantowa jest, w pewnym sensie, ślepą uliczką, która nie jest w stanie doprowadzić nas do pełnego zrozumienia rzeczywistości?

Historycy i filozofowie nauki mówią w tym kontekście o silnych założeniach metafizycznych przyjmowanych przez genialnego fizyka: Einstein zgadzał się najwyraźniej z Laplace’em, że świat fizyczny jest w pełni deterministyczny. Przekonania metafizyczne nie biorą się jednak znikąd – są raczej efektem naszych indywidualnych doświadczeń i przemyśleń.

Można zatem spekulować, że Einsteiński protest wobec „przypadkowej” natury mechaniki kwantowej był głęboko zakorzeniony w mechanizmach psychicznych, które nakazują nam poszukiwać spójności i porządku w otaczającym nas świecie.

Mówiąc inaczej: Einstein z radością podejmował zmagania z przypadkami „subiektywnymi”, starając się „odcyfrować zamysł Boga”, ale nie mógł znieść myśli o tym, iż fundamenty rzeczywistości zawierają przypadki rozumiane obiektywnie. Te pierwsze stanowią wyzwanie dla ludzkiej wyobraźni,

te drugie – rodzaj porażki. Wszystko wskazuje jednak na to, że z porażką tą musimy się pogodzić i przyznać, że fundamentalne prawa fizyki, nawet w wysnionej teorii ostatecznej, muszą mieć charakter probabilistyczny. Pogodzenie się z porażką nie oznacza jednak pełnej akceptacji: bezwładność naszych aparatów poznawczych sprawia bowiem, że niezwykle trudno jest nam spojrzeć na świat jako wynik procesów losowych.

### Odwrócenie rozumowania

Jeden z XIX-wiecznych krytyków Darwina, Robert Mackenzie Beverley, pisał: „W teorii, z którą mamy do czynienia, absolutna ignorancja jest wynalazcą; moglibyśmy więc sformułować podstawową zasadę całego systemu: aby zbudować doskonałą i piękną maszynę, nie trzeba wiedzieć, jak ją zbudować. Po starannej analizie okaże się, że teza ta w postaci skróconej wyraża zasadniczy cel teorii, a także w kilku słowach wszystko, co pan Darwin miał na myśli; ów, osobiście odwracając rozumowanie, zdaje się uważać, iż absolutna ignorancja mogłaby zastąpić absolutną mądrość we wszystkich twórczych osiągnięciach”.

Beverley, być może nawet wbrew swym intencjom, dokonał ważnej obserwacji. Teoria ewolucji w istocie stanowi zaskakujące „odwrócenie rozumowania”, co może tłumaczyć trudności, jakie mamy z pełnym jej zrozumieniem. Trudności te przejawiają się nawet na poziomie opisu językowego. Tylko ci nieliczni biologowie, którzy są purystami metodologicznymi, potrafią (pewnie nie zawsze) powstrzymać się od antropomorfizowania procesów ewolucyjnych.

Przyjrzyjmy się zachowaniu kukułki. Samica tego gatunku składa jajo w gniazdach innych gatunków, często przy tym wytaczając z niego jedno z jaj pary gospodarzy. Gdy niczego niepodjęwający przybrani rodzice doczekają się potomstwa, pisklą kukułki potrafi wyrzucić pozostałe jaja z gniazda, by zmaksymalizować opiekę rodzicielską.

Bardzo trudno mówić o takich zja-

wiskach nie posiłkując się pojęciami, których używamy w kontaktach międzyludzkich. Czyż plan kukułczej mamy nie był przebiegły? Czy nie wyrzuciła jednego z jaj, by „adocyjni rodzice” nie zorientowali się, że coś jest nie tak? Czy pisklą nie postąpiło dalekowzrocznie (choć okrutnie i egoistycznie)?

Tymczasem zachowanie kukułki nie jest efektem realizacji przemyślanego przez nią planu; jest to „automatyczny” sposób działania, zakodowany w jej genomie. To efekt przypadkowych mutacji genetycznych, które doprowadziły do ewolucyjnych adaptacji.

Trudno jest nam jednak zaakceptować istnienie takich obiektywnych przypadków, dobrze opisywanych w probabilistycznych teoriach genetyki i biologii ewolucyjnej; trudno pójść za radą Darwina i „odwrócić rozumowanie”, bo jest ono tak odległe od naszych codziennych doświadczeń i wykształconych przez nie kategorii pojęciowych.

Być może dlatego tak wiele osób za ślepych i przypadkowymi mechanizmami ewolucji stara się za wszelką cenę dostrzec działanie intencjonalnie działającej inteligencji, która przypomina Laplace’ańskiego demona wyposażonego nie tylko w moce poznawcze, ale i sprawcze.

### O pomieszaniu języków

Być może najbardziej interesującym, a niewątpliwie najbardziej doniosłym z egzystencjalnego punktu widzenia problemem, w którym ujawnia się napięcie pomiędzy obiektywnie i subiektywnie rozumianym przypadkiem, jest spór o istnienie wolnej woli. Debata ta toczy się od wielu wieków, a w ostatnich dziesięcioleciach nabrała dodatkowych odcieni w związku z pracami psychologów i neurobiologów.

Mówiąc w uproszczeniu, w interesującej nas kwestii spotykają się dwa konkurencyjne stanowiska: kompatybilizm i inkompatybilizm. Zwolennicy pierwszego z nich twierdzą, że teza o istnieniu wolnej woli jest w pełni zgodna z determinizmem. Ich argumentacja przebiega z grubsza

następująco: jeśli przyjęlibyśmy, że nasze wolne decyzje nie są zdeterminowane, musielibyśmy uznać, iż stanowią zdarzenia całkowicie przypadkowe. To kłóci się jednak z głęboko zakorzenionym w nas poczuciem, że podejmujemy decyzje na podstawie swych przekonań i pragnień. Pozostaje zatem uznać, iż wolna wola może operować jedynie w świecie deterministycznym.

Z konstatacją tą nie zgadzają się inkompatybiści, zauważając, że jeśli nasze decyzje są w pełni zdeterminowane, trudno zrozumieć, w jaki sposób moglibyśmy być za nie odpowiedzialni. Odpowiedzialność moralna zdaje się sprzeczna z ideą determinizmu, a przekonany determinista musiałby uznać, że wolna wola jest jedynie złudzeniem.

Przeprowadźmy eksperyment myślowy. Wyobraźmy sobie, że skonstruowano poprawną teorię działania ludzkiego mózgu i że ma ona charakter probabilistyczny (co jest, nomen omen, prawdopodobne, zważywszy na probabilistyczną naturę fundamentalnych praw fizyki). Wiemy zatem, że podejmowane przez nas decyzje są przypadkowe (w obiektywnym sensie), tzn. że prawdopodobieństwo ich wystąpienia jest mniejsze od 1. Czy istnienie takiej teorii wpłynęłoby na debatę między kompatybilistami i inkompatybilistami? Jeśli tak, to w niewielkim zakresie. Inkompatybiści ucieszyliby się z przestrzeni, którą nowa teoria stwarza dla działania wolnej woli; kompatybiści mogliby z kolei zauważyć, że – zgodnie z tą teorią – prawdopodobieństwo podjęcia pewnej decyzji może być bardzo bliskie 1, a zatem decyzję taką trudno uznać za przypadkową (w subiektywnym sensie).

Mówiąc inaczej, spór między kompatybilizmem a inkompatybilizmem (przynajmniej w uproszczonej wersji przedstawionej powyżej) jest sporem pozornym, gdyż mówiąc o determinizmie obie strony mają na myśli przypadkowość rozumianą obiektywnie, zastanawiając się zaś nad działaniem wolnej woli odwołują się do niematematyzowalnych, „subiektywnych” kategorii pojęciowych.

Nie oznacza to oczywiście, że pytanie o istnienie i naturę wolnej woli jest pseudoproblemem, ale musimy być ostrożni, by rozważając tę kwestię nie mieszać języków, myląc chociażby subiektywne i obiektywne rozumienie przypadku.

Przypadek to fascynujące pojęcie. Nie dość, że jest powiązane z innymi ważnymi pojęciami – koniecznością, determinizmem, wolną wolą – to jeszcze odgrywa kluczową rolę w najważniejszych koncepcjach naukowych, od kosmologii, przez teorię ewolucji, neurobiologię i kognitywistykę, aż po filozofię. Taka wszechobecność „przypadku” nie może być przypadkowa. Wydaje się, że jest to jedno z tych niewielu pojęć, które organizują ogromne obszary naszej wizji świata. Dlatego warto poświęcić mu trochę nieprzypadkowego namysłu.

Prof. **BARTOSZ BROŻEK** jest filozofem i kognitywistą, prodziekanem Wydziału Prawa i Administracji UJ. Pracuje w Katedrze Filozofii Prawa i Etyki Prawniczej.

Artykuł pochodzi z katalogu Copernicus Festival 2018. W katalogu piszą również m.in: ks. Michał Heller o wodospadzie w Moskog, Anita Piotrowska o przypadku w kinie i *Przypadku* w reż. Kieślowskiego, Katarzyna Czerni o rewolucji informelu w sztuce, Anna Prokop – o przypadku w muzyce, Marcin Gorazda o badaniach Roberta Franka. Rozmawiamy także z Adamem Zagajewskim o poezji oraz Jeanem-Pierre Lasotą o wszechświecie i cudach.

Cały katalog dostępny jest online i do pobrania pod adresem: [www.wielkiepytania.pl/CF2018.pdf](http://www.wielkiepytania.pl/CF2018.pdf)



## Historia pewnej nierówności

PAWEŁ HORODECKI, MICHAŁ ECKSTEIN

**Ponad 80 lat temu Albert Einstein i Niels Bohr spierali się o naturę rzeczywistości. Według najnowszych kwantowych eksperymentów wizja Bohra jest bardziej adekwatna, jeśli tylko... fizycy mają wolną wolę.**

Mechanika kwantowa krystalizowała się stopniowo. Choć jej matematyczny formalizm, czyli sposób wyliczania wyników eksperymentów, został przez fizyków opanowany dość szybko, to natura obiektów kwantowych, czyli „małych” – takich jak atomy czy fotony – pozostaje przedmiotem kontrowersji do dzisiaj.

### Filozoficzne preludium

W latach 30. rozgorzała słynna debata pomiędzy Albertem Einsteinem a tzw. szkołą kopenhaską, reprezentowaną w szczególności przez Nielsa Bohra. W swej istocie był to spór filozoficzny o naturę „fizycznej rzeczywistości”, czyli wizji świata kreślonej przez nowożytną fizykę.

Einstein utrzymywał, że jeśli bez oddziaływania z układem potrafimy z pewnością przewidzieć wartość jakiejś wielkości fizycznej, to istnieje element rzeczywistości, któremu owa wielkość odpowiada. Przykładowo, nie musimy oświetlać pomarańczy, żeby wiedzieć, że ma ona z pewnością kolor pomarańczowy – jest to jej inherentna własność. Można powiedzieć, że zdaniem Einsteina kwantowe cząstki są jak pomarańcze – mają określone indywidualne własności, zanim je zbadamy. Ponieważ mechanika kwantowa potrafi przewidzieć niektóre wyniki tylko z pewnym prawdopodobieństwem, a nie z pewnością, to nie może ona – uważał Einstein – być uznana za teorię zupełną, czyli zdolną adekwatnie odwzorować każdy element fizycznej rzeczywistości.

Bohr oponował, posilkując się zasadą nieoznaczoności Wernera Heisenberga, twierdząc, że każdy pomiar wielko-

ści fizycznej jest inwazyjny – mierząc, zawsze zaburzamy mierzony układ. W konsekwencji tego pewne wielkości – takie jak np. położenie i pęd cząstki – należy uznać za komplementarne, czyli takie, których nie da się równocześnie zmierzyć, a nawet równocześnie przypisać im jednoznacznie wartości liczbowych. Bohr stwierdził, iż ten pozornie paradoksalny fakt pokazuje jedynie, że Einsteinowska koncepcja „fizycznej rzeczywistości” jest nieadekwatna do opisu mikroświata. Zakładała ona bowiem zadekretowanie wyników pomiarów przed ich wykonaniem, podczas gdy w mechanice kwantowej cechy cząstek „aktualizują się” dopiero w momencie pomiaru.

Obaj uczeni zgadzali się w pełni co do skuteczności mechaniki kwantowej do opisu zjawisk mikroświata. W końcu jednym z prekursorów tej teorii był właśnie Einstein, który już w 1905 r. zastosował koncepcję „kwantów światła” [niem. Lichtquanten] do opisu tzw. efektu fotoelektrycznego. Krytykując mechanikę kwantową, Einstein twierdził jedynie, iż jest ona przybliżeniem jakiejś lepszej teorii, zgodnej z klasycznym rozumieniem fizycznej rzeczywistości. Bohr zaś utrzymywał, że jeśli zjawiska kwantowe wydają się paradoksalne z punktu widzenia „naturalnej filozofii”, to... tym gorzej dla filozofii.

