

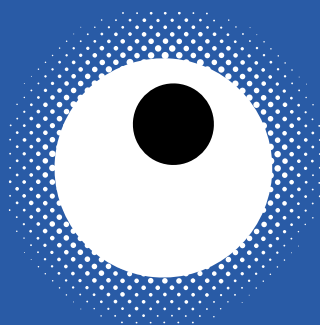
**Sięgając
po niezbadane**

Programy WELCOME, TEAM, Międzynarodowe Projekty Doktoranckie (MPD), HOMING PLUS, VENTURES, POMOST, realizowane w latach 2008–2015 w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka (POIG), oraz programy Międzynarodowe Agendy Badawcze (MAB), TEAM, FIRST TEAM, TEAM-TECH, TEAM-TECH Core Facility, HOMING, POWROTY, TEAM-NET, realizowane w latach 2014–2023 w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój (POIR), były finansowane ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

Sięgając po niezbadane



Fundacja na rzecz
Nauki Polskiej



Osiągnięcia naukowe współfinansowane przez FNP



Przygotowanie wydawnicze: **Studio DTP Academicon**,
e-mail: dtp@academicon.pl, dtp.academicon.pl
Korekta: **Aleksandra Lipiec**
Projekt typograficzny: **Robert Kryński, Mira Zyśko**
Łamanie: **Patrycja Waleszczak**

Redaktor prowadząca: **Elżbieta Marczuk (FNP)**

Na okładce: Widok supermasywnej czarnej dziury
w M87 (centrum galaktyki Messier 87) w świetle
spolaryzowanym. Źródło: EHT Collaboration

© **Copyright by Fundacja na rzecz Nauki Polskiej**,
Warszawa 2022

ISBN: 978-83-946490-0-5

Wydawca: **Fundacja na rzecz Nauki Polskiej**
ul. I. Krasickiego 20/22, 02-611 Warszawa
tel.: 22 845 95 01
e-mail: fnp@fnp.org.pl
www.fnp.org.pl

Drukarnia: **Standruk**

Spis treści

7 Wstęp

11 Innowacja jest szansą

*O prof. Elżbiecie Frąckowiak i prof. François Béguinie
pisze Patrycja Dołowy*

19 Kompleksowe źródło danych

O prof. Januszu Bujnickim pisze Patrycja Dołowy

25 Spektakle gwiazdowe

*O prof. Tomaszu Buliku i prof. Dorocie Rosińskiej
pisze Anna Mateja*

33 Na granicy

O prof. Bogusławie Buszewskim pisze Anna Mateja

41 Brzytwa i atom

*O dr. hab. Rafale Demkowiczu-Dobrzańskim
i dr. Janie Kołodyńskim pisze Anna Mateja*

47 Selektywność i śmiałość

O prof. Marcinie Drągu pisze Karolina Głowacka

53 Skarby dla wytrwałych

*O prof. Miłoszu Gierszu i prof. Patrycji Przędce-
-Giersz pisze Patrycja Dołowy*

61 Podwójny atak na nowotwór

*O prof. Dominice Nowis i prof. Jakubie Gołąbie pisze
Karolina Głowacka*

67 Pozytywista i metafizyka

O prof. Macieju Gołąbie pisze Anna Mateja

73 Na miarę i na czas

*O prof. Karolu Greli, dr. inż. Cezarym Samojłowiczu
i dr. Michale Bieńku pisze Anna Mateja*

79 W jednym garnku

O prof. Danielu Gryko pisze Anna Mateja

85 Szum w czarnej dziurze

*O Ryszardzie, Pawle, Michale i Karolu Horodeckich
pisze Anna Mateja*

93 Teoria wystarczająco dobra

O dr. hab. Arturze Kalinowskim pisze Anna Mateja

99 Jak na wojnie

O prof. Tomaszu Lipniackim pisze Anna Mateja

105 Suma drobnych zmian

O prof. Aleksandrze Łuszczyńskiej pisze Anna Mateja

111 Nitki, pułapki, szkielety

*O prof. Krzysztofie Matyjaszewskim
i dr hab. inż. Joannie Pietrasik pisze Anna Mateja*

117 Sojusz u grobu przyjaciela

O prof. Romanie Michałowskim pisze Anna Mateja

123 Czego dowiemy się od małży?

O prof. Jacku Namieśniku i dr. hab. inż. Marku Tobiszewskim pisze Patrycja Dołowy

129 Nic oczywistego

O dr. hab. Łukaszu Niesiołowskim-Spanò pisze Anna Mateja

135 Przekraczając granice dyscyplin

O prof. Justynie Olko pisze Patrycja Dołowy

143 Zmierzony Wszechświat

O prof. Grzegorzu Pietrzyńskim pisze Patrycja Dołowy

149 Wilcze geny

O dr Małgorzacie Pilot pisze Patrycja Dołowy

155 Cyfrowe laboratorium bezpieczeństwa nanomateriałów

O prof. Tomaszu Puzynie pisze Karolina Głowacka

161 Człowiek z temperamentem

O prof. Janie Strelau pisze Patrycja Dołowy

167 Trzecia rewolucja

O prof. Piotrze Trzonkowskim i prof. Natalii Marek-Trzonkowskiej pisze Patrycja Dołowy

175 Tajemnice greckiej uczt

O dr. hab. Marku Węcowskim pisze Anna Mateja

181 Trafne i nietrafne pytania

O prof. Andrzejowi Wiśniewskiemu pisze Patrycja Dołowy

187 Klasyk psychologii moralności

O prof. Bogdanie Wojciszke pisze Karolina Głowacka

193 Przypadek rządu światem

O prof. Marku Żukowskim pisze Anna Mateja

199 Kwantowe sudoku

O prof. Karolu Życzkowskim

207 O autorkach



Fot. M. Wisniewska-Krasinska

Prof. Maciej Żylicz, prezes FNP

Wstęp

Fundacja na rzecz Nauki Polskiej (FNP) skończyła 30 lat. Od 1991 roku zrealizowaliśmy 86 programów i przekazaliśmy naszym laureatom 1 519,7 mln zł na rozmaite cele związane z rozwojem nauki w Polsce, wyznaczone w różnych latach w zależności od potrzeb środowiska naukowców. Przy okazji naturalnych w takich momentach podsumowań pojawiają się pytania: Co udało nam się osiągnąć przez ten czas? Co było najważniejsze? Jak to pokazać?

Myślę, że najważniejsi byli i są nadal – to nie zmieniło się przez te wszystkie lata – wyjątkowi uczeni, którzy sięgają po więcej, decydując się na wzięcie udziału w niełatwych konkursach Fundacji (współczynnik sukcesu w zależności od programu wynosi od 10 do 35) i wykorzystując wsparcie FNP do „stania się jeszcze lepszymi”. Największym sukcesem Fundacji są jej laureaci.

Byliśmy wielokrotnie pytani, jakie wielkie dokonania naukowe wspierała Fundacja. Przy okazji naszej rocznicy spróbowaliśmy odpowiedzieć na to pytanie. Korzystając z bazy danych Web of Science, wyszukaliśmy 8534 publikacje naukowe (cytowane w latach 1991–2020 przeszło 171 tys. razy – dane ze stycznia 2020 roku), przy których wskazano finansowanie (lub współfinansowanie) przez FNP. Co ciekawe, liczba cytowań tak zdefiniowanych prac zaczęła znacząco rosnąć od 2009 roku, a więc od momentu, gdy zaczęły być publikowane wyniki badań finansowanych z funduszy strukturalnych Unii Europejskiej, z których FNP korzysta od 2008 roku. W latach 2008–2013 – w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka (POIG) – realizowaliśmy programy: WELCOME, TEAM, HOMING, Międzynarodowe Projekty Doktoranckie, POWROTY, a w latach 2014–2023 – w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój (POIR) – programy: Międzynarodowe Agendy Badawcze, TEAM, TEAM-TECH, FIRST TEAM, HOMING, TEAM NET.

Wśród publikacji z adnotacją o współfinansowaniu przez FNP znalazło się 117, które zostały zaliczone do ekskluzywnego grona HCF (Highly Cited in the Field) – 1% prac najczęściej cytowanych w danej dyscyplinie/dziedzinie. Warto

zauważyć, że poziom cytowań zależy m.in. od uprawianej przez autora lub autorów dyscypliny naukowej, a także od czasu, w którym te cytowania są generowane. Żeby praca z biologii molekularnej dostała się do grupy HCF, powinna uzyskać sześć razy więcej cytowań niż praca np. z matematyki (dla tego samego czasu generacji cytowań).

Wśród prac współfinansowanych przez FNP i należących do grupy HCF znaleźliśmy: 36 publikacji z zakresu fizyki cząstek elementarnych, 14 z zakresu astronomii i astrofizyki, 14 z zakresu chemii ogólnej, 10 z fizyki wielodyscyplinowej, 10 z fizyki jądrowej, 7 z nauk o materiałach, po 6 z biochemii i biologii molekularnej, chemii fizycznej, zastosowań fizyki, nauk inżynierskich tworzenia instrumentów, 5 z zakresu nanonauk, po 4 z optyki, inżynierii chemicznej, ochrony środowiska i ekologii, po 2 z biofizyki, chemii organicznej, nowych źródeł energii, chorób krążenia, fizyki ciała stałego, psychologii eksperymentalnej, technologii kwantowych oraz pojedyncze prace z zakresu: akustyki, automatyki, matematyki, biologii komórki, chorób serca, demografii, chemii analitycznej, elektroniki, badań etnicznych, hematologii, gastroenterologii, interny, farmakologii, onkologii, nauki o polimerach oraz urologii.

Wszystkim Autorom tych prac najserdeczniej gratuluję.

Jako przykłady wybitnych osiągnięć naukowych, których uzyskanie wsparła finansowo Fundacja, przedstawiamy w tej książce 20 prac wybranych spośród publikacji należących do grupy HCF. Nieliczne z nich powstały jeszcze zanim Web of Science wprowadziło klasyfikację HCF, a ich poziom cytowania był tak duży, że gdyby klasyfikacja istniała wcześniej, to publikacje te znalazłyby się we wspomnianej grupie. Nie uwzględniliśmy w tym zestawieniu prac, w których kierownik projektu badawczego podawał podwójną afiliację: polską i zagraniczną albo jedynie zagraniczną (a więc np. publikacji powstałych w zagranicznych ośrodkach naukowych dzięki programowi stypendiów zagranicznych dla młodych doktorów KOLUMB realizowanemu przez FNP w latach 1995–2012).

Metoda wyboru, jaką przyjęliśmy dla obszarów nauki z kategorii *sciences*, nie jest doskonała i z pewnością pomija wiele wspaniałych dokonań badawczych naszych laureatów docenionych przez międzynarodową społeczność naukową. Nie uwzględnia też nauk humanistycznych i społecznych (NHS), które rządzą się swoimi prawami i dla których musieliśmy przyjąć inne kryteria wyboru. Po pierwsze, osiągnięcia naukowe w tym obszarze powstają zazwyczaj w wyniku badań prowadzonych przez indywidualnego badacza.

Po drugie, źródła finansowania tych badań nie są tak różnorodne jak w przypadku nauk z kategorii *sciences* i bardzo rzadko zostają odnotowane (w Polsce dopiero istniejące od 2010 roku Narodowe Centrum Nauki [NCN] wprowadziło taki wymóg). Po trzecie, najważniejsze publikacje w naukach humanistycznych to monografie, rzadko artykuły, a tylko niewielka ich część jest indeksowana, a jeśli nawet, to cytat w humanistyce zazwyczaj wskazuje na coś innego niż w *sciences*. Po czwarte, większość prac w NHS nie ma tak dużej, międzynarodowej grupy odbiorców jak w *sciences*. Część z nich wpisuje się w problematykę międzynarodową, są jednak i takie, które do międzynarodowego obiegu badań naukowych wprowadzają zagadnienia wcześniej w nim nieobecne, ponieważ mają one charakter pierwotnie lokalny.

Jednak brak twardych wyznaczników oceny publikacji w NHS nie znaczy, że nie można ich pozycjonować jako osiągnięć międzynarodowych. Służy temu w FNP od lat m.in. moduł TRANS-LACJE w ramach programu MONOGRAFIE FNP, dzięki któremu wybitne monografie humanistyczne są tłumaczone na języki obce i wprowadzane do obiegu międzynarodowego. W ofercie FNP jest to dziś program unikalny, przeznaczony wyłącznie dla humanistyki. W przeszłości taką funkcję pełnił też program KWERENDA (stypen-

dia na prowadzenie za granicą specjalistycznych kwierend archiwistycznych przyznawane w latach 2002–2012). W pozostałych programach finansowanych ze środków własnych FNP humanistyka i nauki społeczne są traktowane na takich samych zasadach jak każda inna dziedzina nauki.

Szukając w humanistyce i w naukach społecznych osiągnięć, które u swych początków otrzymały wsparcie Fundacji (ich autorzy byli laureatami programów FNP takich jak: Nagroda FNP, MISTRZ, MONOGRAFIE/TRANSLACJE, KWERENDA), wybraliśmy 10 przykładowych publikacji czy wyników badań. Wszystkie odbiły się szerokim echem w nauce światowej. Wybór był trudny i na pewno nieoczywisty, jednak w każdym z przykładów pokazuje ścisły związek między wsparciem udzielanym badaczom przez Fundację a rozwojem badań naukowych i ich miejscem w nauce światowej.

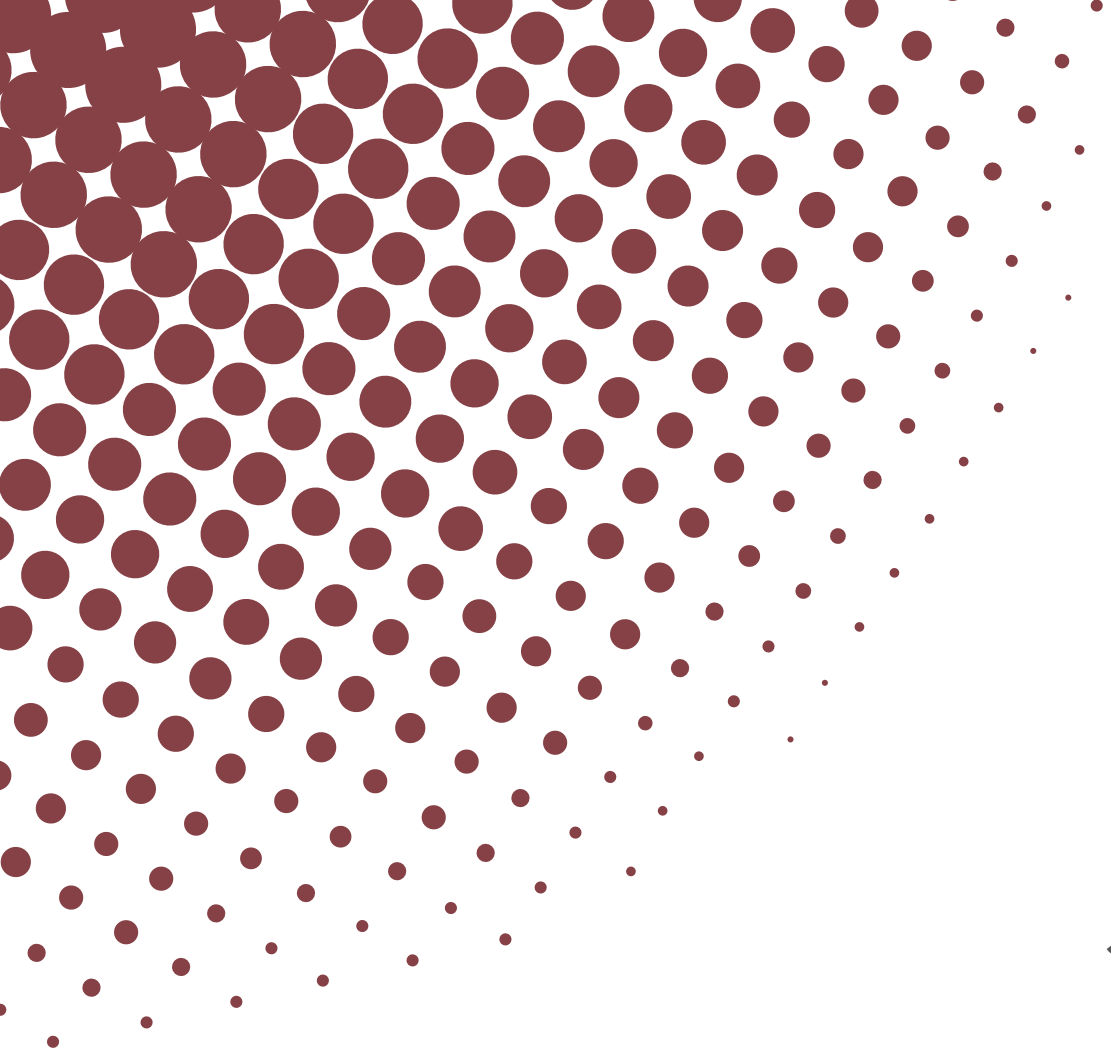
Wierzymy, że 30 wybitnych osiągnięć naukowych opisanych w tej publikacji jest najlepszą ilustracją motta FNP: „wspierać najlepszych, aby mogli stać się jeszcze lepsi”. Zachęcam Państwa do lektury opisu przedstawionych zdobyczy nauki. Pokazują one nie tylko zróżnicowanie tematyki badawczej, ale także różnorodność programów Fundacji, które pomogły dokonać tych imponujących osiągnięć: od programu MISTRZ, poprzez FOCUS, MONOGRAFIE, KWERENDA, WELCOME, TEAM, TEAM-TECH, FIRST TEAM, HOMING, po program MAB. Niektóre zostały już wyróżnione indywidualnymi Nagrodami FNP, inne być może czekają na to wyróżnienie. Wspólną cechą tych osiągnięć jest ogromna pasja do sięgania po niezbadane (ang. *reach for the unexplored*) u ich Autorów. *Per aspera ad astra* – dokonać czegoś niezwykłego, czegoś, co nikomu przedtem się nie udało.

Prof. Maciej Żylicz, prezes FNP



Innowacja jest szansą

Patrycja Dołowy



**Jak osiągnąć jednocześnie
wysokie wartości energii
i mocy kondensatorów?
Jaki materiał węglowy
pozwoli na efektywne
gromadzenie ładunku?
Czy superkondensatory
to przyszłość urządzeń
o napędzie elektrycznym?**

Te pytania w swojej pracy badawczej, także w kontekście jej zastosowań, zadają sobie prof. Elżbieta Frąckowiak, laureatka Nagrody FNP z 2011 roku, oraz prof. François Béguin, laureat programów Fundacji WELCOME (2011) oraz TEAM TECH (2016). Oboje pracują na Wydziale Technologii Chemicznej Politechniki Poznańskiej.

Prof. Frąckowiak i prof. Béguin tworzą zgrany zespół i w nauce, i w życiu – prywatnie są małżeństwem, ale również w pracy badawczej dosłownie „pożenili” swoje umiejętności i zainteresowania naukowe, by opracować technologię, która jest bardzo wydajna i ma zastosowania chociażby w projektowaniu pojazdów hybrydowych i elektrycznych. Napisali razem dwie książki uważane w ich dziedzinie za bardzo istotne: *Carbons for Electrochemical Energy Storage and Conversion Systems* (2009 – pierwsze wydanie)¹ i *Supercapacitors: Materials, Systems, and Applications* (2013)² oraz liczne artykuły naukowe. Ich wspólne prace przeglądowe: “Carbons and Electrolytes for Advanced Supercapacitors” opublikowana

w *Advanced Materials* (2014)³ oraz “Carbon Materials for the Electrochemical Storage of Energy in Capacitors” opublikowana w *Carbon* (2001)⁴ budzą duże zainteresowanie wśród naukowców (pierwsza doczekała się ponad 1600, a druga – ponad 3600 cytowań).

Elżbieta Frąckowiak pracuje nad zagadnieniami związanymi z energią właściwie od początku kariery naukowej. Należy do światowej czołówki elektrochemików zajmujących się nanomateriałami wykorzystywanymi do magazynowania i konwersji energii w kondensatorach. Pracowała z różnymi materiałami, badając ich zastosowania. François Béguin bada magazyny energii od ponad 20 lat. Jest wybitnym specjalistą w dziedzinie materiałów węglowych. Z Elżbietą Frąckowiak poznali się na konferencji naukowej w Belgii, później rozpoczęli naukową współpracę, w której połączyli wykorzystanie materiałów węglowych z elektrochemią. Materiały węglowe mają szerokie zastosowanie.

”
Prof. Frąckowiak i prof. Béguin tworzą zgrany zespół i w nauce, i w życiu – prywatnie są małżeństwem, ale również w pracy badawczej dosłownie „pożenili” swoje umiejętności i zainteresowania naukowe.

¹ Béguin, F., Frąckowiak, E. (2009). *Carbons for Electrochemical Energy Storage and Conversion Systems*. Boca Raton: CRC Press.

² Béguin, F., Frąckowiak, E. (2013). *Supercapacitors: Materials, Systems, and Applications*. Weinheim: Wiley-VCH.

³ Béguin, F., Presser, V., Balducci, A., Frąckowiak, E. (2014). Carbons and Electrolytes for Advanced Supercapacitors. *Advanced Materials*, 26 (14), 2219–2251.

⁴ Frąckowiak, E., Béguin, F. (2001). Carbon Materials for the Electrochemical Storage of Energy in Capacitors. *Carbon* 39 (6), 937–950.

Elektrochemia okazała się nieodzowna do ich praktycznego wykorzystania do konwersji energii chemicznej w elektryczną. To właśnie badania elektrochemiczne materiałów doskonale uzupełniały ich fizykochemiczną charakterystykę.

Elżbieta Frąckowiak prowadziła badania we współpracy z zespołem François Béguina w ośrodku naukowym CRMD (CNRS – Uniwersytet w Orleanie we Francji) podczas wielokrotnych pobytów naukowych jako *visiting professor* oraz w ramach programu Polonium. Analizowała m.in. wykorzystanie nanorurek węglowych do magazynowania energii elektrycznej. Nanorurki węglowe były nową formą węgla, którą zachwycał się wtedy świat naukowy. Dzięki swej specyficznej budowie, niezwykłym elektrycznym i mechanicznym właściwościom są one atrakcyjnym materiałem. Jednak mają silnie mezoporowaty charakter i dlatego okazały się nieprzydatne w zastosowaniu do ogniw litowo-jonowych. Mezoporowatość to właściwość materiału – oznacza strukturę mającą pory od 2 do 50 nm. Jedną z prac Frąckowiak dotyczącą nanorurek węglowych była zupełnie przełomowa, gdyż jako pierwsza na świecie ukazała zarówno korzystne, jak i negatywne cechy tego materiału i do dziś należy do często cytowanych artykułów naukowych. Nanorurki węglowe wykazywały za

to interesujące właściwości pojemnościowe, co okazało się niezwykle istotne w kontekście kondensatorów. To nanorurki i ich nanokompozyty z polimerami przewodzącymi i tlenkami, nanoteksturalne węgle oraz kompozyty węglowe wzbogacane azotem, tlenem i jodem stały się podstawą technologii stosowanej w superkondensatorach.

Te unikalne właściwości materiałów węglowych zapoczątkowały rozwój wspólnych badań Elżbiety Frąckowiak i François Béguina nad superkondensatorami. W karierze naukowej prof. Frąckowiak dużo zmieniła Nagroda FNP w obszarze nauk chemicznych i o materiałach przyznana w 2011 roku. Badaczka została nominowana na zgłoszenie swojej kandydatury na członka korespondenta Polskiej Akademii Nauk (PAN) i weszła do tego grona za pierwszym razem. Tym samym znalazła się wśród 3% kobiet – członkiń PAN-u (dziś kobiety stanowią ponad 8% członków), a jednocześnie była pierwszą w dziejach PAN-u kobietą w Wydziale IV – Nauk Technicznych (dziś należą do niego cztery kobiety). Wkrótce została też odznaczona Krzyżem Oficerskim Orderu Odrodzenia Polski. Jej badania zaczęły być poważnie traktowane w polskim środowisku naukowym. Na świecie doceniano je już wcześniej, ale często badacze okazywali zdziwienie, spotykając ją na żywo na

konferencjach: „Frąckowiak? Doskonale znam twoje prace, ale myślałem, że jesteś mężczyzną”.

Natomiast sam projekt dotyczący materiałów węglowych i elektrolitów w nowoczesnych kondensatorach elektrochemicznych zaczął się od grantu WELCOME FNP, dzięki któremu François Béguin mógł powołać zespół badawczy na Politechnice Poznańskiej i kierować nim. Celem było stworzenie nowych działań naukowych w kilku obszarach – jeden z nich to właśnie energia.

Magazynowanie energii elektrycznej jest nieodłącznie związane z trendami światowego postępu technologicznego. Szczególne zainteresowanie wzbudza możliwość wykorzystania energii z odnawialnych źródeł, jak również transformacja pojazdów zasilanych tradycyjnym paliwem w pojazdy o napędzie elektrycznym bądź hybrydowym. Postęp w tym kierunku jest uwarunkowany możliwościami urządzeń elektrochemicznych o wysokich wartościach energii i mocy.

Superkondensatory, czyli kondensatory elektrochemiczne, charakteryzują się dużymi wartościami mocy, chociaż umiarkowanymi wartościami gęstości energii w porównaniu z akumulatorami. Ich dużą zaletą jest krótki czas ładowania w porównaniu z innymi urządzeniami do przechowywania energii. Działanie kondensatora polega na elektrostatycznym przyciąganiu

jonów na pograniczu faz elektroda/elektrolit. Efektywne gromadzenie ładunku w podwójnej warstwie elektrycznej zależy od właściwej korelacji nanotekstury przewodzącego materiału węglowego, czyli wielkości i rozkładu porów, z rozmiarami jonów. Energia kondensatora to ważny parametr decydujący o praktycznym zastosowaniu urządzenia. Wzrost energii kondensatora można osiągnąć przez wykorzystanie materiałów o charakterze pseudopojemnościowym, takich jak: tlenki metali, polimery przewodzące, materiały węglowe domieszkowane tlenem lub azotem. Pojemność kondensatora wzrasta proporcjonalnie do zawartości azotu w materiale ze względu na udział procesów reakcji redoks (utleniania i redukcji), modyfikacji stanów energetycznych węgla oraz lepszej zwilżalności materiału elektrodowego. Innym sposobem na zwiększenie energii kondensatora elektrochemicznego jest wykorzystanie niepalnych cieczy jonowych jako nowej generacji elektrolitów przyjaznych dla środowiska. Ze względu na duże rozmiary jonów wymagają one odpowiedniego doboru hierarchicznego materiału węglowego z udziałem mezoporów. Wysokie napięcie metalo-jonowych kondensatorów pozwala na uzyskanie energii czterokrotnie

”
To zawsze była siła Europy, tu wprowadzano najważniejsze innowacje. I w tym kierunku Europa powinna podążać – postawić na wspieranie badań. Rozwijanie nowych idei to jedyna droga.

większej w porównaniu z komercyjnie dostępnymi kondensatorami działającymi poprzez ładowanie podwójnej warstwy elektrycznej.

Kondensatory hybrydowe łączą w sobie zalety akumulatorów (przechowywanie energii) i kondensatorów (moc). Połączenie daje możliwość magazynowania energii – o wiele większą niż konwencjonalne kondensatory, a jednocześnie uwalnia ją o wiele szybciej aniżeli akumulatory przy tej samej gęstości prądu.

Superkondensatory są istotnym elementem procesu poszukiwania rozwiązań dla problemów niedoboru energii i zanieczyszczania środowiska. We wspólnych działaniach Frąckowiak i Béguin starają się łączyć aspekt badawczy z wdrożeniowym. Choć obydwój kierowali przez lata badaniami podstawowymi, chcą mieć poczucie, że to, co robią, jest przydatne. Na rozwój w tym obszarze pozwolił kierowany przez Béguina projekt w ramach programu FNP TEAM TECH. Jego celami były wzmocnienie współpracy z przemysłem i rozwój możliwości wdrożeniowych. Badacze nawiązali współpracę z firmą Solaris z Poznania produkującą autobusy miejskie. Solaris chciała rozwinąć technologię produkcji autobusów elektrycznych – obecnie dużo ich jeździ i po Poznaniu, i po Warszawie.

Superkondensatory są z powodzeniem wykorzystywane w autobusach elektrycznych, samochodach hybrydowych, ale też w branżach produkujących urządzenia przenośne i w automatyce przemysłowej. Umożliwiają magazynowanie i transfer energii wytworzonej ze źródeł odnawialnych – wiatru, słońca, źródeł geotermalnych. Druga współpracująca z badaczami firma, SGL Graphite Solutions Polska, z siedzibą w Raciborzu i w Nowym Sączu, zajmuje się materiałami węglowymi, a w bateriach najnowszej generacji jest to główny materiał (lub przynajmniej jedna elektroda jest węglowa). Niestety obecnie badania nad materiałami w aspekcie wdrożeniowym rozwijają się słabo, nie tylko w Polsce, ale i w całej Europie. To domena Azji: Japonii, Chin, Korei. Béguin uważa jednak, że szansą dla Europy jest innowacja. Podaje przykład baterii litowych. Zostały one częściowo wynalezione we Francji, ale nie udało się osiągnąć efektywności w ich praktycznym zastosowaniu. Ulepszenie zostało wprowadzone w Sony w Japonii w 1991 roku. Przez wiele lat Japończycy byli liderami, mieli bardzo zaawansowaną technologię. Teraz Chińczycy im dorównali. Ta technologia została rozwinięta ponad 30 lat temu. Europa nie jest już konkurencją, ale może nią być w technologiach alternatywnych. To zawsze była siła Europy, tu

wprowadzono najważniejsze innowacje. I w tym kierunku Europa powinna podążać – postawić na wspieranie badań. Rozwijanie nowych idei to jedyna droga.

Béguin, F., Presser, V., Balducci, A., Frąckowiak, E. (2014). Carbons and Electrolytes for Advanced Supercapacitors. *Advanced Materials*, 26 (14), 2219–2251.



Kompleksowe źródło danych

Patrycja Dołowy



**Jak powiązać ze sobą
informacje o wielkiej
liczbie różnych modyfikacji
RNA i enzymach je
przeprowadzających? Do
jakich ważnych analiz
ta wiedza może okazać
się pomocna, a często
niezbędna?**

Udzielenie odpowiedzi na te pytania to wyzwanie, któremu postanowił sprostać prof. Janusz Bujnicki, interdyscyplinarny naukowiec związany z Międzynarodowym Instytutem Biologii Molekularnej i Komórkowej (MIBMiK) w Warszawie. Wraz z prof. Henrim Grosjeanem z Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) w Gif-sur-Yvette we Francji i współpracownikami z MIBMiK oraz z Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza (UMK) w Poznaniu stworzył bazę MODOMICS – pierwsze kompleksowe źródło danych dla biologii systemowej procesów RNA. To narzędzie, używane dziś przez tysiące naukowców na całym świecie, jest szczególnie istotne w dobie konieczności tworzenia nowych szczepionek opartych na mRNA. Ale od początku.

Janusz Bujnicki przygodę z nauką zaczynał od modyfikacji DNA – systemów restrykcji i metylacji. Dla tych systemów istniała baza danych stworzona pod koniec ubiegłego stulecia przez New England Biolabs. Jej inicjatorem był noblista Richard Roberts, późniejszy mentor Janusza Bujnickiego w Programie Młodych Badaczy EMBO (YIP) oraz w programie FNP Coaching (SKILLS). Około 1999 roku Bujnicki zainteresował się RNA, kiedy zorientował się, że – w porównaniu z trzema typami metylacji w DNA – w RNA znane są dziesiątki modyfikacji, w tym wiele metylacji.