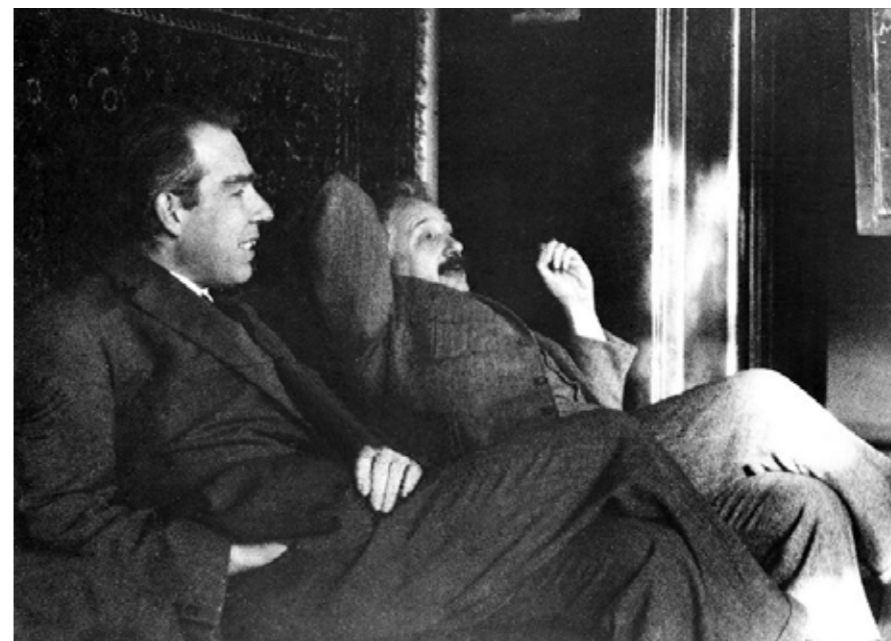
Debata Einstein–Bohr toczyła się zatem nie tyle w obszarze fizyki, co raczej filozofii fizyki. O ile jednak kwestia istnienia obiektywnych własności pojedynczych cząstek wydawała się problemem czysto akademickim, o tyle układ dwóch cząstek kwantowych wprawiał naukowców w zakłopotanie. W słynnym artykule z 1935 r. Einstein, we współpracy z Borisem Podolskim

i Nathanem Rosenem, pokazał, że jeśli dwie cząstki kiedyś ze sobą oddziaływały, to mechanika kwantowa mówi, iż pomiar jakiejś własności jednej z nich natychmiast ustala wartość tejże wielkości u jej partnera. Einstein określił to mianem „upiornego oddziaływania na odległość”, które stało – w jego mniemaniu – w sprzeczności z zasadami teorii względności (ponieważ, jak się wydawało, wymagałoby to przekazu informacji z prędkością większą od prędkości światła). Z kolei Bohr i Erwin Schrödinger argumentowali, że dwie cząstki kwantowe, które oddziaływały, należy postrzegać jako jeden nielokalny układ, który zachowuje się jak jeden obiekt, mimo że jego składniki są bardzo daleko od siebie. Nie przekonało to sceptyków, choć za sprawą Schrödingera „upierne oddziaływanie na odległość” zyskało mniej dramatyczną nazwę „splątania kwantowego”.

### Twierdzenie o teoriach

Choć przykład wymyślony przez Einsteina i współpracowników był określany mianem „paradoksu EPR”, fizycy praktycy nauczyli się z nim żyć. Mechanika kwantowa działała doskonale, a nikomu nie udało się opracować lepszej teorii, zgodnej z Einsteinowską wizją, w której własności cząstek byłyby zdeterminowane przed pomiarem. Co więcej, sprzeczność zasad kwantowych z teorią względności okazała się pozorna – nie można bowiem używać kwantowego splątania do przesyłania informacji z prędkością nadświetlną. Mariaż mechaniki kwantowej ze szczególną teorią względności doprowadził zaś do powstania bardzo trudnej, ale niezwykle skutecznej, kwantowej teorii pola, którą na co dzień posługują się całe zastępy teoretyków pracujących w CERN-ie. Problemy interpretacyjne kwantowego splątania zostały zatem na powrót przesunięte do sfery filozofii.

Po blisko trzech dekadach kwestia splątania kwantowego nieoczekiwanie powróciła na grunt fizyki. W 1964 r. John Bell wyraził koncepcję EPR w postaci prostej nierówności, którą dawało się skonfrontować z doświadczeniem.



Niels Bohr i Albert Einstein

Wyobraźmy sobie eksperyment jako zadawanie pytań układowi fizycznemu. Możemy np. spytać foton, jaki ma kolor, a on odpowiada, załamując się odpowiednio na pryzmacie. Z tej perspektywy własność cząstki to odpowiedź na dane pytanie, która jest określona jeszcze przed samym pomiarem. Pomarańcza – by pozostać przy tym samym przykładzie – zawsze jest pomarańczowa, zanim zadamy jej pytanie o kolor, oświetlając ją. Jeśli cząstki kwantowe są jak pomarańcze, to wciąż – nawet jeżeli są w stanie splątane – mają określone indywidualne własności, zanim je zbadamy. Owe cechy kwantowych indywidualności powinny opisywać jakaś teoria, której mechanika kwantowa – potrafiąca przewidzieć wyniki tylko z pewnym prawdopodobieństwem – jest jedynie przybliżeniem.

Wyobraźmy sobie dwoje eksperymentatorów – Alicję i Boba – zamkniętych w odległych laboratoriach. Teraz weźmy źródło emitujące parę cząstek splątanych, z których jedna leci do Alicji, a druga do Boba. Eksperymentatorzy zadają cząstkom po jednym z zestawu pytań, to znaczy przeprowadzają pewien pomiar, którego wynik skrzętnie zapisują. Cząstki odpowiadają tylko „tak” lub „nie”. Alicja i Bob muszą zadawać różne pytania wielu cząstkom w nadziei, że uda się uchwycić jakąś prawidłowość.

Tabelki pytanie–odpowiedź dla każdego z obserwatorów nie są specjalnie

interesujące, wyglądają na kompletnie losowe (i takie w istocie są!). Ciekawie zaczyna się robić, kiedy Alicja i Bob się spotykają i porównują swoje zapiski. Okazuje się, że jeśli, przykładowo, pytali swoje elektrony, czy mają „spin do góry” (spin to pewna własność elektronów), to jeśli cząstka Alicji odpowiedziała „tak”, to ta u Boba zawsze mówiła „nie”. Powiemy zatem, że wyniki ich pomiarów są skorelowane. Z drugiej strony, jeśli Alicja pytała o „spin do góry”, a Bob o „spin w prawo”, to odpowiedzi nie będą w żaden sposób powiązane.

Aby uchwycić te prawidłowości, można posłużyć się tzw. funkcją korelacji, która zależy od pytań postawionych przez Alicję oraz Boba. Bell rozumował następująco: założmy, że wyniki pomiarów zależą, oprócz od zadawanego pytania, od jakiejś zmiennej, nad którą nie mamy żadnej kontroli. Ten „ukryty parametr”, determinujący własności cząstek, pochodziłby od owej hipotetycznej fundamentalnej teorii, antycypowanej przez Einsteina, dla której mechanika kwantowa byłaby jedynie przybliżeniem. Wówczas funkcję korelacji można prosto wyliczyć na gruncie klasycznej teorii prawdopodobieństwa. Bell pokazał, iż w tym przypadku pewna kombinacja funkcji korelacji (oznaczmy ją przez „D”) nie może być większa od 2 dla żadnego zestawu pytań Alicji oraz Boba. Okazuje

się jednak, że dla pewnych zestawów pytań mechanika kwantowa przewidyje większą wartość D – dokładnie  $2\sqrt{2}$ , czyli ok. 2,83.

Innymi słowy, jeżeli lecące cząstki miałyby wcześniej przygotowane odpowiedzi na zadawane im pytania, to liczba D nie mogłaby przekraczać 2. Ponieważ jednak okazuje się, że D jest znacząco większe od 2, to oznacza, że cząstki nie mogą mieć własności zdeterminowanych przed pomiarem przez żadną teorię. Muszą nabywać je w sposób niezdeterminowany swoją przeszłością – czyli losowy.

Twierdzenie Bella – jak każde twierdzenie matematyczne – jest oparte na pewnych założeniach.

Po pierwsze, pomiary Alicji i Boba muszą zachodzić prawie równocześnie. Alicja nie powinna mieć żadnej szansy na wysłanie Bobowi wyniku swojego pomiaru, zanim Bob nie zada swojego pytania – i vice versa. Wówczas bowiem eksperymentatorzy mogliby się dogadywać „poza konkursem”. Ponieważ, zgodnie ze szczególną teorią względności – możemy przesyłać wiadomości co najwyżej z prędkością światła, Bob musi wykonać pomiar na tyle szybko, aby nie zdążył do niego dolecieć ewentualny sygnał świetlny, wysłany przez Alicję po dokonaniu przez nią pomiaru.

Po drugie, urządzenia rejestrujące odpowiedzi cząstek powinny być wystarczająco wydajne. Szybko zauważono bowiem, że jeśli będziemy wysyłać mniej niż 87 proc. wysłanych cząstek, to uzyskaną „nadwyżkę korelacji” można złożyć na karb naszej niewiedzy o tych, których nie zmierzylimy.

Po trzecie wreszcie, pytania zadawane przez Alicję i Boba muszą być w pełni losowe i niezależne od siebie. Oznacza to, w szczególności, że musimy wykluczyć możliwość komunikacji pomiędzy laboratoriami nie tylko w momencie pomiaru, ale również w chwili ustalania pytań. Bo jeśli Alicja z Bobem umówiłaby się wcześniej, o co będą pytać, to silne korelacje między odpowiedziami nie byłyby niczym zaskakującym. Frapujący jest fakt, iż eksperymentatorzy wcale nie muszą być świadomi zmywy – ktoś lub coś

(np. jakiś złośliwy kartezyjański demon) mógł im przecież „poustawiać” urządzenia.

Jeśli zakładamy zatem, że pytania Alicji i Boba faktycznie są nieskorelowane, to znaczy, że muszą oni nie tylko mieć „uczciwe” urządzenia, ale również posiadać wolną wolę wyboru pytania!

### Nierówności na Ziemi i w niebie

Teoretyczny wynik badań Bella należało skonfrontować z eksperymentem. Jego oryginalną nierówność ulepszyli pięć lat później John Clauser, Michael Horne, Abner Shimony i Richard Holt, czyniąc ją bardziej adekwatną do realiów laboratoryjnych. Stąd czasem mowa o „nierówności Bell-CHSH”.

Pierwsze doświadczenia przeprowadzono już w latach 70. Rzeczywiście świadczyły one przeciw intuicji Einsteina, jednak ani warunek równoczesności pomiarów, ani czułości detekcji nie został spełniony.

Krokiem milowym na drodze do pełnego „testu Bella” był eksperyment przeprowadzony przez Alaina Aspecta i współpracowników w 1982 r. Użyli oni par splątanych fotonów oraz superszybkich polaryzatorów, uruchamianych dopiero, gdy cząstki były już w locie. Dzięki temu oba pomiary zachodziły nieomal równocześnie, a „Alicja” i „Bob” nie mogli sobie potajemnie przesyłać wyników. Jednak użyte polaryzatory były zaprogramowane – a zatem ich ustawienia nie były w pełni losowe. Przełomowy,

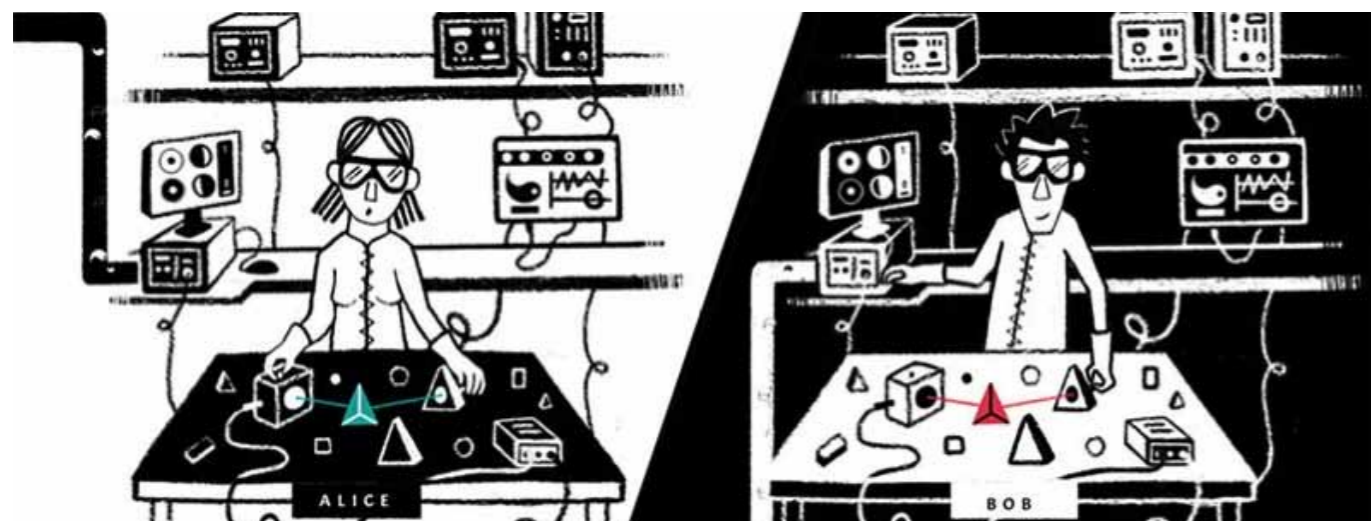
jak na owe czasy, eksperyment Francuzów udało się poprawić w 1998 r. zespołowi z Wiednia kierowanemu przez Antona Zeilingera. Pytania zadawane przez „Alicję” i „Boba” były tym razem wybierane przez kwantowy generator liczb losowych. Pomimo tego, nie udało się podówczas w pełni wyeliminować możliwości „pozakonkursowej” komunikacji między laboratoriami. W kolejnej wersji, w 2010 r., wiedeńscy przenieśli się do bardzo spektakularnej scenarii: pary splątanych fotonów były generowane na kanaryjskiej wyspie La Palma. Jeden z nich był mierzony nieopodal, podczas gdy drugi leciał na Teneryfę. Użycie szybkich polaryzatorów oraz kwantowych generatorów liczb losowych zapewniło, że komunikacja „poza konkursem” nie była możliwa.