A dla większości modyfikacji jeszcze nie ustalono genów kodujących enzymy, które te modyfikacje przeprowadzają. W tamtym czasie, w odróżnieniu od dość dobrze zbadanych systemów modyfikacji DNA, modyfikacje RNA były słabo poznane, a wiedza o nich – nikła i bardzo rozproszona.

Wyjaśnijmy najpierw, czym jest RNA i dlaczego przez długi czas wiedziano o nim niewiele. RNA (kwas rybonukleinowy) to unikatowa makrocząsteczka chemiczna, która może funkcjonować w organizmach żywych na różne sposoby. Na najbardziej podstawowym poziomie budowy chemicznej RNA przypomina DNA. Podobnie jak DNA jest to liniowy polimer zbudowany z dużej liczby „klocków budulcowych” (tzw. reszt nukleozydowych) – adenozy, cytydiny, guanozy i urydiny (A, C, G i U) – połączonych ze sobą liniowo jak koraliki na sznurku. W pierwszym przybliżeniu RNA wygląda jak połowa podwójnej helisy DNA i wykazuje tylko kilka pozornie małych różnic chemicznych. Podstawowe budulce DNA i RNA są bardzo podobne – RNA ma tylko dodatkowy atom tlenu w cząsteczce rybozy (co odróżnia tę cząsteczkę od deoksyrybozy w DNA i tłumaczy różnicę w nazwie RNA i DNA). Poza tym jeden z elementów budulcowych RNA, urydyna (U),

”

To narzędzie, używane dziś przez tysiące naukowców na całym świecie, jest szczególnie istotne w dobie konieczności tworzenia nowych szczepionek opartych na mRNA.

różni się nieznacznie od tymidyny (T) obecnej w DNA: tymina ma dodatkową grupę metylową.

Jednak w komórkach organizmów żywych, w tym ludzi, RNA pełni bardzo odmienne role od tych zarezerwowanych dla DNA. RNA może przekazywać informację genetyczną z DNA do białek. Częsteczki RNA katalizują niektóre kluczowe reakcje chemiczne w komórkach, np. biosyntezę białek. Co więcej, częsteczki RNA pełnią wiele ról regulacyjnych, które są niezbędne dla komórek, np. mogą nadzorować i włączać lub wyłączać procesy przeprowadzane przez inne częsteczki biologiczne. Częsteczki RNA to główne regulatory komórek i na poziomie molekularnym są absolutnie niezbędne do życia.

Funkcje komórkowe i molekularne RNA zależą od ich struktur przestrzennych, które z kolei warunkuje to, jak liniowa sekwencja bloków budulcowych RNA samorzutnie „zwiją się”, tworząc zwartą konstrukcję, zależnie od tego, jak poszczególne bloki budulcowe oddziałują ze sobą. Co ciekawe, cztery podstawowe reszty nukleozydów w RNA mogą być chemicznie modyfikowane w komórkach organizmów żywych na wiele różnych sposobów, dając ponad 150 różnych pochodnych wariantów, które oddziałują ze sobą w odmienny sposób. Te modyfikacje wprowadzane są w trakcie procesu syntezy

cząsteczki RNA, czyli transkrypcji, lub po tym, jak cząsteczka RNA zostanie zsyntetyzowana.

Chociaż obecność zmodyfikowanych nukleozydów w RNA jest znana od ponad pół wieku, ich znaczenie dla biochemii RNA i biologii komórki było niedoceniane, głównie dlatego, że tylko nieliczne modyfikacje (w określonych pozycjach w określonych cząsteczkach RNA) są bezpośrednio niezbędne w podstawowych procesach biologicznych. Obecnie wiemy, że modyfikacje RNA są kluczowe dla różnorodności funkcjonalnej i konieczne do życia komórek.

Modyfikacje cząsteczek RNA mogą wpływać na strukturę RNA i powodować, że cząsteczka RNA staje się bardziej sztywna lub elastyczna. Mogą również wywierać wpływ na oddziaływania RNA z innymi cząsteczkami, w szczególności z białkami. Ogólnie rzecz biorąc, modyfikacje rybonukleotydów przyczyniają się w znacznym stopniu do różnorodności funkcji pełnionych przez cząsteczki RNA, zwłaszcza w obrębie złożonych sieci regulacyjnych. Nawet subtelne zmiany strukturalne mogą powodować znaczące zmiany w metabolizmie komórki – a rolą modyfikacji chemicznych RNA jest właśnie wprowadzanie takich subtelnych zmian.

W modyfikacjach RNA biorą udział różnorodne enzymy. Wiele modyfikacji zachodzi nie w pojedynczej reakcji enzymatycznej, ale w ca-

łym szeregu reakcji. Są to więc skomplikowane regulacyjne procesy, często ze sobą powiązane, ale żeby je dobrze zrozumieć, naukowcy skupiają się zwykle na poszczególnych etapach tych procesów. Dla szerokiego obrazu niezbędne było zebranie w jednym miejscu informacji o reakcjach chemicznych związanych z modyfikacjami RNA i możliwość śledzenia powiązań między nimi.

Podczas dyskusji, którą prowadzili Henri Grosjean, szef laboratorium CNRS, jeden z najważniejszych naukowców w tym obszarze badawczym, oraz Janusz Bujnicki, wtedy bardzo młody naukowiec, który dopiero zaczynał swoją samodzielną pracę w roli kierownika zespołu, pojawił się pomysł, że warto byłoby stworzyć bazę danych dla enzymów wprowadzających modyfikacje RNA, analogiczną do istniejącej bazy Rebase. Grosjean miał w głowie praktycznie całą ówczesną wiedzę dotyczącą wszystkich enzymów – jaki enzym przeprowadza jaką reakcję, w którym roku został odkryty i w jakiej publikacji opisany. Od tego zaczęli. Przystąpili do pracy w 2004 roku razem z kilkoma osobami z zespołu Bujnickiego – zebrali informacje dostępne w literaturze i w innych wówczas funkcjonujących bazach danych, a następnie przekuli je w internetowe narzędzie. Nowa baza danych MODOMICS prezentowała znane reakcje modyfikacji chemicznych w RNA

oraz informacje o doświadczalnie zidentyfikowanych w organizmach enzymach, które przeprowadzały te reakcje w różnych cząsteczkach RNA i w różnych pozycjach. Niektóre ze szlaków modyfikacji są bardzo skomplikowane i mają wiele etapów i alternatyw. Badacze zebrali w jednym miejscu te wszystkie dane, dzięki czemu baza MODOMICS stała się głównym źródłem informacji o enzymach modyfikujących RNA.

Gdy prof. Bujnicki i współpracownicy zaczęli pracę nad tym narzędziem, istniało bardzo dużo białych plam na mapie szlaków biochemicznych. Za pomocą metod biochemicznych wykrywano produkty modyfikacji w samym RNA, natomiast nie było wiadomo, jakie geny odpowiadają za syntezę właściwych białek przeprowadzających wspomniane modyfikacje. Dzięki bazie MODOMICS wiele grup badawczych na całym świecie mogło uzupełniać te informacje – sprawdzać, dla których szlaków dany enzym jest znany lub nie. Baza wspierała też badania zespołu prof. Bujnickiego. Jego laboratorium za pomocą różnych metod ustaliło kilka „brakujących” enzymów odpowiedzialnych za już wcześniej znane modyfikacje.

MODOMICS zbiera dane pomocne w opracowywaniu narzędzi do komputerowego przewidywania

”
Łączenie danych, które wcześniej nie zostały połączone, sprawiło, że baza MODOMICS zdobyła bardzo dużą popularność wśród użytkowników z całego świata.

zmian w strukturze RNA wywołanych przez wprowadzanie modyfikacji lub ich brak. Jeszcze bardziej interesującym obszarem badawczym jest projektowanie takich cząsteczek RNA, których pożądane właściwości zostają wzmocnione przez wprowadzanie modyfikacji. Szczepionki mRNA działają skutecznie właśnie dzięki takim modyfikacjom: to za sprawą modyfikacji mRNA w szczepionce jest bardziej stabilny i ma właściwości niezbędne do pełnienia swojej funkcji.

Łączenie danych, które wcześniej nie zostały połączone, sprawiło, że baza MODOMICS zdobyła bardzo dużą popularność wśród użytkowników z całego świata. W miarę pojawiania się nowych danych w literaturze konieczne były jej aktualizacje polegające nie tylko na zwiększaniu liczby informacji, ale też na dodawaniu nowych funkcjonalności. Jedną z kluczowych aktualizacji MODOMICS została zawarta w artykule “MODOMICS: A Database of RNA Modification Pathways – 2013 Update” opublikowanym w *Nucleic Acids Research* (2013). Oprócz zespołu Bujnickiego i Grosjeana w pracach uczestniczyli też prof. Mark Helm i jego pracownik Okan Osman Oglou z Uniwersytetu Johannes Gutenberg w Moguncji. Prace badawcze i programistyczne były w dużej części finansowane przez grant TEAM FNP. Każdy

wpis w MODOMICS został powiązany z innymi bazami danych oraz wybranymi kluczowymi publikacjami. Wprowadzono nowe opcje wyszukiwania informacji oraz przeglądania bazy danych, w tym wyszukiwanie sekwencji białek i RNA.

W tej chwili prof. Bujnicki i jego zespół starają się, by baza była użyteczna dla jeszcze szerszego grona badaczy. Jedną z bardzo istotnych kwestii jest jakość i wiarygodność danych, zwłaszcza kiedy wyniki badań zostały otrzymane w efekcie doświadczeń wysokoprzepustowych, w których trudno ustalić precyzję każdego wyniku. Ważne jest, by wiedzieć, jak traktować te dane. Aktualizacje pozwolą określać, w jaki sposób poszczególne dane zostały pozyskane i jaki jest ich względny stopień wiarygodności.

Baza danych MODOMICS stanowi obecnie najbardziej kompleksowe źródło informacji spośród wszystkich istniejących baz danych dotyczących biochemicznych aspektów modyfikacji RNA.

Machnicka, M.A., Milanowska, K., Oglou, O.O., Purta, E., Kurkowska, M., Olchowik, A., Januszewski, W., Kalinowski, S., Dunin-Horkawicz, S., Rother, K.M., Helm, M., Bujnicki, J.M., Grosjean, H. (2013). MODOMICS: A Database of RNA Modification Pathways – 2013 Update. *Nucleic Acid Research*, 41, D262–D267.



Spektakle gwiazdowe

Anna Mateja



**Jaki związek ma
obecność złota na Ziemi
ze zderzeniem miliardy
lat temu dwóch gwiazd
neutronowych? Dlaczego
w nauce osobista
frajda poznawania
rzeczy nieodkrytych
jest ważniejsza od
zadekretowanych celów
i odgórnych planów?**

Oprawdopodobnym istnieniu fal grawitacyjnych po raz pierwszy napisał w 1916 roku Albert Einstein. Dzisiaj wiemy, że są odkształceniem czasoprzestrzeni przemieszczającym się z prędkością światła, a emitowanym przez asymetryczne, masywne i relatywistyczne obiekty poruszające się z bardzo dużym przyspieszeniem. Zdaniem autora teorii względności fala grawitacyjna miała być jedynie rozwiązaniem, którego wprowadzenie jest niezbędne w obliczeniach matematycznych. Na przełomie lat 50. i 60. Andrzej Trautman – młody fizyk z grupy naukowców prowadzonej w Instytucie Fizyki PAN przez prof. Leopolda Infelda, ucznia Einsteina – obronił pracę doktorską na temat promieniowania grawitacyjnego, wykazując, że wybitny noblista nie miał racji. Fala grawitacyjna miała przekazywać energię, a jej istnienia należało szukać we Wszechświecie.

Europejski Virgo, północnoamerykański LIGO, japoński TAMA300, niemiecki GEO600 – czyli detektory fal grawitacyjnych pierwszej generacji – miały za sobą pierwsze lata bezowocnego poszukiwania źródeł tego rodzaju promieniowania, kiedy pod koniec milenium w Centrum Astronomicznym im. Mikołaja Kopernika w Warszawie spotkało się dwóch astrofizyków. Nie prowadzili wówczas badań nad falami grawitacyjnymi,

ale rozmowa dra Tomasza Bulika i doktoranta Krzysztofa Belczyńskiego okazała się dla poznania tego zjawiska przełomowa.

Prof. Bulik – astrofizyk z Obserwatorium Astronomicznego Uniwersytetu Warszawskiego (UW), laureat m.in. programów FNP TEAM (2016) i MAB (2016) – wrócił właśnie do Polski ze stażu podoktorskiego spędzonego na Uniwersytecie Chicagowskim. W 1993 roku na Pennsylvania State University obronił doktorat na temat wirujących pulsarów, jak nazywa się gwiazdy neutronowe, które rotując, emitują promieniowanie elektromagnetyczne. Pulsary to zresztą obiekty nieprzypadkowe w historii badań nad promieniowaniem grawitacyjnym – ich obserwacja w układzie podwójnym z gwiazdą neutronową pozwoliła pośrednio potwierdzić jego istnienie.

Najpierw jednak trzeba powiedzieć, że pulsar działa niczym szpieg – jego obecność i regularnie, np. raz na sekundę, wysyłany sygnał w promieniowaniu radiowym zdradza obecność drugiego obiektu, którym jest krążąca wokół niego gwiazda neutronowa. Obserwacja sygnału pozwala wyznaczyć z dużą dokładnością położenie pulsara względem gwiazdy neutronowej w układzie podwójnym i ich powolne zbliżanie się za sprawą emisji fal grawitacyjnych. Po raz pierwszy zjawisko to zaobserwowali w promie-

”
Praca przypominała eksplorację o charakterze detektywistycznym, mimo że przeprowadzali ją teoretycy posługujący się jedynie kodem numerycznym poszerzonym o nowe dane.

28

niowaniu radiowym w 1974 roku Russel Hulse i Joseph Taylor, a 20 lat później otrzymali za jego odkrycie Nagrodę Nobla. Obiekty układu podwójnego Hulse-Taylor (inaczej PSR B1913 + 16), jak obliczono, pozostawały w tak dużej separacji, że ich zderzenie i połączenie nastąpi dopiero za 300 mln lat – tyle trzeba czekać, by zaobserwować wynikłą z tej koalescencji emisję fal grawitacyjnych. Nadzieja, że do wykrycia zderzenia dwóch gwiazd neutronowych dojdzie w znacznie bliższej przyszłości, pojawiła się jednak dość szybko, wraz z obserwacją kolejnych układów podwójnych tego typu.

Tomasz Bulik wypełnił czas stażu podoktorskiego pracami nieobojętnymi dla tych problemów. Zgłębiał pochodzenie rozbłysków *gamma* – najjaśniejszych znanych we Wszechświecie źródeł promieniowania elektromagnetycznego. Rozbłyski pojawiają się raz na dobę i trwają od paru milisekund do nawet siedmiu godzin, podwyższając natężenie promieniowania *gamma* w ściśle określonej części nieba. Jak twierdził od końca lat 80. prof. Bohdan Paczyński, wybitny astrofizyk, laureat Nagrody FNP z 1996 roku, miały one towarzyszyć zderzeniu i połączeniu się dwóch gwiazd neutronowych, przez co dawały się dobrym tropem do znalezienia źródeł

fal grawitacyjnych. Bulik zamierzał więc poznać scenariusze powstawania układów podwójnych, ale nie tylko gwiazd neutronowych, czym zajmowało się wielu innych. Jego intrygowało również powstanie układu dwóch czarnych dziur albo gwiazdy neutronowej z czarną dziurą. Uważał temat za bardziej problematyczny, zwłaszcza że interesujące go układy nie były jeszcze wykryte.

Kiedy po powrocie do Polski dr Bulik opowiedział Belczyńskiemu, czym się zajmuje, ten w ciągu kilku następnych tygodni napisał pierwszą wersję kodu numerycznego, nazwanego później kodem syntezy populacji StarTrack. Jego kolejne wersje, bazujące na szczegółowej wiedzy o gwiazdach, ich masie, układach podwójnych bądź pojedynczych istnieniach, pozwalały stworzyć własny Kosmos. A mówiąc bardziej fachowo: odtwarzały ewolucję gwiazd we Wszechświecie na przestrzeni kilku miliardów lat, od powstania obiektu do momentu zakończenia gwiazdowego życia w postaci ciała zwartego, czyli – zależnie od masy gwiazdy – białego karła, czarnej dziury albo gwiazdy neutronowej.

Przewidywania miały słabe punkty. Bo jeśli kluczowym elementem w modelowaniu układu podwójnego był niestabilny transfer masy, który zacieśniał orbitę krążących obiektów, trudno było podać ściśle szacunki ilości układów po-

dwójnych czarnych dziur oraz tempa ich zderzenia się i łączenia. Nieznajomość masy, od jakiej rozpoczynały życie gwiazdy bardzo masywne (chodzi o wielkości rzędu nawet 20 Słońc), które są spotykane rzadko, bo ewoluują bardzo szybko, też nie ułatwiała stawiania hipotez na temat czarnych dziur, w jakie tego rodzaju gwiazdy się przekształcają. Praca przypominała eksploatację o charakterze detektywistycznym, mimo że przeprowadzali ją teoretycy posługujący się jedynie kodem numerycznym poszerzanym o nowe dane. Jej kolejne odsłony okazywały się równie niepewne jak atrakcje kolejki górskiej, co było widoczne w tekstach publikowanych przez Bulika i Belczyńskiego. W jednym stwierdzali, że układów podwójnych czarnych dziur powinno być bez liku, by w kolejnym dowodzić, że analiza ścieżek ewolucyjnych gwiazd doprowadza do wniosku zgoła odmiennego.

Praca “Predictions For the Rates of Compact Binary Coalescences Observable by Ground-Based Gravitational-Wave Detectors” opublikowana w 2010 roku na łamach *Classical and Quantum Gravity*, której Bulik z Belczyńskim są współautorami (obok ponad 600 naukowców i naukowców), zawiera już jednak wielostronnie sprawdzone tezy na temat czarnych dziur. Przedstawia niepewności w procesie ich

powstawania i prognozuje spodziewaną gęstość ich występowania w lokalnym Wszechświecie. Co najważniejsze, uczeni uważali, że wykrycie promieniowania grawitacyjnego w Kosmosie dokona się za sprawą koalescencji układu podwójnego czarnych dziur, do czego wielu badaczy wciąż podchodziło sceptycznie. Jeżeli istnienia czarnych dziur nie można udowodnić obserwacyjnie, bo są one niewidoczne w promieniowaniu elektromagnetycznym, skąd pewność, że takie obiekty w ogóle istnieją w układzie podwójnym i się zderzają? Astrofizycy, mimo że w chwili publikacji ich pracy jedynym pewnym źródłem promieniowania grawitacyjnego były gwiazdy neutronowe, twierdzili jednak swoje: układów podwójnych czarnych dziur jest na tyle dużo, że wystarczy poprawić czujność detektorów, by kosmiczna katastrofa rozegrała się na oczach obserwatorów w całej swej okazałości.

W momencie publikacji tekstu jedna z jego współautorek, prof. Dorota Rosińska, od roku pracowała w programie detektorów fal grawitacyjnych Virgo (znajduje się w Pizie) i LIGO (instalacje położone są w Hanford w stanie Waszyngton i w Livingston w stanie Luizjana). Życie naukowe astrofizyczki, obecnie pracującej w Ob-

”
Astrofizycy [...] twierdzili jednak swoje: układów podwójnych czarnych dziur jest na tyle dużo, że wystarczy poprawić czujność detektorów, by kosmiczna katastrofa rozegrała się na oczach obserwatorów w całej swej okazałości.

serwatorium Astronomicznym UW – laureatki m.in. programów FNP FOCUS (2008) i POMOST (2013) – zdeterminował na wiele lat wykład monograficzny na temat gwiazd neutronowych prof. Pawła Haensela, którego słuchała podczas studiów. W Centrum Astronomicznym im. M. Kopernika PAN, gdzie rozpoczęła studia doktoranckie, tworzyła programy numeryczne konieczne do wyznaczenia masy krytycznej gwiazdy neutronowej, po której przekroczeniu traci ona stabilność i zapada się do czarnej dziury. Udowodniła, w jaki sposób masa krytyczna gwiazdy neutronowej zależy od – wciąż nie do końca poznanej – jej budowy.

Doświadczenie, jakie dr Rosińska zdobyła w prowadzeniu badań fundamentalnych dla tematyki gwiazd neutronowych, pozwoliło jej wygrać konkurs na europejski staż podoktorski w Obserwatorium Paryskim w Meudon, które we współpracy z innymi ośrodkami prowadziło projekt kształcenia młodych astronomów w dziedzinie fal grawitacyjnych. W następnych latach naukowczyni wykonywała więc pionierskie obliczenia, których celem było poznanie odpowiedzi na istotne pytania o naturę gwiazd neutronowych: Jaka jest ich ewolucja prowadząca do zderzenia? W jaki sposób się zniekształcają, zbliżając się do siebie w układzie podwójnym?

W jakich częstościach emitują energię w falach grawitacyjnych? Wtedy powstały też pierwsze prace Rosińskiej. Ich tematem były szybko rotujące gwiazdy neutronowe i hipotetyczne gwiazdy kwarkowe – kolejne, wciąż nieodkryte, źródła fal grawitacyjnych. O sile zaangażowania badaczki w problematykę świadczy fakt, że pierwsza konferencja międzynarodowa, która jednoczyła wysiłki teoretyków i obserwatorów zajmujących się detekcją fal grawitacyjnych, została zorganizowana właśnie z inicjatywy Rosińskiej w Orsay pod Paryżem w 2003 roku.

Była już w Polsce, gdzie dzięki wsparciu FNP zbudowała na Uniwersytecie Zielonogórskim klaster komputerowy PIRXGW i zespół badający najważniejsze własności astrofizycznych źródeł fal grawitacyjnych, kiedy zaproszono ją do grupy naukowców skupionych wokół detektorów Virgo/LIGO. Pracę kilku następnych lat, obliczonych na wykrycie promieniowania grawitacyjnego, jakie miałyby wysłać dwie zderzające się gwiazdy neutronowe, prof. Rosińska podsumowuje krótko: „nie mieliśmy nic”. Badacze, którzy prowadzili obserwacje w falach elektromagnetycznych, odnotowywali kolejne odkrycia w rodzaju wybuchu supernowych czy układów czarnej dziury ze zwykłą gwiazdą. Natomiast współpracownicy Virgo/LIGO pisali o swoich ograniczeniach, czyli

o czułości detektorów niewystarczającej do odbioru sygnału.

To, że transformacja trzech detektorów w narzędzie drugiej generacji była nieodzowna, pokazuje przyspieszenie, z jakim doszło do przełomu w obserwacjach po jej przeprowadzeniu. Dwa zmodyfikowane detektory LIGO funkcjonowały jeszcze w wykonującym testy trybie inżynierskim, kiedy 14 września 2015 roku zarejestrowały pierwszy sygnał fal grawitacyjnych. Ich źródłem nie była jednak, mimo że spodziewała się tego większość obserwatorów, koalescencja gwiazd neutronowych. Odebrane fale, jak przewidzieli autorzy tekstu z 2010 roku, pochodziły z połączenia miliard lat temu dwóch czarnych dziur. Obserwacja zderzenia gwiazd neutronowych była wciąż poza zasięgiem posiadanych instrumentów. Jakie warunki należy spełnić, by stała się wreszcie możliwa, opisano w pracy „Prospects For Observing and Localizing Gravitational-Wave Transients with Advanced LIGO and Advanced Virgo” opublikowanej na łamach pisma *Living Reviews in Relativity* w 2016 roku, której Rosińska i Bulik byli współautorami.

W artykule drobiazgowo wyliczono, dla czego dwa detektory drugiej generacji to za mało, żeby zaobserwować wyczekiwane wydarzenie. Potrzebne były co najmniej trzy takie narzędzia,

dzięki czemu wyznaczony do badań obszar nieba można było wykroić jak najlepszy kawałek ciasta. Pracę detektorów należało też wesprzeć systemem alertów stworzonym na podstawie blisko 70 umów podpisanych z satelitami i obserwatoriami na całym świecie. Obserwacje miały się stać wieloaspektowe, by w przypadku rejestracji wyczekiwanego zdarzenia możliwe było skierowanie narzędzi pracujących w falach o różnej częstotliwości w jedno precyzyjnie zaznaczone miejsce na niebie.

Prognozy sprawdziły się w pierwszych dniach sierpnia 2017 roku, kiedy po raz pierwszy trzy detektory zarejestrowały zderzenie układu podwójnego czarnych dziur. Trzy dni później przed oczami prof. Rosińskiej i innych obserwatorów rozegrał się spektakl. Doszło do pierwszej detekcji promieniowania grawitacyjnego wynikłego z połączenia dwóch gwiazd neutronowych tworzących układ podwójny. Niespełna dwie sekundy po tym wydarzeniu pojawił się rozbłysk *gamma*, potwierdzając hipotezę prof. Paczyńskiego o ich pochodzeniu. Kolejne minuty i godziny przynosiły następne odsłony spektaklu obserwowane w falach elektromagnetycznych, rentgenowskich, optycznych, radiowych...

Za przewidywaniami opisanymi w pracy z 2016 roku stało ponad 1200 autorek i autorów. Uwzględniono bowiem nie tylko astrofizyków i fizyków rozmaitych specjalności, ale także inżynierów i innych uczonych, niezależnie od stopnia naukowego, zaangażowanych w detektorowy eksperyment. Równie dobrze tekst można było podpisać “LIGO/Virgo Collaboration”, jak zdecydował w 2017 roku Komitet Noblowski, tym samym honorując za decydujący wkład w konstrukcję detektora LIGO i obserwację fal grawitacyjnych nie tylko Barry’ego Barisha, Kipa Thorne’a i Raia Weissa, ale także społeczność współpracujących z nimi teoretyków oraz doświadczalników.

Od tekstu Einsteina do obserwacyjnego potwierdzenia istnienia fal grawitacyjnych upłynął cały wiek: cztery pokolenia naukowców, dwie generacje detektorów i kilka decydujących godzin rejestracji sygnałów emitowanych przez zdarzenia sprzed miliardów lat, które pozwoliły odpowiedzieć na parę fundamentalnych pytań kosmologicznych i fizycznych. Udowodniono rozchodzenie się fal grawitacyjnych z prędkością

światła. Oszacowano prędkość, z jaką rozszerza się Wszechświat. Postawiono hipotezy na temat wnętrza gwiazd neutronowych. Potwierdzono powstawanie w wyniku ich zderzenia kolosalnych ilości pierwiastków ciężkich, takich jak złoto, platyna czy uran, i pokazano tym samym, skąd wzięły się na Ziemi. Udowodniono też kolejny raz w historii nauki, że popłaca nie tyle odgórne wytyczanie celów, ile przekora i umiejętność szukania własnej drogi, czasami dalekiej od przyjętego standardu pokonywania nieznanych przestrzeni.

Bulik, T., Rosińska, D. i in. (2010). Predictions for the Rates of Compact Binary Coalescences Observable by Ground-Based Gravitational-Wave Detectors. *Classical and Quantum Gravity*, 27 (17).

Bulik, T., Rosińska, D. i in. (2016). Prospects for Observing and Localizing Gravitational-Wave Transients With Advanced LIGO and Advanced Virgo. *Living Reviews in Relativity*, 21 (1).



Na granicy

Anna Mateja



**Czego można się dowiedzieć
z próbki wydychanego
powietrza albo ażurowej
nanostruktury okrzemek?
Jakie metody badania
materii pozwalają
zobaczyć to, co wydaje się
niewidzialne?**

Prof. Bogusław Buszewski – naukowiec z Wydziału Chemii Uniwersytetu Mikołaja Kopernika (UMK) w Toruniu, laureat m.in. programów FNP: MILAB (2005), MISTRZ (2007), TEAM-NET (2018) – nie narzeka na brak pomysłów. Dlatego gdy tylko ułożą się odpowiednio warunki – pojawi się kolejny zdolny doktorant albo szansa na zdobycie grantu – intelektualne rozważania wchodzi w fazę realizacji. Naukowiec, w którego grupie badawczej jeden z wychowanków otrzymał habilitację, mając zaledwie 30 lat, i stał się tym samym najmłodszym doktorem habilitowanym w historii UMK, nie ukrywa, że „goni ludzi do roboty”. Tempo musi być wyraźne, a tematy takiego kalibru, żeby można się było „zapracować”.

W toruńskim laboratorium rozpoczęto więc badania nad wprowadzeniem na poziomie molekularnym technik separacyjnych i spektralnych w pracach nad bakteriami i wirusami, w tym nad koronawirusem wywołującym COVID-19 i nad sepsą – ogólnoustrojową reakcją zapalną. Z naukowcami z krajów nadbałtyckich nawiązano współpracę, której przedmiotem jest monitorowanie obecności mikro- i nanoplastiku w wodach Morza Bałtyckiego. Uчени zamierzają poznać jego wpływ na organizmy żywe i zaproponować sposoby neutralizacji. Z kolei kapnograf – instrument do pomiaru stężenia ditlenku węgla

w wydychanym powietrzu – od kilkunastu lat jest wykorzystywany w badaniach nad opracowaniem kodu zapachowego niektórych chorób. Bo tak jak cukrzycę ujawnia zapach acetonu unoszący się wokół chorych, a obecność wirusa febry w organizmie zdradza np. woń surowego mięsa, tak możliwe jest znalezienie markera, który pozwoliłby oznaczyć w próbce powietrza wydychanego przez pacjenta substancje wyprodukowane np. przez komórki objęte zmianami nowotworowymi (badania prof. Buszewskiego dotyczą m.in. nowotworów płuc i trzonu szyjki macicy). Kod zapachowy choroby to nic innego jak opanowanie umiejętności selektywnego rozróżniania i ilościowego oznaczania składników próbek powietrza pobieranych od diagnozowanych pacjentów. Powiedzieć, że znalezienie trzech-czterech substancji z blisko pięciuset charakterystycznych dla danej choroby jest trudne, to nic nie powiedzieć. Faktycznie można się „zapracować”, a i tak znalezienie właściwych staje się szczęśliwym trafem. Albo raczej, jak to ujmie prof. Buszewski, *art of science*.

Jest to jednak możliwe, ponieważ od 1903 roku, kiedy Michaił Siemionowicz Cwiet, rosyjski botanik i fizjolog z Cesarskiego Uniwersytetu

”
Porównanie chromatogramu i widma z substancją wzorcową pokazuje zapachowy bukiet, złożony np. z aldehydów, amin czy węglowodorów, identyfikujący badaną chorobę.

Warszawskiego, przesączył roztwór chlorofilu w eterze naftowym przez ubitą kredę umieszczoną w specjalnej kolumnie, w chemii istnieje chromatografia. Dzięki pomysłowości prof. Cwieta, któremu nowo powstała technika analityczna była potrzebna do rozdzielania dwóch rodzajów barwników roślinnych niezbędnych w procesie fotosyntezy i produkcji tlenu: chlorofilu od ksantofilu, nauka pozyskała możliwość rozdzielania mieszaniny związków chemicznych, a następnie ich oznaczania. I to niezależnie od budowy, masy czy właściwości poddawanych analizie substancji i indywiduów chemicznych.

Wracając do próbki powietrza pobranej z oddechu i poddanej analizie w chromatografii gazowym: podwyższona temperatura uwalnia związki chemiczne nazywane analitami, które rozdzielają się po wprowadzeniu do kolumny. Każdy zostaje oznaczony na chromatogramie, czyli w zapisie analizy. Jednocześnie spektrometr masowy generuje widmo badanych związków. Tak przygotowane dane wystarczą, by program komputerowy, korzystając z biblioteki związków, zidentyfikował te, które są obecne w analizowanej próbce wydychanego powietrza. Porównanie chromatogramu i widma z substancją wzorcową pokazuje zapachowy

bukiet, złożony np. z aldehydów, amin czy węglowodorów, identyfikujący badaną chorobę.