Otwarta pozostawała jednak wciąż kwestia czułości detektorów. Wymóg wyłapywania przynajmniej 87 proc. strumienia cząstek był nie lada wyzwaniem w latach 70. ubiegłego wieku. Tak wydajne detektory udało się zbudować dopiero w XXI w. W 2001 r. zespół kierowany przez późniejszego laureata Nagrody Nobla Davida Winelanda wykorzystał takowe urządzenie do przeprowadzenia testu Bella. Tu również nie było niespodzianki, a mechanika kwantowa triumfowała. Sęk jednak w tym, iż eksperyment Winelanda wykorzystywał jony, którymi trudno się manipuluje, i nie udało się zagwarantować pierwszego założenia – o niemożności komunikacji. Detektory fotonowe o wydajności przekra-

czającej 90 proc. powstały dopiero dekadę później, a w 2013 r. dwa zespoły, kierowane przez Zeilingera oraz Paula Kwiaty z Illinois, niezależnie od siebie potwierdziły łamanie nierówności Bella w przyrodzie.

Dwa lata później wszystkie trzy elementy powiązano w jedną całość w trzech autonomicznych zespołach. W Delft pod kierunkiem Ronalda Hansona użyto kryształków diamentu specjalnie „zanieczyszczonych” azotem. Tymczasem wiedeńscy na czele z Zeilingerem, a także zespół Lyndena Shalma z Boulder w Colorado użyli fotonów i ultraczułych detektorów. Wyniki nie pozostawiały wątpliwości – żadna teoria „ukrytych zmiennych” nie może wyjaśnić kwantowych korelacji. Kilka miesięcy później Alain Aspect opublikował na łamach „Physics” artykuł o wymownym tytule „Zakończenie kwantowego sporu Einsteina z Bohrem” (ang. *Closing the Door on Einstein and Bohr’s Quantum Debate*).

W 2017 r. chiński zespół kierowany przez Jan-Wei Pana, ucznia Zeilingera, zaobserwował łamanie nierówności Bella przy użyciu par splątanych fotonów emitowanych z satelity na orbicie, a kwantowe technologie coraz odważniej wkraczają w przestrzeń kosmiczną. Sami zaś wiedeńscy również postanowili odwołać się do kosmosu, aby odeprzeć argumenty o tym, że może urządzenie do losowania są wadliwe (bądź też specjalnie ustawione). W ich fascynującym eksperymencie to fotony pochodzące z dwóch odległych gwiazd „zadawały pytania” w eksperymencie



Alicja i Bob biorą udział w teście Bella (thebigbelltest.org)

na Ziemi. Nierówność Bella została oczywiście złamana. To oznacza, że jeśli ktoś (lub coś) uknuł(o) intrygę, by nam mydląc oczy, musiał(o) to zrobić ponad 600 lat temu – przed Gutenbergiem i tym bardziej przed drukiem *Principiów* Newtona.

### Filozoficzna koda

Dzisiaj ludzie chętniej wierzą inter-autom niż fizykom i ich fotonom z gwiazd. Tym tropem poszli w 2016 r. autorzy Wielkiego Testu Bella (ang. The BIG Bell Test), w którym to 100 tys. użytkowników internetu generowało ciągi zer i jedynek wedle własnego widzimisię. Na podstawie ich zachcianek 15 laboratoriów na całym świecie zadało pytania cząstkom splątanim. I znów, mechanika kwantowa zatriumfowała.

Ciekawą uwagę dotyczącą tego testu poczynił brytyjski fizyk Lucien Hardy. Zauważył bowiem, że użyta metoda nie daje szans na spełnienie założeń testu Bella związanych z szybkością wykonywania eksperymentu ze względu na zbyt długi czas reakcji między podjęciem decyzji w ludzkim mózgu a jej motorycznym rezultatem – np. wciśnięciem klawisza komputera. Hardy zaproponował znaczącą poprawkę – nowy eksperyment miałby bazować na sygnałach EEG, używanych na co dzień w medycynie do diagnostyki mózgu, a także zadbać o przestrzenne rozdzielanie grup osób zaangażowanych w eksperyment.

W tym momencie czytelnik ma prawo nabrać podejrzeń, że cała ta historia z mechaniką kwantową jest jakimś piramidalnym błędnym kołem. Oto bowiem, żeby uznać, że pewne zjawiska w świecie zachodzą w sposób kompletnie losowy, musimy założyć, że... pewne zjawiska w świecie zachodzą w sposób kompletnie losowy. Chcąc wykazać kwantowy indeterminizm, musimy odwołać się do jakiegoś „źródła losowości” – czy to w zasadzie nieoznaczoności Heisenberga, czy to w kosmosie, czy też w naszych mózgach. Fizycy są zatem niczym baron Münchhausen, który rzekomo sam siebie wyciągnął za włosy z mokradła.

Fizycy, chcąc pozostać wiernymi metodologii właściwej ich dziedzinie, patrzą jednak na całą sprawę zupełnie inaczej. Silne korelacje pomiędzy cząstkami splątanymi są faktem naukowym, dowiedzonym niezależnie w wielu eksperymentach – i ten fakt domaga się wyjaśnienia. Najlepszym, jakim dysponujemy, jest mechanika kwantowa – z całym jej bagażem filozoficznym.

Pytanie, jakie natomiast mogą zadać fizycy, to: jak bardzo losowe muszą być ustawienia urządzeń pomiarowych, by zachodziło przewidziane przez mechanikę kwantową łamanie nierówności Bella?

Pytanie to postawiono dopiero niedawno (w 2012 r.) i okazało się, w wyniku badań teoretycznych prowadzonych w Zurychu, Barcelonie i Gdańsku, że – co zaskakujące – potrzeba jedynie bardzo słabej nieprzewidywalności, albo jak kto woli: wolnej woli. Wystarczyłaby tu jedynie moneta, której zachowania nikt i nic we wszechświecie nie może przewidzieć z prawdopodobieństwem większym niż 99 proc. (rzucając ją wielokrotnie i próbując przewidzieć wynik, każdy użytkownik lub automat zrobi błąd średnio raz na sto rzutów). Nie wiemy, czy takie źródła istnieją w przyrodzie (być może ludzki mózg ma w sobie właśnie jakąś dozę nieprzewidywalności tego typu, także na poziomie decyzyjnym). Jeśli jednak istnieje choćby jedno, i to dowolnie słabe takie źródło, wówczas możemy pokazać, że nierówność Bella jest łamana, a nawet, co więcej, wykorzystać ją do generowania losowości maksymalnej – czyli 50 proc. na 50 proc.

Fenomen kwantowego splątania – niezwykle silnych korelacji między odległymi cząstkami – jest niezrozumiały na gruncie naszej potocznej intuicji wywodzącej się ze świata makroskopowego, którego doświadczamy na co dzień. Einstein był przeświadczony, że ów brak zrozumienia jest chwilowy i wynika po prostu z niedoskonałości naszego opisu fundamentalnych praw fizyki. W świetle najnowszych badań taki pogląd filozoficzny, choć niewykluczony, staje się coraz trudniejszy do przyjęcia.

Wydaje się, że przyroda stawia nas przed wyrazistą alternatywą. Albo cały

świat, z nami samymi, jest całkowicie zdeterminowany, a wszelka rzekoma losowość zdarzeń jest jedynie złudzeniem fundowanym nam przez jakiegoś kartezyjańskiego demona, albo też mamy, choćby nawet bardzo słabiutką, „rozrzedzoną” wolną wolę, a obserwując świat, fizycznie go zmieniamy i potrafiemy poprzez mechanikę kwantową doprowadzić do zdarzeń zupełnie nieprzewidywalnych. *Tertium non datur*.

**PAWEŁ HORODECKI** jest profesorem fizyki.

**MICHAŁ ECKSTEIN** jest doktorem matematyki i fizykiem.

Obaj autorzy pracują w Krajowym Centrum Informatyki Kwantowej w Gdańsku.

Artykuł pochodzi z dodatku do „Tygodnika Powszechnego” „Wielkie Pytania: Przełomy w fizyce” (TP 13/2018). Piszą w nim także: Tomasz Miller o zmierzchu cząstek i triumfie niematerialnych pól, Sebastian Szybka – o nierozwiązanych problemach mechaniki klasycznej, Tomasz Płazak – o ciemnej materii; astrofizyk Nigel Mason opowiada o poszukiwaniu planet pozasłonecznych. To jeden z czterech dodatków poświęconych najciekawszym wątkom w historii nauk przyrodniczych – opublikowaliśmy także dodatki przełomach chemii, biologii i naukach o umyśle. Wszystkie dostępne są online i do pobrania pod adresami: [www.wielkiepytania.pl/WP07.pdf](http://www.wielkiepytania.pl/WP07.pdf) [www.wielkiepytania.pl/WP08.pdf](http://www.wielkiepytania.pl/WP08.pdf) [www.wielkiepytania.pl/WP09.pdf](http://www.wielkiepytania.pl/WP09.pdf) [www.wielkiepytania.pl/WP10.pdf](http://www.wielkiepytania.pl/WP10.pdf)



# Piękno równa się prawda

**TOMASZ MILLER**

**Jeżeli – podobnie jak uczynili starożytni – za istotę piękna uznamy symetrię, to współcześni fizycy staną się nie tylko poszukiwaczami prawdy – będą również estetami na skalę kosmiczną.**

Richard Feynman, genialny fizyk i wielki popularyzator nauki, w jednym z wywiadów wspominał, jak został kiedyś oskarżony przez swojego przyjaciela malarza o odzieranie świata z piękna. „Jako artysta wiem, jak piękny może być kwiat – usłyszał. – Ale ty, jako naukowiec, rozbierasz go na kawałki i wtedy kwiat staje się nijaki”.

Zdaniem Feynmana taki zarzut jest całkowicie chybiony. Dla niego wiedza o komórkowej budowie roślin, fizyce barw i widzenia czy o koewolucji okrytozalążkowych i owadów „tylko potęguje entuzjazm, tajemniczość i podziw, jaki żyjemy w stosunku do kwiatka. Tylko potęguje – podkreślił Feynman. – Nie mieści mi się w głowie, że mogłaby osłabiać”.

Nauki przyrodnicze nie tylko nie niszczą, ale wręcz wzbogacają estetyczne doznawanie świata.

Nie trzeba chyba nikogo przekonywać, że nauka i technologia otwierają nam oczy na coraz to nowe źródła zachwyty – wystarczy przywołać ikoniczne zdjęcie naszej planety „The Blue Marble” lub obrazy przesłane przez sondy Voyager czy teleskop Hubble’a. Ale Feynmanowi nie chodziło o piękno w oku patrzącego przez mikroskopy i teleskopy.

Miał on na myśli piękno Wszechświata widzianego przez pryzmat teorii naukowych. A także piękno i elegancję samych teorii.

Aby wyjaśnić, co łączy estetykę i zmatematyzowaną fizykę, musimy najpierw wrócić do samych początków zarówno matematyki, jak i systematycznej refleksji nad pięknem, a więc do Hellady sprzed ponad pięciu wieków przed Chrystusem.

## Krótką historia piękna

Być może Pitagoras z Samos nie był pierwszym, który zauważył, że dźwięki wydawane przez struny o długościach pozostających do siebie w stosunkach 2:1, 3:2 lub 4:3 przyjemnie współbrzmia. Na pewno jednak jako pierwszy dostrzegł w tym coś więcej niż ciekawostkę. To, że harmonią w muzyce rządzą proste stosunki liczbowe, było dla niego przejawem najgłębszej prawdy o świecie – że istotą piękna oraz zasadą natury jest proporcja i liczba. Dla Pitagorasa Wszechświat odznacza się porządkiem, ładem i jako taki zasługuje na miano Kosmosu (gr. *kosmein* – porządkować, ozdabiać). Zgodnie z pitagorejską filozofią piękno jest czymś obiektywnym i racjonalnym, zaś kluczem do jego zrozumienia, a w konsekwencji do zrozumienia Kosmosu, jest matematyka. Była to wizja iście rewolucyjna, o czym świadczy już choćby to, iż określenia „Kosmos”, „filozofia” i „matematyka” pochodzą właśnie od Pitagorasa i jego uczniów.

Półtora wieku później Platon wpisał pitagorejskie rozumienie piękna w ramy swojej teorii idei. Również dla niego piękno, jako idea manifestująca się w harmonii dzieł muzycznych oraz w proporcjach i symetriach brył geometrycznych (a także, co ciekawe, w moralnym postępowaniu), było nierozdzielnie związane z naturą świata. W końcu dobry Demiurg, tworząc Kosmos z pierwotnego Chaosu, na pewno kierował się poczuciem estetyki. A zatem, gdy skierujemy uwagę rozumu na geometryczne piękno, niezawodnie doprowadzi nas ono do prawdy. Dla Platona logiczne i nie-

uchronne było na przykład to, że Ziemia, inne ciała niebieskie oraz cały Wszechświat mają kształt sfery – najbardziej symetrycznej, a tym samym najdoskonalszej figury.

Tzw. Wielka Teoria Piękna bazująca na symetrii i proporcji była powszechnie uznawana przez niemal dwa tysiąclecia. Dopiero w połowie XVI w. wysunięto wobec niej pierwsze poważniejsze zastrzeżenia, a wśród barokowych myślicieli zaczął przeważać pogląd, że uroda wcale nie jest czymś obiektywnym, podobnie jak kształt czy ciężar, lecz istnieje jedynie subiektywnie. Jak jednak pisze ks. Michał Heller: „Wielka Teoria [Piękna] przetrwała – a nawet, powiedziałbym, rozwinęła się – w jednej tylko gałęzi sztuki – w fizyce teoretycznej”. Aby to pojąć, musimy przyjrzeć się specyficznemu rozumieniu symetrii w matematyce i fizyce.

## Matematyka w symetrii

Co to właściwie znaczy, że figura geometryczna odznacza się symetrią? Aby odpowiedzieć na to pytanie, spróbujmy rozstrzygnąć, która litera jest bardziej symetryczna: T czy H? Zauważmy najpierw, że obie te litery przerzucone w poziomie będą dalej sobą. Z drugiej strony, jeśli przierzucimy je w pionie, to jedynie H wyjdzie z tej operacji bez szwanku.

Operację, po której wykonaniu dany obiekt wygląda tak samo jak na początku, matematycy nazywają „symetrią” tego obiektu. Litera T ma tylko dwie symetrie – przerzucenie poziome oraz tzw. symetrię trywialną, czyli operację polegającą na... nierobieniu niczego (podobnie jak mnożenie przez 1, choć nic nie zmienia, też jest mnożeniem). Za to H ma aż cztery symetrie: trywialną, przerzucenia w poziomie i w pionie, a także obrót o 180 stopni (w płaszczyźnie kartki). Jako posiadająca więcej symetrii, H jest bardziej symetryczna niż T. *Quod erat demonstrandum*.

No dobrze, ale gdzie w tym wszystkim związek z fizyką? Otóż powyższa definicja symetrii daje się stosować nie tylko do figur geometrycznych. Słowo „obiekt” może w niej oznaczać na

przykład... teorię fizyczną.

Od czasów Newtona teorie fizyki przyjmują postać matematycznych struktur (przeważnie układów równań różniczkowych) wraz z zestawem reguł odnoszących je do tych aspektów rzeczywistości, które dana teoria ma opisywać (czy raczej: modelować). Zazwyczaj struktury te posiadają różnorakie symetrie. Załóżmy przykładowo, że chcemy przewidzieć ruch komety za pomocą równań Newtona. Musimy w tym celu wybrać sobie pewien układ współrzędnych, przy czym z fizycznego punktu widzenia wszystko jedno, gdzie umieścimy początek tego układu i jak zorientujemy jego osie – równania będą wyglądać zasadniczo tak samo. Oznacza to, że operacje polegające na przechodzeniu między różnymi (inercjalnymi) układami współrzędnych (na przykład przesunięcie początku układu współrzędnych o 200 kilometrów) są sy-

metriami równań Newtona. Podobną swobodę mamy z umiejscowieniem zera na osi czasu – wszak dla naszej komety nie ma znaczenia, czy dziś jest A.D. 2016, czy też rok 2769 *ab Urbe condita*.

Co zaskakujące, z istnienia tych prostych, by nie rzec: banalnych symetrii wynikają już tak fundamentalne prawa jak zasada zachowania pędu i energii! Mówi o tym tzw. twierdzenie Noether, przez wielu uważane za najpiękniejsze dzieło całej fizyki teoretycznej. Podkreślmy: źródłem jednych z najważniejszych zasad fizyki są symetrie obecne w przyrodzie, odzwierciedlane w matematycznej strukturze teorii fizycznej.

## Kryterium prawdy

Albert Einstein uważał, że dobra teoria fizyczna, obok zgodności z doświadczeniem, musi odznaczać się

„wewnętrznym pięknem”. Podobnie jak u Platona, dla autora teorii względności estetyka stanowiła jedno z kryteriów prawdziwości. Dostarczała też wskazówek w naukowych poszukiwaniach.

Ważną rolę, ponownie, odegrała tu matematyczna symetria. Tzw. zasada równoważności, którą Einstein uznał za „najszczęśliwszą myśl swojego życia” i która legła u podstaw jego teorii grawitacji, głosi w istocie, że wszystkie (nie tylko inercjalne) układy odniesienia są równoprawne. Żadne równanie fizyki klasycznej nie było wystarczająco symetryczne, by spełniać ten postulat – trzeba było poszukać w to miejsce innej struktury matematycznej. Einstein odnalazł ją w geometrii wielowymiarowych, zakrzywionych przestrzeni – podówczas bardzo nowoczesnej dziedzinie, znanej niemal wyłącznie matematykom. Dopiero przyjęcie, że przestrzeń i czas

Rafael. Szkoła ateńska



są aspektami głębszej, czterowymiarowej struktury geometrycznej – czasoprzestrzeni – pozwoliło spełnić zasadę równoważności oraz Einsteinowski wymóg piękna. A przy okazji zrewolucjonizować naszą wiedzę o Wszechświecie.

### Kwantowe symetrie

Symetria najbardziej spektakularną rolę odegrała (i wciąż odgrywa) w fizyce kwantowej. Gdy na początku lat 60. ubiegłego stulecia fizycy, obok elektronu, protonu i neutronu, znali już setki innych cząstek subatomowych – głównie tzw. hadronów – nie mogli się pogodzić z tym, że ta cała „menażeria” to cząstki faktycznie elementarne. Taka rozmaitość podstawowych składników materii była czymś skrajnie nieestetycznym. Fizyk Wolfgang Pauli żartował, iż gdyby wiedział wcześniej, że tak będzie, zostałby botanikiem. Tak jak niemal sto lat wcześniej Mendelejew, uczeni próbowali przynajmniej poukładać hadrony w tabele porządkujące ich własności. Udało się to częściowo, ale wciąż brakowało głębszej zasady, która z tego Chaosu uczyniłaby Kosmos.

Przełom nastąpił, gdy w 1961 r. fizycy Murray Gell-Mann i Juwal Ne’eman niezależnie od siebie zauważyli, że tabele mające porządkować hadrony przypominają diagramy sporządzane przez matematyków zajmujących się tzw. grupami Liego – subtelnymi strukturami, które norweski matematyk Marius Sophus Lie wyabstrahował z symetrii równań różniczkowych pod koniec XIX w. Uczeni wykazali, że jeśli tylko oddziaływania między hadronami mają symetrie zadane przez pewną szczególną grupę Liego, znaną jako SU(3), ich mnogość i własności stają się w pełni zrozumiałe, a wręcz konieczne. Mało tego, pewne czyste matematyczne cechy grupy SU(3) zasugerowały Gell-Mannowi (i, niezależnie, George’owi Zweigowi), że istnieją bardziej elementarne cząstki-cegiełki, z których zbudowane są wszystkie hadrony. W ten sposób zgłębianie matematycznej symetrii doprowadziło do odkrycia kwarków.

Model Gell-Manna i Zweiga przewidywał, że istnieją trzy rodzaje kwarków (oznaczane literami „u”, „d” i „s”) oraz dalsze trzy antykwarki. Poszczególne hadrony składały się w tym modelu albo z trzech kwarków (bariony), albo z trzech antykwarków (antybariony), albo też z pary kwark-antykwark (mezony). Przykładowo, proton to barion zbudowany z dwóch kwarków „u” i jednego kwarka „d”.

Inni fizycy dość zgodnie przyznawali, że grupa SU(3) pozwala w elegancki sposób ogarnąć hadronowy galimatias, ale w większości podchodzili sceptycznie do faktu istnienia kwarków, traktując je jako matematyczny artefakt. Wystarczyło jednak kilka lat, by zyskał on spektakularne potwierdzenie eksperymentalne – najpierw odkryto nowy, przewidziany przez Gell-Manna i Ne’emana hadron (tzw. barion  $\Omega^-$ ), a wkrótce potem doświadczenia przeprowadzone w akceleratorze SLAC udowodniły, że protony i neutrony rzeczywiście muszą się składać z trzech mniejszych cząstek.

Choć w latach 70. okazało się, że w przyrodzie istnieje nie trzy, a sześć kwarków (i tyleż antykwarków), a model budowy hadronów trzeba jeszcze wzbogacić o tzw. gluony, to teoria opisująca oddziaływania wszystkich powyższych cząstek – tzw. chromodynamika kwantowa – również bazuje na symetriach grupy SU(3).

Współczesną teorię cząstek elementarnych – tzw. Model Standardowy – a także niektóre z jego proponowanych rozszerzeń znanych jako „teorie wielkiej unifikacji” albo GUT-y (ang. Grand Unification Theories), można uważać za rozwinięcia idei Gell-Manna i Zweiga. Tak jak Einstein musiał znaleźć bardziej symetryczną strukturę matematyczną, aby jego teoria spełniała zasadę równoważności, tak dziś grupę SU(3) zastępuje się innymi, bogatszymi w symetrie obiektami, które mają objąć więcej (a najlepiej wszystkie) ze znanych oddziaływań.

Dzięki niedawnemu odkryciu bozonu Higgsa potwierdzono już istnienie wszystkich cząstek przewidywanych przez Model Standardowy. Tych przewidywanych przez GUT-y

szuka się w morzu danych gromadzonych przez akceleratory i teleskopy – jak dotychczas bez przekonujących rezultatów.

Być może nigdy ich nie znajdziemy. Być może nasze obecne sny o symetriach unifikacji są naiwne – niektóre GUT-y zostały już eksperymentalnie wykluczone. Być może się mylimy, podobnie jak Platon co do sferycznego Kosmosu lub jak Johannes Kepler, który za pomocą brył platońskich „dowiedł”, że nie istnieje więcej niż sześć znanych w XVI w. planet.

Jednego wszakże można być pewnym: podczas kolejnego przełomu w fizyce znów adekwatne okażą się wersy *Ody do greckiej urny* Johna Keatsa:

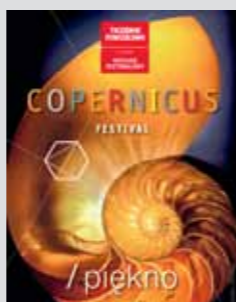
„Piękno jest prawdą, prawda pięknem” – oto

Co wiesz na ziemi, i co wiedzieć trzeba.

**TOMASZ MILLER** jest doktorem matematyki i fizykiem. Pracuje w Centrum Kopernika Badań Interdyscyplinarnych UJ i na Politechnice Warszawskiej.

Artykuł pochodzi z katalogu Copernicus Festival 2016. W katalogu również m.in.: Bartosz Brożek o mozolnej drodze wiodącej do prawdy i piękna, Łukasz Lamża o Julianie Barbourze, czyli fizyku, który ma dość czasu, Anna Brożek o symetrii w muzyce, Mateusz Hohol i Łukasz Kwiatek – o doborze płciowym, Bartek Kucharzyk o pięknie futbolu. Rozmawiamy o botanicznych rycinach Kluzjusza z Alicją i Bogdanem Zemankami oraz o związkach literatury i nauki z Johnem Banvillem.

Cały katalog dostępny jest online i do pobrania pod adresem: [www.wielkiepytania.pl/CF2016.pdf](http://www.wielkiepytania.pl/CF2016.pdf)



## Mądrzejsze, niż nam się wydaje

FRANS DE WAAL

**Wcale nie uważam, by procesy umysłowe u zwierząt były inne niż u nas. Jesteśmy małpami z niewielką warstwą nowości.**

**ŁUKASZ KWIATEK, BARTŁOMIEJ KUCHARZYK: Wie pan, jak to jest być szympansem?**

**FRANS DE WAAL:** Chyba nie tak trudno to sobie wyobrazić, na pewno łatwiej niż jak to jest być nietoperzem. Szympansy są od nas znacznie sprawniejsze fizycznie. Mają chwytne stopy – potrafią nimi robić rzeczy, których my sobie nawet nie wyobrażamy, wspinać się, gdzie tylko zechcą. Gdy my wejdziemy do jakiegoś pomieszczenia, widzimy po prostu powierzchnię, po której możemy się poruszać. Szympansia percepcja przestrzeni musi być nieco niż nasza, bo one mogą się dostać praktycznie wszędzie.

Ale poza tym nie ma jakichś wielkich różnic. Mają taki sam wzrok, słuch, tak samo jak my odczuwają zapachy, chorują na te same choroby. Muszą postrzegać świat podobnie jak my.

**A jak postrzegają ludzi? Co o nas wiedzą?**

Wyobrażam sobie, że stanowimy dla nich poważną zagadkę. Jesteśmy dziwnymi stworzeniami. Zdajemy się posiadać zdolności, których nie powinniśmy mieć. Na przykład mimo że czegoś nie widziałem, to jednak mogę o tym wiedzieć – bo ktoś mi o tym opowiedział. Nie przejmuję się jednak zbyt tym, co one o mnie wiedzą. Bardziej zajmuje mnie to, co ja o nich wiem – i czego jeszcze nie wiem.

**Jakie zachowanie małpy wprowadziło pana w największe zdumienie?**

Zwykle w takich przypadkach myśli się o jakimś użyciu narzędzi – na przykład o odłamaniu gałęzi, którą potem małpa wykorzysta do zdobycia poży-

wienia. Takich zachowań było mnóstwo. Ale chyba najbardziej zapadła mi w pamięć sytuacja, gdy poprosiłem pewną szympansicę, która właśnie urodziła, żeby pokazała mi swoje młode. Dziecko było odwrócone twarzą do niej. Ona jednak wyciągnęła do mnie ręce i obróciła swoje młode tak, bym widział jego twarz. Samica wykażała się czymś, co nazywamy teorią umysłu – zrozumiała bowiem, że chcę raczej zobaczyć twarz jej dziecka, a nie jego plecy.

**Wielu ludzi uważa, że trudno mówić o myśleniu bez języka. Małpy – jeżeli nie przeszły długiego treningu – nie posługują się symbolicznym językiem...**

Nie jestem przekonany, że język jest kluczowy do myślenia. Tak naprawdę nie ma na to wielu dowodów. Wiele z tego, co robią zwierzęta, przypomina zachowania ludzi – a one robią to bez języka. Język jest wspnianym narzędziem do przetłumaczenia twoich myśli – do komunikowania ich. Ale gdyby język był konieczny do myślenia, to chyba nie mielibyśmy aż tylu problemów, by się wysławiać, formułować nasze myśli w języku. Język wymaga myślenia, ale myślenie nie musi wymagać języka.

**A może język jest potrzebny do tego, by podejmować racjonalne decyzje? Pana zdaniem zwierzęta bywają racjonalne?**

Jest mnóstwo eksperymentów, które pokazują, że małpy tworzą plan i myślały o przyszłości. Czy planowanie czegoś na przyszłość to przykład myślenia racjonalnego? Czy myślenie o przyszłości wymaga języka albo jakiejś racjonalności?