Schemat działania techniki, dzięki której można wykrywać substancje niewidzialne, pozostaje mniej więcej ten sam od czasu działalności naukowej prof. Cwieta w Warszawie. Mieszanina substancji chemicznych rozpuszczonych w rozpuszczalniku lub mieszaninie rozpuszczalników, nazywana w chromatografii fazą ruchomą, jest przepuszczana przez złożę adsorbentu (wypełnienia) nazywane fazą stacjonarną. Tworzą ją materiały zdolne m.in. do adsorpcji (czyli „wiązań” cząstek materii na powierzchni albo na granicy faz w sposób odwracalny) lub do wymiany jonowej. Zadaniem fazy ruchomej jest wymycie z powierzchni fazy stacjonarnej zadsorbowanych analitów. Ponieważ proces wymywania przebiega w sposób energetycznie niejednakowy, ze względu na zróżnicowane oddziaływania analitów z fazą stacjonarną i fazą ruchomą, składniki wymywają się w odmiennym tempie.

W drugiej połowie XX wieku ważnym ośrodkiem zajmującym się udoskonaleniem techniki analitycznej był m.in. Słowacki Uniwersytet Techniczny w Bratysławie, gdzie prof. Buszewski napisał doktorat i obronił rozprawę habilitacyjną, pracując pod okiem takich guru chromatografii jak prof. Ján Garaj czy prof. Dušan Berek. Dekady

pracy nad omawianym zagadnieniem doprowadziły badaczy do kolejnych pomysłów na poprawę skuteczności techniki analitycznej. Ustalono np. że rozdzielanie substancji i ich oznaczanie zależy od trafności doboru typu, składu i właściwości fazy ruchomej oraz fazy stacjonarnej. Optymalizacja wykazała, iż procesy i zależności zachodzące między analitami a dwiema fazami pozostają w termodynamicznym stanie równowagi. Badacze dowiedli również, że większość oznaczeń związków pozyskiwanych w analizie chromatograficznej najlepiej przeprowadzać drogą chromatografii cieczowej albo technik elektromigracyjnych. Z kolei powinowactwa istniejące w chromatografii cieczowej między fazą ruchomą i fazą stacjonarną a analitami dały początek nowej odmianie analizy: chromatografii cieczowej oddziaływań hydrofilowych (czyli „wodolubnych”), która pojawiła się w literaturze za sprawą prof. Andrew J. Alperta z USA i właśnie prof. Buszewskiego¹.

¹ Badania nad mechanizmami procesów chromatograficznych nie byłyby możliwe, gdyby nie stypendium Fundacji im. Alexandra von Humboldta, które pozwoliło prof. Buszewskiemu współpracować w latach 1989–1992 z uznanymi naukowcami: Ernstem Bayerem z Uniwersytetu w Tybindze oraz Klausem Albertem i Klausem Ungerem z Uniwersytetu w Moguncji.

Uczeni pracowali i publikowali niezależnie, te same zjawiska nazywając inaczej. W 1990 roku na łamach czasopisma *Journal of Chromatography A* ukazał się jednak ich wspólny artykuł, w którym podsumowali dotychczasowy stan pozyskanej przez siebie wiedzy. Opisali mechanizmy zachodzące na granicy faz oraz zaproponowali nowy sposób rozdzielania i analizowania silnie polarnych związków, z którymi dotychczasowe techniki chromatograficzne radziły sobie słabo. Na przykład technika faz odwróconych – najbardziej rozpowszechniona, bo wszechstronna za sprawą możliwości wprowadzania nowych rodzajów faz stacjonarnych o zróżnicowanych właściwościach – w starciu z silnie polarnymi albo „wodolubnymi” analitami o zróżnicowanej masie cząsteczkowej nie potrafiła zatrzymać ich na złożu wypełnienia. Buszewski i Alpert „pokombinowali”, tzn. połączyli rozwiązania znane z innych technik chromatograficznych i zbudowali układ separacyjny chromatografii cieczowej oddziaływań hydrofilowych (HILIC), który z tego rodzaju analitami poradził sobie bez większych trudności.

Układ tworzy „wodolubna” faza stacjonarna (jest nią czysta krzemionka albo polimery z grupami funkcyjnymi obdarzone ładunkiem). Przez nią przepuszcza się wodno-organiczną miesza-

”
Natura traktowana z szacunkiem to przecież źródło niewyczerpanych inspiracji. Można więc wierzyć, że odtworzenie w laboratoriach rozwiązań powstałych w przyrodzie [...] rozwiązałoby wiele trapiących ludzkość problemów.

ninę fazy ruchomej (woda stanowi maksymalnie 37% mieszaniny z acetonitrylem). Skuteczność rozwiązania tkwi w tzw. poduszce hydrolitycznej uformowanej z warstwy zaadsorbowanych cząsteczek wody, które skutecznie ograniczały dostęp do wolnych, powierzchniowych grup funkcyjnych. Techniczne szczegóły analizy nie poruszają jednak wyobraźni tak mocno jak fakt, że ten sposób rozdzielania i analizowania związków silnie polarnych znalazł kapitalne zastosowanie w pracach m.in. z biochemii czy medycyny. Stał się częścią metody pozyskiwania nowych substancji leczniczych oraz biologicznie aktywnych i użytecznych w analizie klinicznej albo biomedycznej (np. w tworzeniu markerów chorób nowotworowych i cywilizacyjnych).

Opisanie techniki umożliwiającej rozdzielanie i oznaczanie substancji o charakterze silnie polarnym, z potencjałem aplikacyjnym obejmującym zagadnienia od medycznych i ekologicznych po tematy z dziedziny przemysłu spożywczego czy kosmetycznego, stało się inspiracją do kolejnych badań i publikacji, także autorstwa samego Buszewskiego. Polski profesor rozpoczął współpracę z naukowcami z Uniwersytetu w Kent (stan Ohio w USA) – Mieczysławem Jaroncem i Rogerem K. Gilpinem.

Konsekwencją wspólnie prowadzonych badań było powstanie jednej z najważniejszych w tej dziedzinie prac. Przedstawiała ona szczegóły teoretyczne procesu rozdzielania mieszaniny chemicznej i oznaczania jej składników w ramach chromatografii cieczowej oddziaływań hydrofilowych oraz wyjaśniała skuteczność tego układu.

Artykuł pt. “Hydrophilic Interaction Liquid Chromatography – A Powerful Separation Techniques” ukazał się na łamach czasopisma *Analytical and Bioanalytical Chemistry* w 2012 roku. Jego autorzy (prof. Buszewski opublikował pracę z Sylwią Nogą, swoją doktorantką) opisali m.in. właściwości i budowę fazy stacjonarnej, hydro-organiczną specyfikę fazy ruchomej, zasady doboru obu faz, warunki powstania tzw. trójkąta separacyjnego, zasady zachowania termodynamiki w jego obrębie i mechanizmy fizykochemiczne obecne w chromatografii cieczowej oddziaływań hydrofilowych. O randze tego podsumowania świadczy ponad 700 cytowań artykułu w publikacjach innych badaczy, które pojawiły się do lata 2021 roku.

Dla prof. Bogusława Buszewskiego nadrzędne znaczenie ma jednak zastosowanie wyników prowadzonych prac. Zwłaszcza że analiza chemiczna z pogranicza faz, potraktowana niczym model procesów zachodzących między światem zewnętrznym a wnętrzem komórki, pozwala

zbadać, co i w jaki sposób przenika przez błonę komórkową. Zrozumienie tego rodzaju mechanizmów to także niezbędny krok na długiej drodze poszukiwania nowej generacji związków naturalnego pochodzenia. Natura traktowana z szacunkiem to przecież źródło niewyczerpanych inspiracji. Można więc wierzyć, że odtworzenie w laboratoriach rozwiązań powstałych w przyrodzie na drodze ewolucji rozwiązałoby wiele trapiących ludzkość problemów. Trzeba tylko dać się zaskoczyć, np. możliwościami, jakie drzemiają w okrzemkach – jednokomórkowych algach żyjących na całej kuli ziemskiej. Jak przekonuje

prof. Buszewski (a Fundacja na rzecz Nauki Polskiej wspiera te naukowe dociekania), ażurowa nanostruktura ich porowatych pancerzyków, zmodyfikowana nitkami m.in. tytanu, ceru czy srebra, mogłaby stać się nośnikiem leków uwalnianych w określonych fizykochemicznych warunkach. A że to niejedyny pomysł związany z okrzemkami, będzie nad czym pracować.

Buszewski, B., Noga, S. (2012). Hydrophilic Interaction Liquid Chromatography (HILIC) – A Powerful Separation Technique. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 402 (1), 231–247.



Brzytwa i atom

Anna Mateja



**Jak przeprowadzić w fizyce
kwantowej maksymalnie
precyzyjny pomiar? I to
w badaniach z udziałem
nawet milionów fotonów
lub atomów, kiedy metoda
pomiaru musi poradzić
sobie z szumami otoczenia
i niedoskonałościami
eksperymentalnymi?**

Kiedy we wrześniu 2012 roku na łamach *Nature Communications* ukazywała się praca fizyków z Uniwersytetu Warszawskiego, dra Rafała Demkowicza-Dobrzańskiego (obecnie już po habilitacji) i Jana Kołodyńskiego (wtedy tuż po studiach, dziś autora doktoratu), takie pytania nazywano w metrologii kwantowej istotnymi. I choć zadawało je wielu, mozolnie szukając odpowiedzi, tę przyniosła dopiero publikacja polskich uczonych, w której zawarli wyniki badań prowadzonych m.in. w ramach projektu TEAM FNP pod nazwą „Fotoniczne implementacje technologii wykorzystujących efekty kwantowe”. Jego szefem był prof. Konrad Banaszek, obecnie związany z Centrum Nowych Technologii UW i prowadzący Centrum Optycznych Technologii Kwantowych w ramach programu FNP MAB.

Demkowicz-Dobrzański i Kołodyński dokonali w metrologii kwantowej wydarzenia przełomowego: opisali krok po kroku konkretne narzędzie – metodę matematyczną, którą można się posłużyć w rozwiązywaniu problemu z dziedziny metrologii kwantowej.

Dla wyjaśnienia istoty rzeczy trzeba jednak najpierw przypomnieć, że najbardziej precyzyjne metody pomiarowe w fizyce oparte są na zjawisku interferencji światła. Na poziomie fizyki klasycznej interferencja wiąże się ze wzmacnianiem lub

wygaszaniem amplitudy fali świetlnej na skutek nałożenia się na siebie dwóch lub więcej fal. Opis światła w ramach fizyki kwantowej wskazuje jednak, że światło kryje w sobie znacznie większy potencjał niż ten opisywany w ramach fizyki klasycznej. Czułość pomiarów interferometrycznych można bowiem zwiększyć, przygotowując takie kwantowe stany światła, w których ważną rolę odgrywa splątanie kwantowe.

To zjawisko jedyne w swoim rodzaju (wykorzystywane m.in. w konstrukcji komputerów kwantowych), pojawiające się naturalnie w opisie stanów fotonów – elementarnych cząstek energii niesionej przez światło – albo atomów. Fotony można potraktować jak „linijkę kwantową” do wykonywania jeszcze dokładniejszych pomiarów niż te bazujące wyłącznie na klasycznym zjawisku interferencji światła. Najpierw jednak muszą zostać splątane, czyli wprowadzone w stan, w którym wykazują między sobą silną korelację, niespotykaną w innych źródłach światła naturalnego lub sztucznego. Ta korelacja właśnie powoduje, że np. splątane fotony zachowują się dokładnie tak jak fotony o efektywnie znacznie krótszej długości fali, co pozwala je wykorzystać do wykonywania bardziej precyzyjnych pomiarów. Dla przedstawienia zasad działania takiej „linijki kwantowej” trzeba założyć, że jeden

splątany foton odpowiada np. 1 mm. Jeżeli więc w stan splątania zostanie wprowadzonych 10 fotonów, staną się one linijką o podziałce 0,1 mm, poprawiając precyzję badania dokładnie 10 razy itd.

Założenia teoretyczne metrologii kwantowej wydają się dość przejrzyste, ale ich realizacja nie przychodziła bez trudności. Te powstawały przede wszystkim za sprawą splątania kwantowego, w jakim musiały się znajdować fotony, ale które czyniło cząstki światła wrażliwymi na szumy i niedoskonałości eksperymentalne. Pytanie, czy rozwiązanie tak czułe na każdą zmianę otoczenia jak kwantowa poprawa precyzji może stać się w ogóle użyteczne w badaniach, było fundamentalne i gorące. Rozpalało umysły

wielu naukowców, w tym Rafała Demkowicza -Dobrzańskiego – autora pracy doktorskiej na temat kwantowej teorii informacji. Odpowiedź znajdowała się w zasięgu ręki, ale żeby jej udzielić, trzeba było czytać mało znane prace m.in. japońskich matematyków.

Nim Demkowicz-Dobrzański poznał człowieka, który miał zwyczaj przeglądając bazę Archive.org (internetową bibliotekę książek i artykułów, filmów, oprogramowania i innych dóbr intelektualnych, dostępną dla wszyst-

kich i za darmo) w poszukiwaniu interesujących go publikacji naukowych, nawiązał – za sprawą prof. Banaszka – kontakt z fizykami z Oksfordu, również zaintrygowanymi ideą używania światła kwantowego do zwiększania precyzji pomiaru. Z nimi opublikował pierwszy tekst na ten temat. Dzisiaj nazywa go „dłubaniną”. Zgłębianie tajników jednego z najważniejszych problemów metrologii kwantowej polegało bowiem na wykonywaniu symulacji komputerowych z wykorzystaniem coraz większej liczby zmiennych, przeprowadzanych z nadzieją, że uda się uzyskać wynik pozwalający na wyjaśnienie zjawiska. Technika *brute force* nie miała jednak szans doprowadzić badaczy do zasadniczych rozstrzygnięć, które można byłoby scalić w teorię – tak, by ujmowała problem syntetycznie i jasno wyjaśniała, jak wykonać precyzyjny pomiar, posługując się światłem kwantowym.

Z punktu widzenia teoretyki fizyki sytuacja wydawała się – wbrew pozorom – idealna. Ciekawe, istotne doświadczalnie problemy (uzyskane wyniki, choć cząstkowe, intrygowały, bo dotyczyły konkretnych zagadnień fizycznych: detektorów fal grawitacyjnych i precyzyjnych urządzeń pomiarowych) czekały na porządną podbudowę teoretyczną. Tyle że nic nie wskazywało na to, by to trudne zagadnienie udało się rozwikłać inaczej

niż korzystaniem z komputerów o coraz większej mocy i żmudnym zwiększaniem branych pod uwagę zmiennych. Żaden komputer nie potrafi jednak analizować wszystkich możliwych stanów bardzo dużej liczby fotonów (jak ma to miejsce np. w detektorach fal grawitacyjnych), a zrozumienie, jakie stany będą najbardziej odporne na szumy i rozproszenia (fachowo nazywane dekoherencjami), stanowiło kwestię fundamentalną.