Z racjonalnymi zachowaniami zwierząt mamy do czynienia na przykład w rozgrywkach politycznych szympansów. Szympansy podejmują takie same decyzje, jakie podejmują ludzie. Na przykład ludzie szukają sojuszników, którzy nie są ani zbyt słabi, ani zbyt silni. Jeżeli nie jestem w stanie zwyciężyć, zawierając sojusz z mniej potężnym partnerem, dogadam się z tym silniejszym. Ale jeżeli będę mógł stworzyć zwycięską koalicję z nico słabszym partnerem, to to zrobię, ponieważ będę miał więcej do powiedzenia w ramach naszego sojuszu. Szympansy zachowują się dokładnie tak samo. Jeżeli więc podziwiamy przebiegłość ludzi i nazywamy nasze postępowanie strategicznym myśleniem, to nie widzimy przeciwwskazań, by tak samo określać identyczne zachowanie szympansów.

**Wiemy, że szympansy, a nawet kapucynki, bardzo często używają kamiennych narzędzi. Powiedzieli pan, że te małpy wkroczyły w epokę kamienia?**

To raczej żartobliwe stwierdzenie. Gdy odkryto, że szympansy rzeczywiście posługują się kamiennymi narzędziami, zaczęto to kojarzyć z epoką kamienia, w której żyli prehistoryczni ludzie. Potem takie samo zjawisko zaobserwowano nawet u kapucynek. Nie sądzę jednak, że należy oczekiwać, iż szympansy czy kapucynki przeskoczą do następnej epoki. Nie ma znaczenia, czy ktoś posługuje się narzędziami z kamienia czy choćby gałęziami i patykami. Jedyna różnica jest taka, że kamienie się zachowują. Paleontolodzy uwielbiają kamienne narzędzia, bo takie mogą znaleźć, ale nie jest jasne, od jak dawna nasi przodkowie używali drewnianych narzędzi.

**Pytanie chyba jednak brzmi, co się stało, że tylko ludzie zbudowali cywilizację – skoro także małpy mają narzędzia i tworzą kulturę.**

Ale to akurat stało się bardzo niedawno. Gdy mówimy o cywilizacji, to w grę wchodzi pewnie jakieś 20.000 lat, gdy opanowaliśmy rolnictwo. Wcześniej mieliśmy bardzo proste na-

rzędzia i bardzo proste społeczności. Pewnie w połączeniu z językiem kultura stała się znacznie bardziej potężna niż ma to miejsce u innych naczelnych. Możemy u nich mówić o tradycjach kulturowych – np. jedna grupa szympanсів używa narzędzi kamiennych do rozłupywania orzechów palmowych, inna – drewnianych włóczni do polowania na mniejsze małpki – ale ze względu na brak języka nie ma u nich aż tak skutecznego przekazu kulturowego, jak u ludzi.

**Michael Tomasello, z którym dość często pan polemizuje, twierdzi, że to zdolność do naśladowania leży u podłoża naszej ewolucji kulturowej.**

Jakieś 15 lat temu Michael Tomasello rzeczywiście sugerował, że tym, co pozwoliło nam na ewolucję kulturową, była „prawdziwa imitacja”. Ale ta dyskusja właściwie wygasła, ponieważ jest wiele dowodów na imitację u różnych zwierząt, nie tylko małp, także u psów. Tomasello ma rację, gdy mówi, że dzięki ewolucji kulturowej staliśmy się kim jesteśmy, ale imitacja nie wyjaśnia wszelkich różnic pomiędzy ludźmi a innymi zwierzętami.

**Swoją dziedzinę badawczą określa pan jako „kognitywistykę**

**ewolucyjną”. Co to właściwie znaczy?**

Badania zdolności poznawczych zwierząt – to, czym ja się zajmuję – często określa się jako „psychologię zwierząt” (animal cognition), „kognitywistykę porównawczą” (comparative cognition) czy „etologię kognitywną” (cognitive ethology). Mam problem z używaniem każdego z tych określeń. „Etologia kognitywna” chyba jest najlepsza, ale większość ludzi nie wie już, czym jest etologia. „Kognitywistykę porównawczą” nie kojarzy się z ewolucją. „Psychologia zwierząt” sugeruje, że procesy umysłowe u zwierząt są inne niż u człowieka, a ja sądzę, że wcale tak nie jest. Dlatego wolę kognitywistykę ewolucyjną. To nie jest nowe pole badawcze – wielu uczonych zajmuje się tego rodzaju badaniami od dawna. To po prostu nowe określenie.

**Chodzi więc o podkreślenie ewolucyjnej ciągłości pomiędzy ludźmi a zwierzętami? Jeśli tak, to o ewolucyjnej ciągłości czego mówimy: poznania czy raczej zachowania?**

Jednego i drugiego. Ludzkie poznanie ma niewiele nowości. Mamy większe, potężniejsze mózgi, ale nie jestem pewien co takiego nowego nasz mózg robi. Weźmy na przykład pamięć –

chyba najlepiej zbadany element naszego umysłu. Możemy się szczycić naszą pamięcią, ale nie różni się ona jakoś drastycznie od pamięci, którą posiadają zwierzęta – choćby dlatego badamy pamięć u szczurów i tworzymy na tej podstawie modele, które pasują także do człowieka. Myślę, że to samo jest prawdą dla wielu innych zdolności poznawczych człowieka. Mamy czegoś więcej – ale to jest różnica ilościowa, a nie jakościowa. Poza językiem nie ma niczego, co jest fundamentalnie inne od tego, co występuje u zwierząt. Ale nawet gdy mówimy o języku, to trzeba pamiętać, że wielu badaczy twierdzi, że jeżeli rozbijesz go na bardziej fundamentalne elementy, to większość z tych elementów znajdziesz u różnych gatunków.

**A co z ciągłością ewolucyjną w zachowaniu? Pana zdaniem możemy wskazać ewolucyjne korzenie np. naszych zachowań moralnych?**

Moralność składa się z elementów, z których wiele dzielimy z innymi zwierzętami, choć ludzie z tych elementów składowych mogą czynić nieco inny użytek.

Nie wyobrażam sobie na przykład moralności bez empatii. Jeśli nie odczuwasz empatii, nie możesz być istotą

moralną, będziesz raczej psychopata. Z pozoru zachowywałbyś się jak istota moralna, ale w głębi serca byś taki nie był. Filozofowie pewnie zgodziliby się, że psychopaci nie są ludźmi moralnymi. Empatia, kooperacja, wzajemność, poczucie sprawiedliwości są zapewne kluczowe dla ludzkiej moralności. Uważam więc, że moralność jest zakorzeniona w tych podstawowych zdolnościach, które dzielimy z innymi naczelnymi czy wręcz innymi ssakami. Dopiero gdy dochodzimy do punktu, gdy mówimy o dobru i złu i tym, dlaczego coś jest naszym zdaniem dobre albo złe, gdy zaczynamy mówić o sumieniu, gdy internalizujemy normy moralne, to dopiero wtedy natrafiamy na coś, czego nie ma u zwierząt. To oczywiście bardzo ważny moment – zdaniem wielu definiujący moralność. Moje stanowisko formułuję zatem tak, że szympansy dokonują rozróżnień pomiędzy akceptowalnym i nieakceptowalnym zachowaniem, mogą więc stosować kary, ale nie jestem pewien, czy czynią bardziej abstrakcyjne rozróżnienia, na to co dobre albo złe. Nie wykluczałbym tego, ale nie mam pewności.

**W nauce toczy się dyskusja, czy język naturalny jest raczej kulturowym wynalazkiem – jakąś technologią ludzkości – czy jest zbiorem adaptacji biologicznych. To samo pytanie można zadać w kontekście moralności: czy jest ona wynalazkiem?**

Co do języka, to wiemy, że istnieje pewien przedział czasowy, w którym nauka języka jest możliwa – to mniej więcej pierwsze siedem lat życia. Dla mnie to argument za tym, że język to raczej adaptacja. Poza tym język jest uniwersalny, wszyscy ludzie posługują się językiem, nawet głuchoniemi komunikują się za pomocą spontanicznych gestów czy języka migowego.

**Jednak wszyscy ludzie, którzy komunikują się językowo, zostali wychowani w kulturze. Nie ma dzieci wychowanych poza ludzką kulturą, które posługują się językiem.**

To prawda, języka trzeba się nauczyć – w tym sensie jest uwarunkowany kul-

turowo. Ale jednak mamy całkowicie naturalne skłonności i zdolności do nauki języka. Małe dzieci próbują mówić na długo przed tym, jak potrafią wypowiedzieć poprawnie jakieś słowo. Również z tego powodu tak trudno nauczyć szympansy języka – one tych naturalnych zdolności i skłonności do językowej komunikacji nie mają. Dlatego twierdzą, że język jest czymś fundamentalnie biologicznym. Nawet jeśli te zdolności i skłonności muszą zostać ukształtowane przez kulturę.

Moralność postrzegam w ten sam sposób. Uważam, że mamy naturalne tendencje do zachowań moralnych, zaś kultura nadaje im dokładny kształt. Ale nie można mylić moralności z jakąś biologiczną regułą. Wolfgang Wickler, student Konrada Lorenza, napisał książkę „The Biology of the Ten Commandments” (Biologia dziesięciu przykazań). Próbował w niej, idąc zresztą tropem Lorenza, odnaleźć zestaw biologicznych reguł, które czynią z nas istoty moralne. To nie jest sposób, w jaki ja patrzę na moralność – ponieważ ona się ciągle zmienia. Na przykład w Stanach Zjednoczonych wielu ludzi obecnie akceptuje małżeństwa par homoseksualnych – a dwadzieścia lat temu prawie nikt się na nie nie zgadzał. Tak samo jest z paleniem marihuany, karą śmierci czy niewolnictwem. Gdyby moralność była jakimś biologicznym kodeksem, to nie mogłaby się zmieniać – przynajmniej nie aż tak.

**W swoich książkach ostro rozprawiał się pan z tym, co nazwał „teorią fasady” – sposobem myślenia o moralności jako o czymś, co zaprzecza ludzkiej naturze, o który podejrzewa Pan m.in. Richarda Dawkinsa. Być może jednak zwolennicy „teorii fasady” zgodziliby się z panem, że moralność ludzka posiada biologiczne korzenie, tylko jeszcze wyraźniej chcieli zaakcentować jej kulturowy komponent?**

Teoria fasady to pogląd już zarzucony. Jego zwolennicy postrzegali człowieka jako istotę samolubną i nastawioną na konkurencję. Twierdzili, że jeśli w człowieku jest coś miłego, to nie jest to szczerze. Co najwyżej możemy

chcieć sprawiać wrażenie uprzejmych, nie chcemy być mili dla samego bycia miłymi, tylko mamy ukryte nikczemne motywy. Teoria fasady właściwie przedstawiała nasz gatunek jako zbiorowość psychopatów, przeczyła możliwości istnienia szczerych tendencji altruistycznych. Jednak badania – głównie neuronaukowe – przekonują, że domyślnym nastawieniem człowieka jest kooperacja. Tak więc jeśli dwoje ludzi spotka się w jakiejś sytuacji, to pierwsze, co zrobią, to będą sobie chcieli pomóc i współpracować z sobą. Ale później może ich najść refleksja, że to nie musi być dla mnie całkowicie korzystne. Ludzie są więc określane jako istoty superkooperatywne. Dzięki takim odkryciom teoria fasady umarła. Moim wkładem w dyskusję było wykazanie, że podobne zachowania można spotkać u zwierząt. Nie tylko ludzie są z istoty nastawieni na współpracę, ale także wiele gatunków zwierząt.

**Czy u zwierząt to po prostu kooperacja, czy możemy mówić, że coś więcej? Jakaś cnota?**

Wiele zwierząt musi współpracować, żeby przetrwać – choćby po to, żeby polować, albo wręcz przeciwnie – chronić się przed drapieżnikami. U takich zwierząt spotykamy naturalne inklinacje do kooperacji. Oczywiście, one się zderzają z naturalnymi inklinacjami do zgarniania jak najwięcej dla siebie. Ale u ludzi występuje ten sam dylemat. Nic nie jest oczywiste. Nie jesteśmy całkowicie kooperatywni. Nie jesteśmy jak mrówki, które żyją w zbiorowości identycznej genetycznie. My jednak szacujemy koszty i korzyści związane ze współpracą albo zachowaniem samolubnym. To ciekawy dylemat, z którym ciągle się mierzymy.

**Czy inne emocje także powiązane są z moralnością?**

Ciekawą emocją jest wstręt. W literaturze naukowej można spotkać się z twierdzeniami, że wstręt jest emocją unikalną dla człowieka. To dziwaczne stwierdzenie, bo oczywiście wszystkie zwierzęta powinny odczuwać wstręt do rzeczy, których zjedzenie mogłoby im zaszkodzić. Widziałem niedawno eksperyment neuronaukowy, w którym



makakom podawano jedzenie, które im normalnie smakuje. Jednocześnie w ich mózgach stymulowano obszary wyspy, które wiążą się z odczuwaniem uczucia wstępu. Gdy makakom wkładano do ust na przykład orzeszki i zaczęto stymulować te obszary mózgu, to małpa je wypluwała, a jej twarz była wykrzywiona w obrzydzeniu. Jeszcze w innym eksperymencie przed makakami ustawiano orzeszka. Ale kładziono go albo na prawdziwej małpie odchody, albo na plastikową atrapę małpiej kupy, albo po prostu na plastikowym talerzyku. Co robiła małpa? Najpierw zjadała orzeszka z talerzyka. Następnie bardzo ostrożnie brała orzeszka z plastikowej atrapy i ostrożnie go zjadała. Większość małp w eksperymencie w ogóle nie dotykała orzeszka z prawdziwych odchodów. A jeśli już, to po długim czasie i nie zjadła go, zanim nie spróbowała go oczyścić.

Okazało się więc, że makaki odczuwają wstęt, wbrew temu, co niektórzy wypisują w książkach, że wstęt to emocja unikalna dla człowieka. Myślę, że to głupie stwierdzenie pojawia się właśnie dlatego, że ludzie twierdzą, że wstęt odgrywa istotną rolę w moralności. Moim zdaniem wstęt to bardzo stara ewolucyjnie emocja. U naczelnych różnych od człowieka można wyraźnie obserwować mimiczne wyrazy wstępu. Jeżeli ta emocja odgrywa rolę w moralności, to jest to kolejny element, który łączy ludzką moralność ze zwierzętami.