Jak proste bywa czasami rozwiązanie skomplikowanych problemów, Demkowicz-Dobrzański przekonał się za sprawą Jana Kołodyńskiego, dociekliwego studenta Wydziału Fizyki UW, który przeglądał zasoby we wspomnianym anglojęzycznym Archive.org. Powszechnie dostępne, ale czytane przez niewielu artykuły (autorstwa m.in. japońskich uczonych), opisywały pewne struktury matematyczne. Wydawały się kompletną abstrakcją, napisaną językiem zrozumiałym dla nielicznych, którzy – niczym mnisi klasztorów ukrytych przed światem – poznali tajniki języka matematycznych konstrukcji myślowych. Demkowicz-Dobrzański i Kołodyński porozumiewają się jednak zarówno językiem fizyków matematycznych (opartym na schemacie twierdzenie–dowód), jak i mową fizyków doświadczalnych (dotyczącą konkretnych fizycznych zagadnień). Ta umiejętność

pomogła im połączyć nowo poznaną strukturę matematyczną z najważniejszym zagadnieniem metrologii kwantowej. Stworzona dzięki temu teoria bazuje więc na języku matematyki i przy jego pomocy przedstawia w prosty sposób ogólne narzędzie, które pozwala określić maksymalne ograniczenia kwantowej poprawy precyzji. Stosowana w ogólnych modelach metrologii kwantowej uwzględnia też efekty działania dowolnej postaci nieskorelowanego szumu.

363 – tyle cytowań publikacja z *Nature Communications* doczekała się do marca 2021 roku, stając się jedną z najczęściej przywoływanych prac z dziedziny metrologii kwantowej. Okazała się przełomowa, ponieważ dostarczyła uniwersalnych narzędzi (prowadzących do policzalnych wyników), które zapewniły szerszą perspektywę w patrzeniu na zagadnienia pomiaru w fizyce kwantowej. Od ukazania się artykułu żadna praca nie może być prowadzona bez odniesienia się do wyników w nim zawartych.

Teoria Demkowicza-Dobrzańskiego i Kołodyńskiego stała się więc jednym z fundamentów świata metrologii kwantowej. Zadziałała też niczym brzytwa Ockhama na strumień nadoptimistycznych publikacji, które obiecywały więcej, niż były w stanie wy-

jaśnić. „Kwantowa linijka” eliminuje zarówno nierealistyczne modele oparte na spekulacjach, jak i analizy wywodzone z nieweryfikowalnych założeń czy pomysły, na które nie warto tracić energii, bo nie zadziałają podczas weryfikacji eksperymentalnej.

Nie bez znaczenia jest i to, że w tak konkurencyjnej dziedzinie jak metrologia kwantowa, gdzie sporo się dzieje, właśnie fizycy teoretyczni z Warszawy, za sprawą publikacji w *Nature Com-*

munications i kolejnych na ten temat, są uważani za ekspertów na światowym poziomie. „Kwantowa linijka” zadziałała niczym trampolina, ale nie tylko do dalszej kariery – przede wszystkim do kolejnych naukowych poszukiwań.

Demkowicz-Dobrzański, R., Kołodyński, J., Guță, M. (2012). The Elusive Heisenberg Limit in Quantum-Enhanced Metrology. *Nature Communications*, 3 (1063).



Selektywność i śmiałość

Karolina Głowacka



**W jaki sposób usprawnić
poszukiwanie leków
hamujących aktywność
proteaz? Jak może to
pomóc w walce z chorobami
cywilizacyjnymi? Jaki
potencjał mają nienaturalne
aminokwasy?**

Selektywność i śmiałość – te dwa słowa najlepiej opisują osiągnięcia naukowe prof. Marcina Drąga z Politechniki Wrocławskiej. Selektywność to kluczowa zaleta opracowanej przez niego technologii „HyCoSuL” (ang. Hybrid Combinatorial Substrate Library). Za stworzenie tej uniwersalnej dla chemii, biologii i medycyny technologii prof. Drąg otrzymał w 2019 roku najbardziej prestiżową nagrodę naukową w Polsce – Nagrodę FNP w obszarze nauk chemicznych i o materiałach. „HyCoSuL” może w znaczący sposób przyczynić się do powstania nowej, szerokiej gamy leków m.in. na choroby cywilizacyjne.

Śmiałość z kolei pasuje do samego naukowca, który wbrew sceptycyzmowi kolegów i koleżanek postawił w swoich badaniach na wykorzystanie nienaturalnych aminokwasów. Tymi ostatnimi prof. Drąg zainteresował się w czasie pracy w Sanford Burnham Prebys Medical Discovery Institute (La Jolla, USA). Jak sam dziś wspomina, był to okres intensywnej nauki i rzucenia się na głęboką wodę. Z czasem nienaturalne aminokwasy stały się jednym z najważniejszych elementów technologii opracowanej przez badacza.

Wcześniej Marcin Drąg, wtedy ze stopniem doktora, wziął udział w kreśleniu perspektyw dla całej branży badań nad lekami opartymi na proteazach (enzymach hydrolizujących białka). Pracując

nad publikacją dotyczącą nowych strategii i długookresowych perspektyw badawczych, pełnił rolę przedstawiciela młodszego pokolenia, ze świeżym spojrzeniem uzupełnianym doświadczeniem szefa Instytutu w La Jolla – prof. Guya S. Salvesena.

Po trzech latach zbierania materiału oraz szerokich konsultacji ze światem akademickim i farmaceutycznym w 2010 roku w cenionym *Nature Reviews Drug Discovery* ukazała się publikacja „Emerging Principles in Protease-Based Drug Discovery”. Praca od razu spotkała się z ogromnym zainteresowaniem i – jak z dumą podkreśla prof. Drąg – sprawdziła się w bardzo wielu punktach. Publikację cytowano ponad 500 razy (Google Scholar, stan na lipiec 2021). Jednym z kluczowych wątków artykułu były perspektywy wykorzystania specyficzności substratowej proteaz do tworzenia selektywnych molekuł. Temat ten stał się przewodni w badaniach prof. Drąga i był intensywnie rozwijany także po powrocie badacza do Polski.

Uwaga naukowców skupiona na proteazach ma swoje głębokie uzasadnienie społeczne. Wiele chorób cywilizacyjnych, np. cukrzyca typu 2, większość nowotworów, choroby neurodegeneracyjne, a także część schorzeń bakteryjnych, wirusowych i związanych

”
Pożądaną wysoką selektywność udało się uzyskać właśnie dzięki opracowanej przez prof. Marcina Drągę metodzie „HyCoSuL”.

z nadciśnieniem wynika z wadliwego czy niepożądanego działania enzymów, w szczególności proteaz. Już od dekad wiadomo więc, że proteazy są interesującym celem działania leków. Udało się opracować i wprowadzić na rynek skuteczne preparaty przeciwnowotworowe, przeciwcukrzycowe i antywirusowe (HIV) hamujące aktywność proteaz. Obecnie jednak tego typu farmaceutyki można stosować tylko wobec ograniczonej liczby chorób; wiele proteaz (u ludzi opisano ich około 650) wymaga dalszych badań.

W cieniu zatwierdzonych leków pozostaje wiele porażek firm i zespołów usiłujących opracować preparaty hamujące aktywność proteaz. Ogromną trudnością jest niespecyficzność działania tych enzymów. Ich funkcje są ze sobą powiązane – blokowanie jednej powoduje hamowanie działania innych, a co za tym idzie – silne skutki uboczne. Dlatego tak ważne było stworzenie metody pozwalającej na opracowanie wysoce selektywnej cząsteczki działającej precyzyjnie na wybraną proteazę. Prof. Drąg wyzwanie to porównuje do zadania snajpera, który musi w gęstym tłumie unieszkodliwić niebezpiecznego zamachowca.

Pożądaną wysoką selektywność, jak już wspomniano, udało się uzyskać właśnie dzięki

opracowanej przez prof. Marcina Drągę metodzie „HyCoSuL”. Technologia łączy zalety chemii kombinatorycznej i wykorzystania szerokiej palety nienaturalnych aminokwasów. Takie aminokwasy znacząco zwiększają szansę na znalezienie idealnego chemicznego „klucza”, który pasuje do „zamka” – aktywnego miejsca enzymu. Przed powstaniem prac prof. Drąg nie istniała strategia ich optymalnego wykorzystania.

Zaproponowana technologia to zasadnicza zmiana jakościowa w badaniach nad proteazami. Publikacje z wynikami zastosowania technologii „HyCoSuL” ukazywały się wielokrotnie w tak prestiżowych czasopismach, jak: *Journal of the American Chemical Society*, *Angewandte Chemie*, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *Chemical Science*, *Cell Death and Differentiation*, *Nature Chemical Biology*, *Science Advances*, *ACS Chemical Biology*, *Antiviral Research* czy *Journal of Medicinal Chemistry*. Co więcej, prof. Drąg opisał całą technologię w uznanym *Nature Protocols*.

Obecnie Drąg poświęca się przede wszystkim pracom wdrażającym zdobytą wiedzę. Współpracuje z kilkudziesięcioma grupami badawczymi na całym świecie, a przez jego laboratorium przechodzi niemal każda proteaza analizowana przez firmy farmaceutyczne czy ośrodki akademickie. Po konsultacje do jego wrocławskiego zespołu

zgłosiły się chociażby Uniwersytet Stanforda, Uniwersytet Harvarda, Uniwersytet Cambridge, a także firmy Genentech/Roche, Novartis, Novo Nordisk, BASF, Cambridge Protein Works.

Warto podkreślić, że u progu pandemii COVID-19 zespół prof. Drąga, wykorzystując technologię „HyCoSuL”, określił preferencje katalityczne proteazy SARS-CoV-2 Mpro, która jest kluczowa dla inwazji i replikacji wirusa. Badania te pozwoliły na stworzenie markera chemicznego służącego do bezpośredniej wizualizacji zakażonych komórek w próbkach pobranych od pacjentów, a powstałe substraty i inhibitor zostały skomercjalizowane przez japoński Peptide Institute na podstawie umowy komercyjnej z Politechniką Wrocławską. Niedługo później w laboratorium prof. Drąga określono także preferencje katalityczne drugiej proteazy koronawirusa, SARS-CoV-2 PLpro, która jest niezbędna do inwazji i replikacji wirusa. Wyniki tych badań zostały udostępnione za darmo, by przyspieszyć walkę z pandemią. Obie prace ukazały się w renomowanych czasopiśmie – *Nature Chemical Biology* oraz *Science Advances*. Wyniki badań są także przedmiotem zgłoszenia patentowego. Z opublikowanych danych skorzystała m.in. firma Pfizer, która opracowała lek przeciw COVID-19 - zatwier-

dzony warunkowo do stosowania w leczeniu w USA i Europie.

Technologia odniosła niewątpliwy sukces. Obecnie, po 10 latach badań i przeprowadzeniu setek eksperymentów na ponad 100 enzymach proteolitycznych, można śmiało stwierdzić, że nie ma lepszej technologii w poszukiwaniu małowcząsteczkowych związków chemicznych dla enzymów proteolitycznych.

Prof. Drąg jest przekonany, że przyszłość należy do wykorzystania nienaturalnych aminokwasów. Wspomina, że kiedy 15 lat temu zaczynał pracę nad nimi, większość środowiska i firm farmaceutycznych traktowała to z rezerwą. Uważano, że nienaturalne aminokwasy będą nieskuteczne i – wykorzystane w lekach – toksyczne. Polski badacz udowodnił, że obawy te nie są słuszne. Dziś mamy już zatwierdzone przez FDA leki, w strukturach których znajdują się nienaturalne aminokwasy wykorzystywane np. do leczenia niektórych nowotworów. Trzy takie związki zawiera również wspomniany lek przeciw COVID-19. Nienaturalne aminokwasy stały się popularnym przedmiotem badań dla wielu grup badawczych.

Warto podkreślić, że FNP towarzyszyła prof. Marcinowi Drągowi od naukowej młodości. Zaczęło się od stypendium START po obronie

doktoratu w 2005 roku (wyróżnionego jako najlepsza praca doktorska roku z chemii organicznej w Polsce). Cztery lata później naukowiec otrzymał grant FOCUS na założenie pierwszego własnego zespołu badawczego, w 2017 roku – TEAM (duży grant na realizację projektu badawczego, w który zaangażowani są młodzi naukowcy), a w 2019 roku – Nagrodę Fundacji. W 2020 roku, po wybuchu pandemii COVID-19,

Fundacja przekazała Marcinowi Drągowi grant w wysokości 125 tys. euro, jaki jako jedyna organizacja w Polsce otrzymała od Instytutu Europejskiego Banku Inwestycyjnego w celu wsparcia prac badawczych związanych z koronawirusem.

Drąg, M., Salvesen, G.S. (2010). Emerging Principles in Protease-Based Drug Discovery. *Nature Reviews Drug Discovery*, 9, 690–701.



Skarby dla wytrwałych

Patrycja Dołowy



**Czy w XXI wieku na
stanowisku od setek lat
intensywnie plądrowanym
przez rabusiów można
dokonać przełomowego
odkrycia archeologicznego?
Jak nowe odkrycie zmienia
nie tylko paradygmat
badawczy, ale i stosunek
lokalnej społeczności do
własnego dziedzictwa?**

Prof. Miłosz Giersz z Wydziału Archeologii UW i jego żona prof. Patrycja Prządka-Giersz z Wydziału „Artes Liberales” UW po raz pierwszy znaleźli się w Peru w 1999 roku, jeszcze jako studenci. Pojechali na pustynię Nazca do prof. Giuseppe Oreficiego, który prowadził tam, gdzie znajdują się słynne geoglify (system linii, które tworzą w ziemi ogromnych rozmiarów rysunki), największe badania na płaskowyżu. Duże wrażenie robiły na nich stanowiska wciąż kryjące prawdziwe skarby, pozostawione nawet przez rabusiów grobów. Marzyli wtedy o tym, by kiedyś, gdy już zostaną archeologami, prowadzić prace właśnie na wybrzeżu Peru. Po obronie dyplomów i rozpoczęciu samodzielnych badań w to miejsce kazały im wrócić nie tylko przecucie oraz zachwyty nad krainą wysokich gór i dawną kulturę Inków, ale też wiedza o tym, jak znaczące mogą być odkrycia dokonywane w tym regionie, w tych kontekstach archeologicznych. Jest to jeden z takich obszarów świata (obok Egiptu i niektórych terenów Bliskiego Wschodu), w którym panujący klimat pozwala na zachowanie się zabytków w idealnym stanie: suszonej na słońcu cegły mułowej, liczących sobie 1200 lat fragmentów czy nawet całych naczyń z tykw, tkanin wyglądających po odsłonięciu, jakby były tam złożone dzień wcześniej. Jednocześnie to

właśnie te obszary były przez wieki najbardziej narażone zarówno na nielegalne rabowanie, jak i na romantyczną archeologię końca XIX i początków XX wieku, kiedy to jednego popołudnia setki robotników potrafiły odsłonić mnóstwo materiału archeologicznego, tracąc go bezpowrotnie.

W 2002 roku Miłosz Giersz i Patrycja Prządka-Giersz zaczęli prowadzić własne badania w prowincji Huarmey w Peru, najpierw przez 10 lat w zapomnianej, nigdy niebadanej Dolinie Żmij (Valle Culebras). Odnosili mniejsze i większe sukcesy – dostawali granty, odkryli ponad 150 nieznanych wcześniej stanowisk archeologicznych, na temat których powstawały publikacje, a oni stawali się w swojej dziedzinie rozpoznawalni. A jednak wciąż wydawało im się, że w tych okolicach czeka na nich coś większego do zbadania. Do Castillo de Huarmey – kilkanaście kilometrów od stanowiska w Culebras – trafili w 2010 roku. W wyborze stanowiska nie było przypadku – zdecydował o nim wynik analizy terenu i tekstów źródłowych. W tym miejscu nigdy nie były prowadzone badania wykopaliskowe, a jednak można było znaleźć publikacje na jego temat, podobnie jak obiekty odkrywane w poprzednich wiekach, wywożone, a dziś przechowywane w różnych

”
Duże wrażenie
robiły na nich sta-
nowiska wciąż kryjące
prawdziwe skarby, po-
zostawione nawet przez
rabusiów grobów.

muzeach na świecie, pochodzące z bardzo dużym prawdopodobieństwem właśnie stamtąd. Sama nazwa miejscowości wskazywała na znaczenie tego miejsca (Castillo oznacza zamek). Hiszpanie za czasów konkwisty i kolonialnych nadawali różne nazwy zdobywanym terenom, np. *castillo* w przypadku miejsc i budynków prekolumbijskich o monumentalnym charakterze. Fragment dawnej budowli musiał wtedy górować nad krajobrazem miasta. Tak więc badacze wiedzieli, gdzie szukać. A jednak nie było im łatwo przekonać do istotności planowanych działań grantodawców. Kolejne dwa lata czekali na finansowanie, które pozwoli im zacząć badania na stanowisku. Było to frustrujące, ale spodziewali się takiego scenariusza. Za szaleństwo uważano badanie stanowisk wcześniej splądrowanych i całkowicie zrujnowanych. Rzeczywiście, kiedy polscy archeolodzy po raz pierwszy odwiedzili Castillo, dokładnie w tym miejscu, w którym prof. Giersz chciał zacząć prace, znajdowało się wysypisko śmieci – współczesne odpadki mieszały się tam z ludzkimi kośćmi z rozkopanych grobów.