#### A co szympansy wiedzą o śmierci?

Myślę, że mają świadomość cudzej śmierci. Wiedzą, że śmierć jest nieodwracalna. W jednym z rezerwatów, w lesie, grupa bonobo natknęła się na jadowitego węża. Były wystraszone, krzyczały i piszczaly na niego. Wreszcie samica alfa – w społecznościach bonobo samice są przywódcami stada – wzięła gałąź i zaczęła okładać węża po głowie. Wreszcie go zabiła. Potem jeszcze przez jakiś czas się nad nim znęcała, ale po chwili młody bonobo podszedł do węża, chwycił go, założył sobie na szyję i zaczął chodzić po okolicy. Musiał więc wiedzieć, że to, co nie żyje, pozostanie nieżywe. Że nie wróci do życia. To samo wiedzą o śmierci innych małp. Gdy bonobo umiera, to



inne osobniki podchodzą do niego, próbują go poruszyć albo obudzić. Po jakimś czasie odpuszczają, jakby przekonywały się, że zmarł. I nagle ogarnia je smutek, wyraźnie widać, jak to na nie wpływa. Czy zdają sobie sprawę, że kiedyś to samo stanie się z nimi – to znaczy czy mają poczucie własnej śmiertelności? Nie wiem. Trudno powiedzieć. Byłoby logiczne, że zwierzę potrafi myśleć naprzód i ekstrapolować z takich zdarzeń, że je też czeka śmierć, ale jak moglibyśmy to wiedzieć na sto procent? Nie mam pojęcia, jak można by to przetestować.

#### Może gdyby przejawiały jakieś elementy rytuałów religijnych, to sugerowałoby, że odczuwają własną śmiertelność.

Niedawno była ciekawa dyskusja w tym temacie: nagrano szympansy wrzucające kamienie do dziupli w drzewie. To ciekawe zachowanie. Możliwe, że to były męskie demonstracje – ponieważ małpy uwielbiają robić hałas, ale to wymaga, by inne osobniki cię obserwowały, bo w innym przypadku robienie hałasu nie ma sensu. Nie wydaje mi się, żeby obserwacje mówiły coś na temat tego, czy te zachowania miały miejsce na oczach innych małp. Musielibyśmy więc wiedzieć więcej. W samej publikacji naukowej tego nie było, ale w mediach

pojawiły się spekulacje, że to jakieś religijne rytuały, ale wydaje mi się, że to za dużo powiedziane.

#### Jeden z pańskich eksperymentów zrobił furorę w Internecie. Jego nagranie odtworzono ponad 10 milionów razy.

To mój ulubiony eksperyment. Dwie kapucynki w klatkach nagradzaliśmy za to samo zadanie różnym jedzeniem – pierwszą plasterkiem ogórka (średnio przez nie lubianym), drugą winogronem (które uwielbiają). Gdy pierwsza z małp zobaczyła, że druga dostaje winogrono, oczekiwała, że też dostanie taką nagrodę. Dawaliśmy jej jednak ogórka, a ta wpadała w złość i rzucała w nas ogórkiem, który chwilę wcześniej – zanim zobaczyła, że lepiej potraktowaliśmy drugą małpę – był dla niej całkowicie akceptowalny.

Zrobiliśmy ten eksperyment, ponieważ odkryliśmy, że małpy zwracają uwagę na to, jak inna małpa zostanie potraktowana. Normalnie w fazie treningowej uczy się małpy, że za wykonanie zadania dostanie ona nagrodę. I jej zachowanie wyjaśnia się wyłącznie reakcją na nagrodę, częstotliwością otrzymywania nagrody i tak dalej. Taki sam eksperyment można zrobić ze szczurami – gdy naciśną dźwignię, dostają coś do zjedzenia. Nikt nie pyta, czy szczur zwraca uwagę na cokolwiek

poza własną nagrodę. Ale małpy przygotowywaliśmy do zadania parami, w dwóch osobnych klatkach i zauważyliśmy, że one uważnie patrzą, czy inna małpa nie dostaje więcej, a jeśli tak, to zdają się niezadowolone.

Gdy opublikowaliśmy nasze badania, wielu ludzi było zdenerwowanych. Nie mam pojęcia dlaczego zareagowali aż tak emocjonalnie. Może dlatego, że oni pracowali po prostu z pojedynczymi szczurami i nigdy o czymś takim nie pomyśleli, wydawało im się, że szczury reagują jedynie na własną nagrodę. Tymczasem podobne reakcje jak u kapucynek zaobserwowano u kilku innych gatunków, także takich, które nie należą do rzędu naczelnych. Zrobiliśmy wiele wariantów tego eksperymentu, wyniki zawsze były podobne, co pozwoliło nam snuć rozważania na temat ewolucyjnych źródeł poczucia sprawiedliwości u człowieka.

#### Jak pan reaguje na krytykę czy niechęć ze strony innych uczonych?

To bywa zabawne, ponieważ ludzie mają wiele uprzedzeń wobec zwierząt i ugruntowanych przekonań, jak bardzo się od nich różni. Patrzą na człowieka jako na kogoś oddzielnego od królestwa zwierząt. Ja z kolei mam bardzo wysoką opinię o szympanсах. I gdy czytam, że ktoś uważa jakieś zachowanie za wyłącznie ludzkie, to zabawnie jest mu udowodnić, jak bardzo się myli.

Moje pierwsze odkrycie dotyczyło tego, że szympansy godzą się po walce. Po stoczonej walce podchodzą do siebie, obejmują się i całują. Kiedy zaobserwowałem to zachowanie – w latach 70., gdy byłem jeszcze studentem – reakcja środowiska naukowego była raczej sceptyczna. Naukowcy postrzegali walkę tylko z jednej perspektywy, jako konflikt o to, kto jest górą. Nie zauważyli, że każda bójka zaburza relacje społeczne, które trzeba naprawić – godząc się ze swoim rywalem. Potem jednak podobne odkrycia dokonano u małp zwierzokształtnych, delfinów, słoni. Obecnie jest pewnie około 300 prac dokumentujących zjawisko godzenia się u wielu różnych gatunków zwierząt. To już nie jest żadna kontro-

wersja. Także ze sceptycyzmem spotykam się od wielu lat. Nie zwracam na niego uwagi.

#### W XX wieku odbyło się sporo eksperymentów polegających na wychowaniu małp w domu, w ludzkich rodzinach. Takie badania nadal się prowadzi?

W zasadzie już nie. Czemu? To po prostu bardzo trudne eksperymenty. Szympansy szybko rosną i stają się silniejsze niż ludzie. Już 3–4 letni szympanś bywa silniejszy niż dorosły mężczyzna. Nie można ich więc kontrolować. Czytałem niedawno ponownie książki osób, które takie eksperymenty prowadziły. One niemal zawsze kończyły się katastrofą. Małpy wywracały dom do góry nogami, atakowały ludzi. Nie swoich przybranych „rodziców” – ale ich gości czy przypadkowych przechodniów. Ostatecznie były więc zamykane w klatkach – co przeczyło całej idei eksperymentu. A w klatkach stawały się tak niebezpieczne, że nawet nie dało się do nich zbliżyć, więc były potem oddawane do laboratoriów czy zoo. W ogrodach zoologicznych miały zaś problem z akceptacją przez inne osobniki – ponieważ nie przypominały zwykłych szympansov, tylko bardziej ludzi. Takie eksperymenty dobrze funkcjonują tylko przez kilka lat. Pewnie widzieliście film „Projekt Nim” – tam wszystko poszło całkowicie źle.

#### Jak wyglądają pańskie relacje z szympansamami? Przyjaźni się pan z nimi?

Nie traktujemy szympansov czy bonobo jak zwierzątek domowych. Nie wychodzimy z nimi nigdzie – nie moglibyśmy tego zrobić, zresztą wcale na tym nam nie zależy. Oczywiście, nie musimy przestrzegać aż tak skrajnych reguł jak w przypadku pracy terenowej, gdzie w ogóle nie powinieliśmy w żaden sposób niepokoić zwierząt. My je trzymamy w niewoli, więc nie spełniamy aż tak rygorystycznych kryteriów, ale nie chcemy na nie wpływać za bardzo. Pozwalamy im wychowywać swoje potomstwo, tworzyć własne społeczności.

W zoo w Arnhem żyła szympanśica o imieniu Mama, która niedawno zmarła. Miała 59 lat. Zawsze mnie roz-



poznawała, gdy ją odwiedzałem. Iskrałem ją, rozmawiałem z nią. To jasne, że budujesz więc z nimi relacje, ale nie aż tak bliskie, żeby nazwać je przyjaźnią, ponieważ nie mieszkasz z nimi stale.

#### A z ich strony jak to wygląda – czy są np. wobec Pana szczerze?

Czy są szczerze? Cieszę się, że pracuję ze zwierzętami, bo nie muszę sobie zwracać głowy kwestionariuszami. Psychologowie dają ludziom do wypełnienia ankiety i wyciągają wnioski z odpowiedzi, podczas gdy ludzie kłamią non stop. Może nawet nie robią tego świadomie – ludzie często nie wiedzą, dlaczego coś robią. Po prostu podają odpowiedź, w którą wierzą. Ja tam nie wierzę w nic, co ludzie do mnie mówią. Na szczęście zwierzęta nie potrafią wypełniać ankiet.

Prof. **FRANS DEWAAL** jest holendersko-amerykańskim prymatologiem i etologiem, zajmuje się zdolnościami poznawczymi i prospołecznymi zachowaniami zwierząt, ich altruizmem, umiejętnością okazywania uczuć, moralnością. Pracuje na Emory University w Atlancie. Autor wielu książek, m.in. *Bonobo i ateista, Małpa w każdym z nas*, ostatnio opublikował *Bystre zwierzę* (wyd. polskie 2016).

Skrócona wersja tego wywiadu ukazała się w dodatku do „Tygodnika Powszechnego” „Wielkie Pytania: Człowiek a zwierzę”, TP 41/2016.

# Możliwości i granice neurobiologii

**JERZY VETULANI**

**Neurobiologia, jak najchętniej na polski tłumacząc neuroscience, to nauka młoda, dynamiczna i fascynująca, odkrywająca nowe światy, zmieniająca nasze spojrzenie na świat i na samych siebie.**

Jej błyskawiczny rozwój umożliwił niezwykle szybki postęp technologiczny, dzięki któremu rzeczy, uważane za absolutnie niewykonalne jeszcze kilka dekad temu, prześcignęły pomysły wspaniałych przecieź, wizjonerskich autorów science fiction z połowy zeszłego stulecia.

Z jednej strony postęp neurobiologii umożliwił badania redukcjonistyczne na poziomie molekularnym i submolekularnym. Poznaliśmy subtelne struktury związane z funkcjami neuronów i procesy biochemiczne i elektrochemiczne realizujące te funkcje. Dowiedzieliśmy się jak neurony się tworzą, rozwijają, zmieniają pod wpływem środowiska, jakie mechanizmy powodują ich różnicowanie i wędrowanie po powstaniu we właściwe dla nich miejsca w mózgu. Zdobyliśmy też wiedzę o tym, co utrzymuje neurony w pełni sprawności, pozwalając im funkcjonować przez dziesiątki lat. Wreszcie poznaliśmy drogi, którymi neurony dochodzą do końca swych dni, czy to w wyniku gwałtownej, dramatycznej śmierci nekrotycznej, czy też na drodze programowanego przez geny łagodnego umierania w procesie apoptozy. Wiedząc, co neuronom szkodzi, a co pomaga, możemy się pokusić o rozwijanie metod pozwalających na ich dłuższe i sprawniejsze funkcjonowanie.

## Synapsy i drgawki Dostojewskiego

Neurobiologia pozwala nam też poznać kolejne, coraz wyższe szczeble funkcjonowania układu nerwowego.

W pierwszym rzędzie pozwoliła nam poznać, w jaki sposób neurony informują się wzajemnie, w jaki sposób aktywność generowana w jednej komórce przenosi się na drugą. Poznaliśmy wiele szczegółów budowy połączeń między neuronami – synaps, a także nauczyliśmy się, jak na poziomie synaps manipulować przekazywaniem sygnału, potęgować go lub hamować za pomocą substancji chemicznych, pełniących rolę leków, lub trucizn (często w zależności od dawki). Zaczynamy również symulować działanie złożonych sieci neuronalnych metodami komputerowymi, ale równocześnie, dzięki technikom neuroobrazowania, możemy obserwować działania całych realnych sieci neuronalnych i modyfikować wydajność wybranych ich połączeń, jak to się dzieje w procesie uczenia się. Wiemy też, a właściwie zaczynamy poznawać, jak neurony i ich sieci tworzą obwody funkcjonalne w mózgu. Jeżeli do niedawna byliśmy przekonani, że przyczyną zasadniczą większości chorób psychicznych były defekty przekazywania sygnałów w synapsach (możliwe często do korygowania lekami psychotropowymi), obecnie zaczynamy przyczyn chorób upatrywać nie tyle w ogólnym deficycie transmisji synaptycznej, ale w lokalnych, określonych uszkodzeniach sterujących mózgiem obwodów neuronalnych, które można korygować technikami neurochirurgicznymi, zwłaszcza poprzez głęboką stymulację określonych obszarów mózgu przez wszczepione tam elektrody.

Techniki neuroobrazowania, dzięki którym widzimy na bieżąco, które

okolice mózgu się aktywują przy jakich czynnościach (fizycznych i psychicznych), pozwoliły nam na usiłowania znalezienia neurobiologicznych podstaw najwyższych czynności naszego mózgu, których badanie było jeszcze trzydzieści lat temu zarezerwowane dla filozofów i teologów. Nawet tak wysublimowane procesy, jak ekstazy religijne potrafimy łączyć z określonymi strukturami mózgu (w tym wypadku z korą wyspową, której aktywność napadowa towarzyszy – lub generuje – przeżycia mistyczne, występujące w czasie tak zwanych drgawek Dostojewskiego).

## Organ przeżycia

Mózg, który funkcjonalnie jest organem służącym do przeżycia osobnika i umożliwienia mu przekazania własnych genów w następne pokolenia, zarządza właściwie wszystkim, prawie wszystkie nasze czynności życiowe są więc związane z kontekstem neurobiologicznym. Nie tylko poznanie i emocje, ale także czynności niższego rzędu, takie jak krążenie krwi, wydalanie moczu, perystaltyka jelit czy orgazmy, są sterowane przez układ nerwowy. Poznajemy też coraz lepiej neurobiologiczne podstawy funkcjonowania społecznego. Stosunkowo niedawno odkryto system neuronów w mózgu umożliwiający rezonans naszych układów motorycznych z motoryką osób znajdujących się z nami w kontakcie wzrokowym. Jest to system neuronów lustrzanych, dzięki któremu automatycznie imitujemy liczne ruchy obserwowane u innych, w tym ruchy mimiczne – dzięki neuronom lustrzanym automatycznie odpowiadamy uśmiechem na uśmiech.

Ten system, według jednej z teorii, umożliwia nam zrozumienie stanu emocjonalnego innych osób, co jest rzeczą pierwszorzędną w kontaktach w grupie. Ale poza umiejętnością wczucia się w emocje innych potrafimy także wczuć się w tok rozumowania innych i zgadywać ich myśli – posiadamy coś, co nazywamy teorią umysłu. Klasyczną sytuację, w której dochodzi do maksymalnego uruchamiania tej funkcji jest pojedynek sza-



Jerzy Vetulani podczas wystąpienia na TEDx Kraków 2011

chistów, ale jak często teorię umysłu wykorzystujemy w czasie rozmowy z szefem. Badania neuroobrazowania pozwalają nam rozpoznać struktury mózgu zaangażowane w teorię umysłu. Blokując odpowiednie miejsce – jest to złącze pomiędzy korą ciemieniową a skroniową – przy pomocy przezczaszkowego drażnienia silnym polem magnetycznym możemy na czas tej stymulacji pozbawić badanego teorii umysłu. W tym stanie traci on na przykład możliwość wydawania ocen moralnych, gdyż do oceny czyjegoś zachowania musimy wiedzieć, co ocenianym powodowało.

## Niewiadome

Jakież możliwości stoją przed neurobiologią? Wydaje się, że olbrzymie, ale trudno przewidzieć te, których jeszcze nie znamy. Polem badania nauki nie są bowiem poszczególne dziedziny wiedzy. Przedmiotem nauki jest niewiadome. Poważne odkrycia naukowe to często dzieło przypadku, trafiającego na wykształcony umysł badacza. Pewno po dziś dzień nie wiedzielibyśmy nic o neuronach lustrzanych i nie podejrzewali ich istnienia, gdyby w laboratorium Giacomo Rizzolattiego pewien uczonek odwiedzający kolegę nie chwycił machinalnie w palce orzeszka, który miała chwycić właśnie badana małpa.

Ogólnie można tylko założyć, że te ogromne potencjalne możliwości neurobiologii leżą w dwóch dziedzinach – czystego poznania oraz praktycznego wprowadzenia w życie odkryć tej nauki. W tej drugiej dziedzinie mamy fenomenalne sukcesy: osoby sparaliżowane, myślą sterujące komputerem, a przez to całym swoim otoczeniem, osoby, które po utracie wzroku z zaimplantowanymi sztucznymi siatkówkami mogą prowadzić samochód, mówi się o obrazowaniu właśnie śnionych snów na ekranie monitora, przy pomocy techniki tomografii pozytonowej, a więc wejściu w naprawdę najintymniejsze sfery świadomości przez obserwatora z zewnątrz.

I w tym miejscu dochodzimy do zagrożenia – do potencjalnej ciemnej strony zastosowań neurobiologii. Możliwość czytania w myślach innych, tworzenie superdetektorów kłamstwa, przewidywanie, czy dziecko w przyszłości stanie się geniuszem czy psychopatą to jeszcze niestwierdzone, ale nie niemożliwe do zastosowania efekty rozwoju neurosciences.

Ale czy zawsze bezpieczne? Nie ma sensu przytaczać tu wizji wielkich twórców literatury sci-fi, jak Asimova czy Lema, ale niedawno wysłuchałem doskonałego referatu profesora Leszka Kaczmarka, opowiadającego o genie dicer, którego nokaut u dojrzałej myszy powodował najpierw silny wzrost

kolców synaptycznych (miejsz osadzanie się synaps) powodujący znaczny wzrost funkcji kognitywnych, a następnie doprowadzał do śmierci neuronów. To zupełnie jak w „Kwiatach dla Algernona” – słynnym opowiadaniu Daniela Keyesa sprzed ponad pół wieku.

A inne czarne wizje. Najłatwiej sięgnąć tu do pisanej na poważnie książki zmarłego niespełna trzy miesiące temu José Delgado o społeczeństwie psychocywilizacyjnym. Delgado stosował implanty elektroniczne działające na nagradzające i awersyjne okolice podkorowe u zwierząt i aktywując je drogą radiową mógł kierować ich zachowaniem. Szczególnie spektakularne były pokazy tych implantów wszczepionych bykom bojowym (Delgado był Hiszpanem). W książce Delgado pisze o zaletach stosowania takich implantów u ludzi, aby modyfikować ich zachowania, zwłaszcza, jeżeli zachowują się, z punktu widzenia władz, niepoprawnie.

Najbardziej niepokojącym pytaniem jest to, czy zastosowanie neurobiologii do psychocywilizowania społeczeństwa leży już poza granicami jej możliwości, czy jednak w możliwości tej granicach?

Tekst opublikowany w 2011 r. w serwisie [www.granicenauki.pl](http://www.granicenauki.pl).

Prof. **JERZY VETULANI** (1936–2017) był neurobiologiem i psychofarmakologiem oraz popularyzatorem nauki. Przez trzydzieści lat kierował Zakładem Biochemii Mózgu w Instytucie Farmakologii PAN. Był redaktorem naczelnym czasopisma „Wszechświat” i autor bloga „Piękno neurobiologii” [www.vetulani.wordpress.com](http://www.vetulani.wordpress.com). Związany z Centrum Kopernika od samego początku, autor wielu wykładów i uczestnik licznych dyskusji, których nagrania dostępne są pod adresem: [www.wielkiepytania.pl/vetulani](http://www.wielkiepytania.pl/vetulani).

Na platformie Copernicus College można wziąć udział w kursie „Neurobiologia i życie”, przygotowanym przez prof. Vetulaniego: [www.copernicuscollege.pl/kursy/neurobiologia-i-zycie](http://www.copernicuscollege.pl/kursy/neurobiologia-i-zycie)



# Gdy rozum śpi

**JERZY STELMACH**

**Uśpienie lub wyłączenie rozumu sprzyja „budzeniu się demonów”. Mówiąc bardziej nowocześnie – powstawaniu emocji negatywnych.**

Nie samymi emocjami negatywnymi chcę się jednak tutaj zająć, lecz ich pochodzeniem, czyli rezydentem. W moim przekonaniu nie da się bowiem sensownie dyskutować kwestii emocji negatywnych, nie wyjaśniając wcześniej natury fenomenu określanego właśnie mianem „rezydentem”.

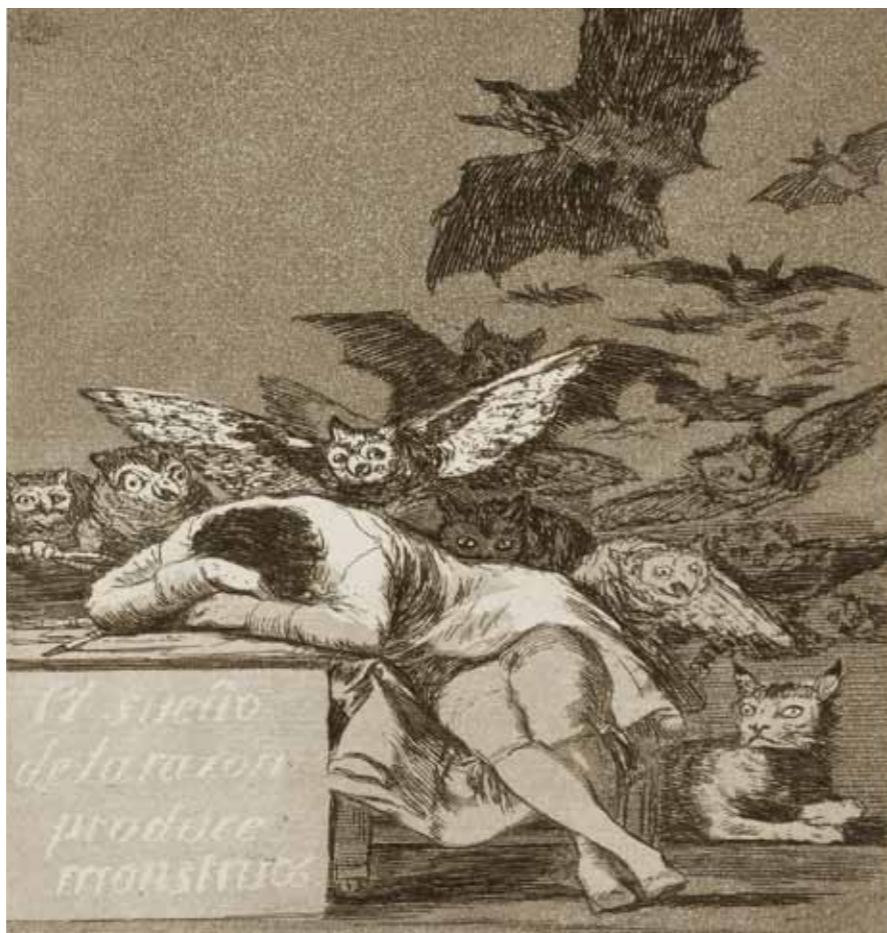
Zacznijmy od samego pojęcia. Termin „rezydent” niby jest znany i znajduje się w powszechnym użyciu, jednak z jego doprecyzowaniem mamy zwykle spore trudności. Okazuje się, że nie zawsze nasze intuicje są w tym względzie spójne i jednoznaczne. I tak najczęściej pojęcie rezydentem było związane z pewnego typu przeżyciami psychicznymi oznaczającymi silne emocje negatywne. Rzadziej mówiono o rezydentem jako specyficznym stanie świadomości lub umysłu. Próbowano wreszcie zdefiniować rezydentem jako źródło określonych postaw lub przekonań moralnych, czy też jako źródło szczególnego typu wartości lub sądów normatywnych. Jak widać, związane z rezydentem intuicje odsyłają nas do z gruntu różnych kategorii, takich jak przeżycia psychiczne, stany świadomości lub umysłu, postawy, przekonania, wartości oraz oceny i normy. Wrzucanie ich do jednego ontologicznego worka jest oczywiście nieuprawnione. Przeciwnicy nadawania rezydentemowi – w szczególności w debacie na temat źródeł moralności – nadmiernego znaczenia często zresztą zwracają na to uwagę i zapewne mają w tym przypadku rację.

O „AFEKTACH” rozumianych jako „bezrozumne poruszenia duszy” mówili już stoicy. Ich zdaniem źródłem moralnego zła są, silniejsze od rozumu,

afekty (rozumiane jako namiętności lub popędy). Wedle Zenona z Kitium istnieją cztery takie zasadnicze afekty: zawiść, pożądlliwość (te afekty powodują, że zabiegamy o rzekome dobra) oraz smutek i obawa (to z kolei afekty stroniące od rzekomego zła). W podobny sposób pojęcie to było rozumiane we współczesnej filozofii, najpierw przez Fryderyka Nietzschego, a potem przez Maksa Schelera. We wszystkich ujęciach, zarówno tych dawniejszych, jak i współczesnych, rezydentem oznaczał przede wszystkim jednak emocję negatywną, a zatem pewien rodzaj indywidualnego przeżycia psy-

chicznego. Przynajmniej więc na początku nie interpretowano tego pojęcia fenomenologicznie (jako pewnego stanu świadomości). Ten wymiar interpretacji pojawi się dopiero u Schelera.

Termin „rezydent” zostaje wprowadzony do języka współczesnej filozofii przez Nietzschego dla wyjaśnienia pochodzenia sądów o wartościach moralnych. Rezydentem jest dla niego emocją negatywną, ekspresją wrogości, najczęściej ukrytej, emocją reaktywną i obronną, wynikającą ze słabości i zarazem niemożności czynnego zareagowania na doznane krzywdy. Podkreśliłbym, że na krzywdy rzeczywiste lub rzekome. Jest to stan psychiczny, który może na stałe określić stosunek człowieka do świata, a nie tylko wpływa na poszczególne zachowania czy wartościowania. Rezydentem wreszcie jest emocją obejmującą inne emocje negatywne, takie jak nienawiść, żądze zemsty, zawiść czy złośliwość. Oparta na rezydentem moralność, również prawo, charakteryzuje się tym, że nie tyle ma odmienić i udoskonalić nas samych, lecz ma służyć potępieniu



F. Goya, *Gdy rozum śpi, budzą się upiory*

i kontroli tych wszystkich, którzy do określonej wspólnoty aksjologicznej już nie należą. Wzorcowym przypadkiem jest dla Nietzschego moralność chrześcijańska i mieszczańska. W „Genealogii moralności” Nietzsche rozróżnia moralność panów i niewolników. Pierwsza opiera się na sile, gdzie „dobry” znaczy potężny, bogaty, zdrowy, ta druga zaś chce bronić tego, co liche, marne, słabe i brzydkie.