Dzięki pierwszemu małemu grantowi z Narodowego Centrum Nauki (NCN) naukowcy w 2010 roku przeprowadzili nieinwazyjne badanie terenu, by zlokalizować grobowce. Gdy czekali na większe fundusze, prof. Giersz został laureatem

programu KWERENDA FNP. Był rok 2011. Profesor przeprowadził kwerendę archiwalną w Limie, gdzie natrafił na tropy nieznanymi badaniami archeologicznymi Julia Cesara Tello. Uczony ten – uznawany w Peru za ojca tamtejszej archeologii – odwiedził badane przez polskich archeologów stanowisko podczas swojej wyprawy w region Huaylas w 1919 roku. Pomysł był efektem odkrycia na rynku antykwarycznym w Limie serii przepięknie dekorowanych, rzadkich artefaktów drewnianych, które zdaniem sprzedawcy pochodziły z jednego ze stanowisk archeologicznych w dolinie rzeki Huarmey. Niestety, raport z tej części ekspedycji nigdy nie został opublikowany. Podczas pobytu w Archiwum Tello Narodowego Uniwersytetu św. Marka w Limie prof. Giersz miał okazję poznać i zbadać odręczne zapiski polowe, zdjęcia i rysunki zabytków zadokumentowanych podczas tamtych pionierskich badań archeologicznych. Jak wskazywała ich analiza, wcześniejsze interpretacje tego stanowiska, zgodnie z przeczuciem Giersza, mogły być błędne, co ugruntowało go w przekonaniu, że zapomniane ruiny Castillo de Huarmey mogą okazać się niezwykle istotne. Stanowisko to wydało się kluczem do zrozumienia fenomenu powstania pierwszego prekolumbijskiego imperium. Na potwierdzenie tezy długo nie trzeba było czekać.

Już pod koniec 2011 roku przyszła pozytywna decyzja o przyznaniu dużego grantu badawczego przez NCN i po zaledwie dwóch latach kierowany przez prof. Giersza polsko-peruwiański zespół archeologów dokonał wielkiego odkrycia.

Wydawało się, że sam szczyt platformy monumentalnej jest w całości splądrowany. Miłosz Giersz uparł się jednak, żeby najbardziej wyniesione miejsce z pozostałościami murów zdobionych kolorowym stiukiem mimo wszystko przebadac wykopaliskowo. Choćby po to, by sprawdzić, czym tak naprawdę jest. Archeolodzy odkryli, że nie była to platforma grobowa, tylko tzw. *chullpas*, czyli wielopiętrowe świątynie poświęcone kultowi zmarłych, gdzie eksponowano mumie. Dopiero w fundamentach budowli znajdowała się komora grobowa, do której ekipa dotarła pod sam koniec sezonu badań, kiedy miała się już wycofywać. Profesor jednak się uparł – uważał, że trzeba spróbować odsłonić podłogę. Pod nią była sterylna warstwa kruszonych kamieni. Archeolog powinien dojść do litej skały, żeby mieć pewność, że nic już nie znajdzie. Zaczęto więc wybierać ponad 30 ton tłuczonego kamienia. Gdy pojawiły się *puparia*, czyli kokony rzekome muchy domowej, był to sygnał, że pod spodem jest jakiś depozyt organiczny. Jeszcze w tamtym momencie nie myślano, że może to

być pierwszy nienaruszony grobowiec królewski, w którym znajdowały się szczątki 58 arystokratek, sześciu ludzkich ofiar, dwojga okaleczonych strażników i ponad 1300 artefaktów wykonanych ze złota, srebra, brązu, a także zdobiona ceramika, rzadkie wyroby z drewna, kości, muszli i drogocennych kamieni. Część ciał okazała się tak znakomicie zachowana, że można było zadokumentować nawet tatuaże. A w wyposażeniu grobowym znaleziono rzeczy, które normalnie nie zachowałyby się nawet w suchej ziemi, np. indiański makijaż.

Odkrycie to zostało uznane przez towarzystwo National Geographic i miesięcznik naukowy *ARCHAEOLOGY. A Publication of Archaeological Institute of America* za jedno z najważniejszych odkryć archeologicznych na świecie. Obecnie uważa się je za najistotniejsze odkrycie dotyczące imperium Wari, które kontekstualizuje materiał wcześniej znany, a często błędnie przypisywany geograficznie, gdyż wszystkie eksponaty w depozytach muzeów pochodziły z badań rabunkowych z rzekomej stolicy gdzieś w górach. Miłosz Giersz nigdy nie był przekonany, że w tym klimacie, gdzie prawie nic się nie zachowuje, miałyby zostać znalezione zabytki organicznych materiałów. Przełomowych danych zmieniających interpretację kultury przedinkaskiej co roku

”
Dzięki badaniom zespołu kierowanego przez prof. Miłosza Giersza zupełnie zmieniło się postrzeganie okresu przedinkaskiego.

przybywa, bo polscy archeolodzy prowadzą na znalezionym materiale zaawansowane badania archeometryczne, które obalają dotychczasowe ustalenia traktowane wcześniej jak dogmaty, np. że ceramika z tego okresu była produkowana w różnych miejscach i eksportowano ją do różnych zakątków imperium. W Castillo badacze znaleźli większość występujących na terenie imperium stylów ceramicznych. Przebadał próbkę zaawansowanymi metodami analiz fizykochemicznych i okazało się, że niemal wszystkie naczynia zostały wyrobione na miejscu z gliny pochodzącej z lokalnych źródeł.

Niezwykle ważną częścią współczesnych działań archeologicznych jest konserwacja. Wydobyte przedmioty, świetnie zachowane w ziemi, na powietrzu natychmiast mogą zacząć niszczyć. Istotne było znalezienie partnera, który zapewni zabezpieczenie obiektów. Badacze nawiązali kontakt z prywatnym Muzeum Sztuki w Limie – jednym z najlepiej prosperujących muzeów w Ameryce Łacińskiej. To z kolei znalazło sponsora – kompanię górniczą ANTAMINA.

Dzięki badaniom zespołu kierowanego przez prof. Miłosza Giersza zupełnie zmieniło się postrzeganie okresu przedinkaskiego. Wiadomo już, że okres imperium Wari to czas, kiedy do-

konał się wielki przewrót kulturowy prowadzący do narodzin imperium Inków. Prawdopodobnie legendarni władcy imperium inkaskiego, pojawiający się w opowieściach i mitach dynastycznych, to postacie historyczne – władcy imperium Wari, których nekropole znaleźli polscy archeolodzy.

Rabunkowe naruszenia terenu nadal się zdarzają i stanowią problem w regionie. Peruwiańskie Ministerstwo Kultury próbuje z tymi praktykami walczyć. Nie jest łatwo, bo lokalnie istnieje swojego rodzaju tradycja. Bywało tak, że w ramach lekcji wychowania fizycznego wuefista, a jednocześnie nauczyciel historii lokalnej, zabierał uczniów na nielegalne wykopaliska i powiększał w ten sposób kolekcję danej szkoły. Badacze angażują się więc w uświadamiające programy społeczne i edukacyjne. Lokalna społeczność jest bardzo zainteresowana odkryciem i dumna z tego, co ujawniły wykopaliska. Jedną ze znalezionych arystokratek nazwała Królową Wari z Huarmey. Powstają na jej temat i na temat odkrycia murale, organizowane są warsztaty. W Polsce wiele z unikatowych eksponatów odnalezionych podczas prac badawczych prof. Giersza zostało zaprezentowanych na wystawie czasowej w Państwowym Muzeum Etnograficznym w Warszawie. W Peru wszyscy czekają na otwarcie muzeum i przystosowanie stanowiska do ruchu

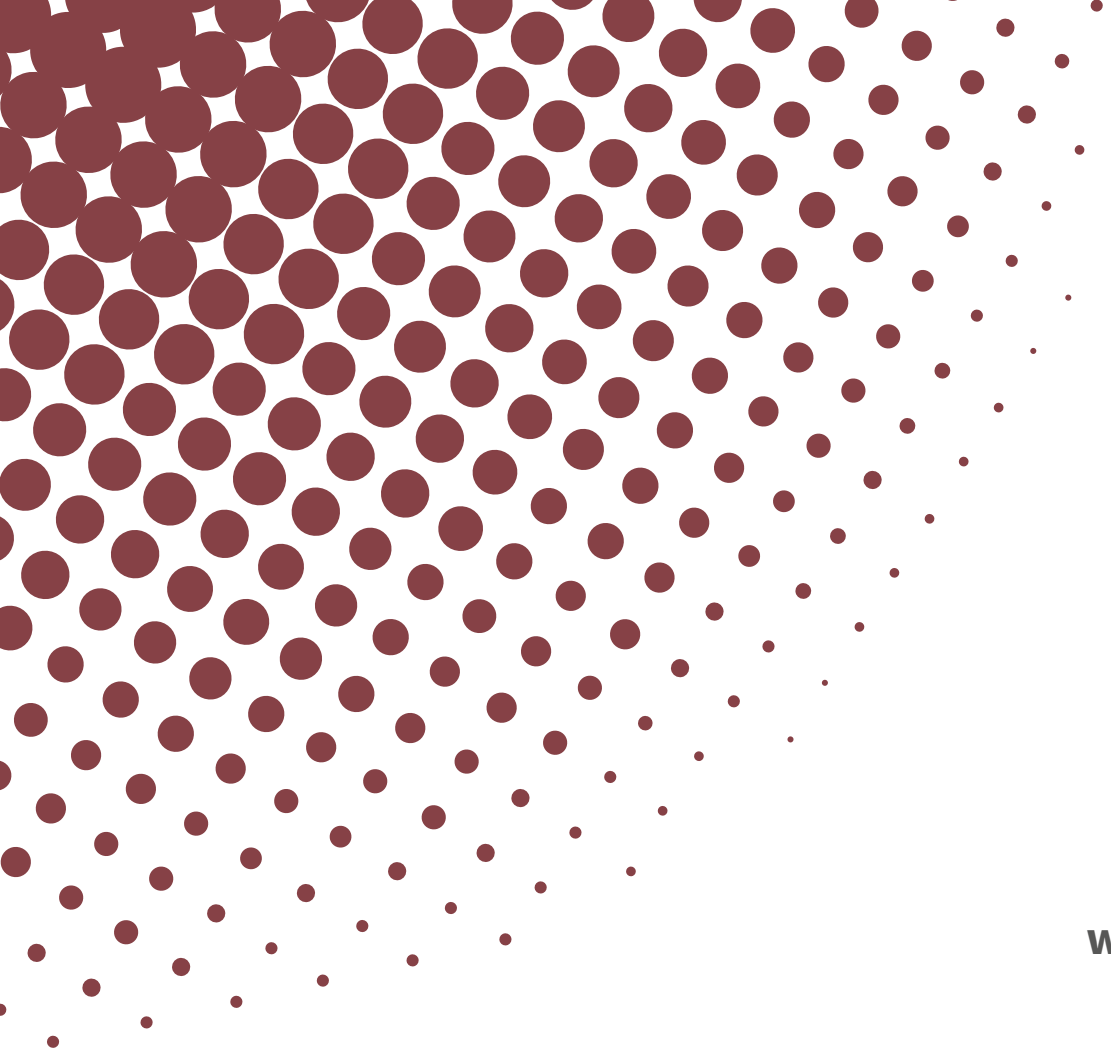
turystycznego, bo chcieliby już oglądać eksponaty i samo stanowisko – trzeba je zabezpieczyć tak, by umożliwić zwiedzanie, a jednocześnie nadal prowadzić badania. Przez 10 lat archeolodzy przebadali jedynie kilka procent stanowiska.

Mogą pojawić się kolejne odkrycia, które poszerzą lub zmienią dzisiejsze interpretacje. To wszystko jeszcze przed zespołem prof. Miłosza Giersza, a kto wie, może przed następnym pokoleniem archeologów.



Podwójny atak na nowotwór

Karolina Głowacka



**Jaki potencjał tkwi
w połączeniu dwóch terapii
przeciwnowotworowych:
fotodynamicznej
i immunoterapii? Czy dzięki
zastosowaniu podwójnej
broni można odebrać
komórkom rakowym
zdolność do obrony
i kontrataku?**

Najpierw sprowadzili z Ukrainy laser helowo-neonowy. Duży i niewygodny, ale taki był w zasięgu możliwości. Z kolei pewna kanadyjska firma sprezentowała im pierwszy związek fotouczulający. W takich warunkach pod koniec lat 90. Dominika Nowis i Jakub Gołąb – dwójce naukowców z wykształceniem medycznym, obecnie pracujących w Zakładzie Immunologii WUM – rozpoczęli pracę nad połączeniem przeciwnowotworowej terapii fotodynamicznej i immunoterapii. Poświęcili temu zagadnieniu 15 lat, po drodze pokonując trudności, ucząc się na błędach i podążając za własną naukową intuicją.

Terapia fotodynamiczna (ang. *photodynamic therapy* – PDT) zwróciła uwagę obojga przede wszystkim ze względu na ograniczone działania niepożądane: nieporównanie mniejsze niż w przypadku chemio- i radioterapii czy operacji chirurgicznych. Metoda polega na wprowadzaniu do organizmu związku fotouczulającego, a następnie naświetlaniu tkanek nowotworowych światłem laserowym, które samo w sobie jest nieszkodliwe. Dopiero przy połączeniu tych dwóch elementów produkowany jest tlen singletowy, a wtórnie inne reaktywne formy tlenu, które uszkadzają komórki, doprowadzając do ich śmierci. Zabiegi są nieinwazyjne, a większość chorych nawet tego samego dnia może wrócić do domu.

Terapia ta ma również kolejną bardzo pożądaną cechę: jest selektywna. To dlatego, że wiele związków fotouczulających gromadzi się w komórkach nowotworowych w wyższym stężeniu niż w prawidłowych. Dodatkowo światło można nakierowywać jedynie na nowotwór z niewielkim marginesem zdrowej tkanki – w efekcie terapia uderza precyzyjnie w nowotwór, co minimalizuje skutki uboczne. Wreszcie, dzięki użyciu bardzo cienkich światłowodów, można dotrzeć nawet do głęboko ukrytych zmian nowotworowych.

Jednocześnie ze względu na fizyczne ograniczenia stosowanego światła (zakres widzialny) nie przenika ono w pełni w głąb większych guzów: w oddalonych od źródła światła warstwach nowotworu reakcja fotodynamiczna jest suboptymalna (nie w pełni skuteczna). Część komórek nowotworowych ma więc szansę na wytworzenie reakcji obronnej. Mimo rozwijającej się jednocześnie z PDT immunoterapii wątek odpowiedzi immunologicznej komórek nowotworowych pobudzonych suboptymalną reakcją fotodynamiczną nie był wcześniej badany. Niesłusznie, bo mechanizmy umożliwiające przeżycie i naprawę komórek nowotworowych przyczyniały się do wznowy procesu nowotworowego. Prof. Nowis i prof. Gołąb postanowili

”
Prof. Nowis
i prof. Gołąb
postanowili uzupełnić
tę lukę i stali się
pionierami połączenia
fotodynamiki
oraz immunoterapii.

uzupełnić tę lukę i stali się pionierami połączenia fotodynamiki oraz immunoterapii.