SCHELER, dystansując się od dokonanej przez Nietzschego interpretacji rezydentem, która jest jego zdaniem zbyt techniczna, z czym się nie zgadzam, sięga najpierw do znaczeń, jakie pojęciu rezydentem nadawane są w potocznym języku francuskim. Wyróżnia dwa takie znaczenia. Wedle pierwszego będzie chodzić o utrwalony w naszej psychice powtarzający się nawrót przeżywania określonej reakcji emocjonalnej, wymierzonej przeciwko drugiemu człowiekowi, dzięki czemu emocja ta się pogłębia i, wykraczając coraz bardziej poza sferę ekspresji oraz działań danej osoby, przenika do samego jądra jej osobowości. Wedle drugiego z tych znaczeń rezydentem to emocja ujemna, czyli taka, która kryje odruch wrogości. Podobne znaczenie w języku niemieckim miałoby słowo „Groll”, czyli uraza. Wrogość (uraza) będzie natomiast wyrażać się w przenikającym duszę ludzką ponurym, uporczywym gniewie. Scheler nie zgadza się z Nietzsche, że chrześcijaństwo jest najbardziej wyrafinowanym produktem rezydentem. Są natomiast nimi, jego zdaniem, moralność mieszczańska, wyprane z wartości chrześcijańskich idee humanitaryzmu, komunizm, socjalizm, antysemityzm oraz utylitaryzm. Doktryny te powstały z „impotencji moralnej” i przekształciły trudno dostępne wartości w wartości zbyteczne lub zgoła złe. Człowiek podlegający działaniu rezydentem zatruwa (fałszuje) wartości, te wszystkie, których z własnej niemocy nie może zdobyć, uznając je w końcu za pozbawione sensu i znaczenia. Istota rezydentem wyraża się w krytyce wszystkiego, czego nie posiadamy, potępianiu innych, a równocześnie porównywaniu się z nimi. Ludzie dzia-

łający pod wpływem tego typu emocji chętnie utożsamiają wartości z własnymi pragnieniami oraz wolą większości, a dobrą wolę z wolą gatunku. Charakterystyczny dla rezydentem jest bowiem zarówno „doraźny utylitaryzm”, jak i „instynkt stadny”.

JESZCZE KILKA KWESTII związanych z moim rozumieniem rezydentem. Przede wszystkim uważam, że rezydentem nie jest wrodzoną dyspozycją psychiczną człowieka. W szczególności nie może być mowy o żadnych uwarunkowaniach genetycznych. Siła ujawnianych emocji negatywnych będzie wprawdzie zależeć od pewnych indywidualnych cech (predispozycji) człowieka, ale także od szeregu innych czynników związanych z kulturą, moralnością, panującym systemem politycznym, sytuacją ekonomiczną jednostki i społeczności, w której ta jednostka żyje. Chcę tym samym dobitnie podkreślić, że nikt nie rodzi się ani „panem”, ani „niewolnikiem”. „Niewolnikami” stajemy się z własnego, opartego na negatywnych emocjach wyboru. Wyboru, w którym nie ograniczamy się do rezygnacji z dążenia do pewnych celów, ze starań stania się doskonalszym – do takiej rezygnacji ostatecznie zawsze mamy prawo; lecz z takiego wyboru, którego konsekwencją jest szukanie winnych własnej przegranej, obciążanie odpowiedzialnością za życiowe niepowodzenia tych wszystkich, którym się lepiej powiodło, silniejszych, psychicznie i intelektualnie bardziej wydolnych. Obwiniając innych za własne porażki, nieuchronnie wkraczamy w świat emocji negatywnych, w świat rezydentem, urazów i nienawiści.

Warto jeszcze zwrócić uwagę na paradoks związany z fenomenem rezydentem. Jakkolwiek rezydentem jest przeżyciem psychicznym indywidualnego człowieka, to równocześnie najpełniej ujawnia się w stadzie. Charakterystyczny dla rezydentem jest bowiem właśnie instynkt stadny, na który zwracał już uwagę Scheler. Jednostka ma silną potrzebę „ukrycia się” w stadzie, znalezienia alibi dla własnej niegodziwości. Dlatego zło zakorzenione w indywidualnym człowieku

swoją pełnię uzyskuje właśnie na poziomie zbiorowości. Instytucje, wszelkie zorganizowane wspólnoty i zbiorowości dają jednostce wspomniane alibi, umożliwiając w zasadzie nieograniczone praktykowanie zła, które nie dość, że staje się powszechnie dostępne, to jeszcze jest zwykle bezkarne.

Siła rezydentem jest zmienna. Może oddziaływać tylko na doznającego określonych emocji negatywnych, zatruwając mu życie, może również na innych, doprowadzając w skrajnych przypadkach do zniszczenia całej wspólnoty lub zbiorowości.

UWOLNIENIE SIĘ od rezydentem, od emocji negatywnych jest możliwe, lecz jest to zwykle proces długotrwały. Oznacza ciągłą kontrolę własnych emocji, motywów i intencji, nieustanne kształcenie własnego rozumu, a zwłaszcza jego zdolności krytycznych. Jest stałym wysiłkiem intelektualnym, moralnym i biologicznym bycia lepszym, mówiąc inaczej, bycia silniejszym i wytworniejszym.

Prof. **JERZY STELMACH** jest filozofem prawa, znawcą i kolekcjonerem sztuki. Kieruje Katedrą Filozofii Prawa i Etyki Prawniczej na WPIA UJ. Doktor honoris causa uniwersytetów w Heidelbergu i Augsburgu.

Artykuł pochodzi z dodatku do „Tygodnika Powszechnego” „Wielkie Pytania: Rozum i emocje” (TP 22/2017), który poświęciliśmy rewolucji afektywnej w naukach o umyśle. W dodatku również m.in.: Magdalena Śmieja o inteligencji emocjonalnej, Magdalena Matyjek o autyzmie, Wojciech Załuski o kłopotach z empatią i potrzebie etyki opartej na rozumie, Bartosz Brożek o świecie wypranym z emocji, a także rozmowa z Luisem Pessoa, o integracji poznania i emocji.



# Wpływ Michała Hellera na globalne ocieplenie

ŁUKASZ LAMŻA

Analiza matematyczna zaprezentowana z okazji jego  $8 \times 10^1$  urodzin.

*Światu należy przypisać cechę, dzięki której szczególnie skutecznie można go badać za pomocą metody matematycznej.*

Michał Heller

Heller wydał  $6,5 \times 10^1$  książek, których łączny nakład przekracza  $10^6$  egzemplarzy. Liczba napisanych przez niego artykułów, wraz z krótkimi komentarzami i wypowiedziami, wykładami prasowymi itd., jest trudna do oszacowania, ale wynosi prawdopodobnie  $N \times 10^3$ , gdzie  $N$  należy do zbioru  $\{1, 2, \dots, 9\}$ . Heller wygłosił podobną liczbę wykładów publicznych; na niektórych liczba uczestników sięga  $10^4$ . Jego filmy na YouTube obejrzało na dziś ok.  $5 \times 10^5$  osób. Można oszacować, że całkowita liczba osób, których układ nerwowy został pobudzony przez Hellera, wynosi z dokładnością do rzędu wielkości  $1 \times 10^7$  i rośnie corocznie o  $5 \times 10^5$ . To sporo ciepła.

Mózg ludzki pochłania w stanie spoczynku ok. 20% całkowitej energii wyprodukowanej przez organizm. Dla podstawowego tempa metabolizmu (BMR), wynoszącego 1500 „kalorii” (formalnie kilokalorii) na dobę, oznacza to ok. 12,5 kcal na godzinę na mózg. Wedle badań laboratoryjnych intensywne myślenie podnosi tempo metabolizmu mózgowego o (zaledwie!) ok. 1%. Można swobodnie przyjąć, że rozmyślanie nad filozofią powoduje wzrost o 1,5%, zaś rozmyślanie nad słowami Hellera – o 2%. Przyjmijmy konserwatywnie – dla uproszczenia zagadnienia – że każda osoba natrafiająca na słowa Hellera poświęca im 5 godzin swojego życia.

Uśrednimy w ten sposób wkład od osób, dla których kontakt ten ogra-

niczył się do kilkuminutowego filmu na YouTube oglądanego w przerwie meczu, z wkładem od wielotygodniowych zmagani innych osób z książką „Teoretyczne podstawy kosmologii. Wprowadzenie do globalnej struktury czasoprzestrzeni” (PWN 1988) lub też znanym fenomenem, jakim jest trwający całe życie, nieustający wpływ Hellera na daną osobę. 5 godzin takiej dodatkowej pracy mózgowej przelicza się na 1,25 kcal.

Całkowita ilość energii wyprodukowana przez mózgi rozmyślające nad słowami Hellera wynosi więc sumarycznie  $1 \times 10^7 \times 1,25$  kcal, czyli 12,5 mln kcal, zaś corocznie wyzwolonych zostaje 625 tys. dodatkowych kcal, czyli 71 kcal na godzinę.

To odpowiednik jednego jajka ugotowanego na twardo! Co godzinę! Co ciekawsze, 71 kcal/h to ponad pięciokrotnie więcej niż 12,5 kcal/h, czyli podane wyżej zapotrzebowanie energetyczne mózgu. Myśl Hellera wzbogaca więc stale glob ziemski o ekwiwalent ponad pięciu dodatkowych intensywnie myślących mózgów.

W przeliczeniu na jednostki stosowane zwyczajowo w naukach o Ziemi, 71 kcal na godzinę odpowiada 82,5 watom. Ciepło wygenerowane wewnątrz czaszki jest rozprowadzane po organizmie i ostatecznie tracone, dołączając do całkowitego budżetu energetycznego powierzchni Ziemi. Obecnie budżet ten jest niezrównoważony, więcej energii jest pozyskiwanej niż traconej (skutek określany jest zwykle jako globalne ocieplenie). Wielkość tej nierównowagi oszacowuje się na  $0,6 \text{ W/m}^2$ , czyli  $3,1 \times 10^{14} \text{ W}$ , co wywołuje wzrost średniej temperatury powierzchni Ziemi o ok.  $0,15^\circ\text{C}/10 \text{ lat}$ .

Wpływ Hellera na globalne ocieplenie wynosi więc  $4 \times 10^{-14} \text{ }^\circ\text{C}$  na dekadę.

Heller generuje oczywiście ciepło na liczne dodatkowe sposoby, których szczegółowe wymienienie wykracza poza ramy tego artykułu, a być może również poza ramy jakiegokolwiek artykułu. Interesująca zwłaszcza jest kwestia wpływu Hellera na albedo powierzchni Ziemi, zwłaszcza że albedo Hellera widzianego od strony przestrzeni kosmicznej wykazuje się nietrywialną zmiennością w funkcji czasu, zasadniczo jednak rosnąc. Kwestia ta powinna jednak zwrócić naszą uwagę na, zaniechaną często, potęgę ciała.

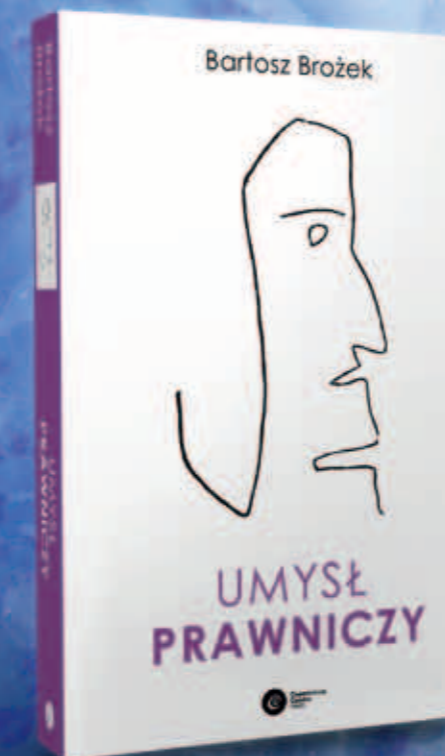
Skromne obciążenie kaloryczne wywoływane przez nawet najtęższy namysł błędnie w zestawieniu z ilością energii, którą poświęcamy na przemieszczanie czy ogrzanie naszych ciał. Posłużmy się przykładem. Załóżmy ostrożnie, że z półmilionowej rzeszy nowych czytelników i słuchaczy Hellera połowa wybierze się w ciągu tego roku na jeden tylko godzinny spacer, aby wgapić się w nocne niebo. Przyjmijmy średnią powierzchnię ciała czytelnika Hellera jako  $1,8 \text{ m}^2$  (aby objąć zarówno filozoficzny narybek, jak i potężnych, wyrobionych myślicieli), różnicę między temperaturą pokojową a temperaturą na zewnątrz  $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ , a także lekki wiatr i ubranie tylko względnie stosowne do okazji (istotny może być czynnik dodatkowego wychłodzenia przez głowę spowodowany filozoficznym rozartagnieniem, ponadto kapelusz na głowie zasłaniałby niektóre konstelacje).

Po podłożeniu tych danych do standardowych wzorów znanych z nauk o fizjologii zimna uzyskujemy dodatkowy wydatek energetyczny zbliżony do 80 kcal/h, zaś spacerowanie podnosi zużycie energii o ok. 50 kcal/h w porównaniu z metabolizmem spoczynkowym. Dla naszej sumarycznej populacji nocnych spacerowiczów daje to oszałamiającą łączną moc 4,3 kW, czyli pięćdziesięciokrotnie więcej niż wpływ samego tylko rozmyślania! Oto potęga myśli poruszającej ciało.

Niech ta moc będzie z Tobą, Księżo Profesorze!



## WYDAJEMY DO MYŚLENIA



Są pytania małe, większe i największe. Są pytania prywatne, stawiane w swoim własnym interesie, i pytania ogólnoludzkie – takie, które roztrząsają filozofowie i których pełna jest literatura. Istnieją wszakże pytania o szczególnym ciężarze gatunkowym; często nazywa się je Wielkimi Pytaniami. Typowym przykładem Wielkiego Pytania, i to z najwyższej półki, jest pytanie o sens. Niekoniecznie o sens życia, czy sens Wszechświata, po prostu o sens. Wszystkie inne pytania są tylko rozmięciem na drobne tego Wielkiego Pytania.

– Michał Heller