Jak sami przyznają, pierwsze prace nie powiodły się. Naukowcom nie udało się zaobserwować wzmocnienia działania przeciwnowotworowego. Jednak przekonanie o słuszności obranego kierunku, a także wysiłek włożony w zdobycie sprzętu skłoniły ich do podjęcia ponownych prób. Kontynuowali badania, a te z czasem zaczęły być wspierane przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej, aż przyszedł naukowe sukcesy.

Podczas analizy ekspresji genów przy użyciu mikromacierzy oligonukleotydowych badaczom udało się zidentyfikować kilka genów, które potencjalnie mogłyby uczestniczyć w mechanizmach oporności komórek nowotworowych na działanie PDT. Do białek kodowanych przez te geny należą cyklooksygenaza 2 (COX-2), oksygenaza hemowa 1 (HO-1), dysmutaza ponadtlenkowa (SOD2), dehydrogenaza aldehydowa czy też białko Rho. Prof. Nowis i prof. Gołąb wykazali, że blokując COX-2, można zwiększyć działanie przeciwnowotworowe terapii fotodynamicznej *in vivo*. Indukcja HO-1 czy SOD2 jest z kolei prawdopodobnie ważnym mechanizmem chroniącym komórki nowotworowe przed działaniem PDT.

Naukowcy zwrócili również uwagę na reaktywne formy tlenu powstające w konsekwencji zastosowania PDT, a w efekcie powodujące szkodliwe zmiany w białkach. Białka takie muszą być sprawnie usuwane z komórek, w przeciwnym razie tworzą toksyczne złoże. Badacze postanowili sprawdzić, co dzieje się z tymi białkami w komórkach nowotworowych poddanych terapii fotodynamicznej. Zaobserwowali, że nie tylko dochodzi do ich gromadzenia, ale że sama terapia fotodynamiczna wpływa na aktywność proteasomów (wielkocząsteczkowych kompleksów enzymatycznych) uczestniczących w usuwaniu (degradacji) wadliwych białek w komórkach.

Przetestowali więc działanie terapii fotodynamicznej w połączeniu z zastosowaniem inhibitorów proteasomów. Zaobserwowali spektakularne działanie przeciwnowotworowe, które nie tylko wiązało się z wyleczeniem zwierząt doświadczalnych z choroby nowotworowej, ale również powodowało długotrwałą odporność immunologiczną na tę chorobę, chroniąc przed wznowami. Prof. Nowis i prof. Gołąb wykazali, że odporność ta wynika z dwóch przyczyn: terapia fotodynamiczna powoduje tzw. immunogenną śmierć komórek nowotworowych, a fragmenty rozpadniętych komórek nowotworowych są bardzo efektywnie pochłaniane przez komórki

dendrytyczne (rodzaj komórek układu odpornościowego). Te z kolei ulegają silnej aktywacji i migrują do lokalnych węzłów limfatycznych, gdzie prezentują antygeny komórek nowotworowych limfocytom T. W rezultacie rozwija się silna odpowiedź immunologiczna, która może hamować wzrost nie tylko guza poddanego leczeniu, ale również guzów przerzutowych.

Wyniki swoich badań prof. Nowis i prof. Gołąb opublikowali w prestiżowych czasopismach naukowych, takich jak: *Journal of Biological Chemistry*, *Oncogene*, *EMBO Journal*, *Clinical Cancer Research* i *Cancer Research*. Ich uwieńczeniem było przygotowanie pracy podsumowującej wiedzę dotyczącą zastosowania terapii fotodynamicznej w eliminacji nowotworów. Artykuł został opublikowany w 2011 roku w *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, magazynie o najwyższym spośród wszystkich naukowych czasopism wskaźniku oddziaływania (tzw. *impact factor*), który obecnie wynosi 508,7. W ciągu dekady praca była cytowana ponad 2500 razy (wg bazy Web of Science). Artykuł został przygotowany wspólnie z liderami zespołów, z którymi prof. Nowis i prof. Gołąb współpracowali.

Współcześnie terapia fotodynamiczna jest stosowana w wielu krajach na świecie jako skuteczna w leczeniu raków oskrzela, przewodu

pokarmowego, dróg żółciowych, szyjki macicy, skóry, raków znajdujących się w jamie otrzewnej, a nawet guzów ośrodkowego układu nerwowego. Trwają próby łączenia terapeutycznego PDT z immunoterapią.

Prof. Nowis i prof. Gołąb z żalem przyznają jednak, że terapia fotodynamiczna mogłaby być stosowana szerzej. Przez lata próbowali zainteresować tematem różne ośrodki w Polsce, niestety z ograniczonym skutkiem. W ich opinii może to wynikać m.in. z pewnych trudności w stosowaniu terapii: jej silnie spersonalizowanego profilu i potrzeby uzyskania dodatkowej wiedzy przez lekarzy.

Jednocześnie przy okazji zajmowania się fotodynamiką w połączeniu z immunoterapią badacze znacząco rozbudowali swoje warsztaty i rozpoczęli inne projekty, których finał wpłynął na praktykę medyczną. Tak było w przypadku odkrycia przez prof. Nowis, że inhibitor proteasomów stosowany w onkologii, m.in. w leczeniu szpiczaka czy niektórych chłoniaków, jest kardiotoksyczny. Może on uszkadzać mięsień sercowy, dlatego terapia bywa bardzo obciążająca dla chorych z problemami kardiologicznymi. Wspólnie z prof. Gołąbem jako pierwsi opisali ten mechanizm, potwierdzony później w badaniach klinicznych. Informacja ostrzegająca o ryzyku

”
Prof. Dominika Nowis i prof. Jakub Gołąb współpracują ze sobą od lat i – jak przekonują z uśmiechem – będą współpracę kontynuować do końca życia. Są bowiem parą nie tylko zawodowo, ale i prywatnie.

66

kardiologicznym znalazła się w charakterystykach produktów leczniczych, a w Szwajcarii trwają prace nad inhibitorem proteasomów, który nie będzie kardiotoksyczny.

Dominika Nowis i Jakub Gołąb współpracują ze sobą od lat i – jak przekonują z uśmiechem – będą współpracę kontynuować do końca życia. Są bowiem parą nie tylko zawodowo, ale i prywatnie. Co istotne, nie są od siebie zależni pod względem formalnym, nikt nie jest niczym szefem – to partnerzy uzupełniający się wiedzą i kompetencjami.

Oboje, prof. Gołąb pod koniec lat 90., prof. Nowis na początku kolejnej dekady, zdobyli stypendia START FNP wspierające młodych naukowców. Jak wspominają, był to zastrzyk gotówki nie do przecenienia, który pozwolił na skupienie się na pracy naukowej. Badacze podkreślają, że w tamtych czasach stypendiów dla młodych naukowców było bez porównania mniej niż współcześnie. Za tym cenniejsze uznają wyróżnienie ze strony FNP. W 1999 roku prof. Gołąb otrzymał stypendium KOLUMB, które pozwoliło mu wyjechać na staż podoktorski do Harvard

Institutes of Medicine w Bostonie. Najważniejsze badania dotyczące terapii fotodynamicznej PDT i immunoterapii były finansowane m.in. z programów FNP: MISTRZ (2008) i TEAM (2009).

Dominika Nowis i Jakub Gołąb zajmują się nie tylko badaniami akademickimi. Wspólnie z prof. Jackiem Jemielitym i dr hab. Joanną Kowalską – również laureatami FNP – prowadzą firmę ExploRNA Therapeutics, w której rozwijają strategię klinicznego wykorzystywania mRNA. Przy użyciu tej technologii naukowcy starają się opracować szczepionki przeciwzakaźne i przeciwnowotworowe. Pandemia COVID-19 i rozwój szczepionek mRNA pokazały, jak ważny jest to kierunek badań. Dlatego przed prof. Nowis i prof. Gołąbem najprawdopodobniej jeszcze kolejne istotne społecznie odkrycia.

Gołąb, J. i in. (2012). A Novel Pathway Combining Calreticulin Exposure and ATP Secretion in Immunogenic Cancer Cell Death. *EMBO Journal*, 31 (5), 1062–1079.

Nowis, D., Gołąb, J. i in. (2011). Photodynamic Therapy of Cancer: An Update. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 61 (4), 250–281.



Pozytywista i metafizyka

Anna Mateja



**Gdzie przebiegają granice
poznania *Preludium e-moll*
Fryderyka Chopina albo
sonaty *Patetycznej* Ludwiga
van Beethovena? Jak
rozumieć w muzyce istotę
dzieła sztuki?**

Prof. Maciej Gołąb – muzykolog, wykładowca na Wydziale Nauk Historycznych i Pedagogicznych Uniwersytetu Wrocławskiego – z pytaniami o sposób istnienia dzieł sztuki i o możliwości ich poznania zetknął się po raz pierwszy w liceum, kiedy próbował czytać *Studia z estetyki* Romana Ingardena. Choć licealista niewiele z tej lektury zrozumiał, podczas studiów muzykologicznych pozostał wierny wczesnym zainteresowaniom. Połączenie muzykologii z filozofią nie budziło jednak entuzjazmu u wykładowców Gołąba, zwłaszcza kiedy zaczęły powstawać jego pierwsze prace naukowe i problemem stało się znajdowanie odpowiednich recenzentów. O ile bowiem dziś interdyscyplinarność to truizm, o tyle w latach 70. i 80. ubiegłego wieku była ona uznawana, zwłaszcza na studiach humanistycznych, za ekstrawagancję.

Nieoczywiste, więc i rzadko spotykane w jego fachu połączenie znalazło jednak wyjątkowej wartości rozwinięcie w eseju Ingardena z 1973 roku *Utwór muzyczny i sprawa jego tożsamości*. Uczony zainteresował się filozoficznym wyjaśnianiem specyficznej budowy utworu muzycznego, sposobu jego istnienia i „tych jego właściwości, które mają podstawowe znaczenie dla ukonkretnienia wartości estetycznych w poszczególnych wykonaniach”. Zdaniem Ingardena dopiero współpraca

„między filozoficznie nastawionym teoretykiem muzyki” a muzykologiem, który stara się „głębiej zrozumieć przedmioty swych badań szczegółowych nad istniejącymi faktycznie dziełami muzyki”, może „posunąć sprawę naprzód”, czyli pobudzić dyskusję na temat „statusu ontycznego dzieła muzycznego”.

Dokładnie 30 lat później prof. Maciej Gołąb odpowiedział na to wyzwanie, rzucone przez jednego z najważniejszych polskich fenomenologów, wydając w serii „Monografie” prowadzonej przez FNP – jako pierwszą pozycję muzykologiczną – książkę *Spór o granice poznania dzieła muzycznego* (2003).

Praca, którą prof. Gołąb rozpoczął jako stypendysta Fundacji Kościuszkowskiej w Polish Studies Center w Indiana University w Bloomington, trwała cztery lata i była otwarciem kolejnego tematu badawczego w karierze muzykologa. Poprzednie jego publikacje książkowe dotyczyły bowiem teorii i historii muzyki, m.in. dodekafonii w pierwszej połowie XX wieku, rozbudowanych badań chopinowskich (od języka harmonicznego Chopina przez jego idiom stylistyczny po odbiór jego twórczości i postaci) czy monografii twórczości Józefa Kofflera, kompozytora przedwojennej europejskiej moderny. Monografia o charakterze metodologicznym wydawała się

”
Doświadczenie badawcze prof. Gołąba, jako historyka i teoretyka muzyki XIX i XX wieku, i odwołanie się do psychofizjologicznej teorii poznania Ingardena pozwoliły mu zbudować własną metateorię analizy dzieła muzycznego.

70

w takiej sytuacji krokiem naturalnym. Zwłaszcza że doświadczenie badawcze prof. Gołąba, jako historyka i teoretyka muzyki XIX i XX wieku, i odwołanie się do psychofizjologicznej teorii poznania Ingardena pozwoliły mu zbudować własną metateorię analizy dzieła muzycznego.

Ingarden bowiem jest przekonany – co podkreśla we wspomnianej książce – o możliwości dotarcia do istoty dzieła sztuki muzycznej. Gołąb natomiast składa w swojej monografii „świadeństwo zasadniczej niewiary w możliwość poznania »faktycznie« istniejącego dzieła muzycznego w jego totalności”. Odwołując się do słów krakowskiego filozofa, muzykolog o filozoficznym zacięciu z Uniwersytetu Warszawskiego „posunął sprawę naprzód”, ale po swojemu, zajmując się, jak to określa we wstępie do pracy, „muzykologicznym badaniem granic poznania” dzieła. Nie zaspokaja ambicji prowadzenia systematycznej refleksji estetycznej, podąża natomiast szlakiem tradycji metodologicznej, która skupia się na badaniu źródeł, przedmiotów i sposobów „muzykologicznego poznania i sądzenia”.

Pracę *Spór o granice poznania dzieła muzycznego* zrecenzował Bohdan Pociąg na łamach miesięcznika *Nowe Książki*. Autor nieprzypad-

kowy, jeśli wziąć pod uwagę bogactwo filozoficznych odniesień w jego esejach czy artykułach na temat muzyki polskiej i powszechnej. Metodologiczna książka prof. Gołąba jest do dziś cytowana, nawet w tak dalekich od muzykologii dziedzinach jak archeologia. Pojawia się też, co oczywiste, w przypisach i bibliografiach prac filozoficznych o muzyce. Potwierdzeniem zainteresowania jest drugie wydanie książki – w 2012 roku, a przede wszystkim jej przekład na język angielski (dokonany przez wychowanka prof. Gołąba, dra Wojciecha Bońkowskiego, muzykologa współpracującego z Narodowym Instytutem Fryderyka Chopina, autora znakomitej monografii *Dziewiętnastowieczne edycje dzieł Fryderyka Chopina jako aspekt historii recepcji*). Tłumaczenie monografii – wsparte przez FNP w ramach programu TRANSLACJE – wydała w 2008 roku, jako *Musical Work Analysis. An Epistemological Debate*, międzynarodowa oficyna akademicka Peter Lang.

Była to trzecia książka polskiego muzykologa przełożona na język kongresowy. W 1995 roku ukazała się w Kolonii, w przekładzie Beatrysy Hirszenberg na język niemiecki, *Chromatyka i tonalność w muzyce Chopina*. Z kolei w 2004 roku Polish Music Center w University of Southern California w Los Angeles wydało, w przekładzie

Maksymiliana Kapelańskiego, Lindy Schubert i Marka Żebrowskiego, książkę profesorską Macieja Gołąba na temat Józefa Kofflera – jednego z najwybitniejszych przedwojennych kompozytorów polskich (obok Karola Szymanowskiego), zamordowanego przez Niemców z powodu żydowskiego pochodzenia w 1944 roku. Dwie kolejne – *Muzyczna moderna w XX wieku. Między kontynuacją, nowością a zmianą fonosystemu*, wydana w Polsce w 2011 roku, oraz *Twelve Studies in Chopin*, przygotowana specjalnie dla zagranicznego odbiorcy – ukazały się odpowiednio w latach 2015 i 2014.

O ile w międzynarodowej nauce monografia *Spór o granice poznania dzieła muzycznego* ugruntowała pozycję naukową prof. Gołąba, o tyle w Polsce okazała się przełomowa. Jak twierdzi sam autor, jej opublikowanie w serii FNP, uważanej w polskiej nauce za nobilitujące potwierdzenie wartości pracy, było najlepszą rekomendacją, by zaprosić go do objęcia stanowiska kierownika Zakładu Muzykologii w Instytucie Kulturoznawstwa Uniwersytetu Wrocławskiego. Tyle że zakładu... jeszcze nie było. Wrocławska muzykologia, sięgająca tradycjami pierwszych dekad XIX wieku, kiedy stanowiła część Wydziału Filozoficznego uczelni w Breslau, została zlikwidowana na początku lat 50. XX wieku.

Prof. Gołąb, nawiązując do tradycji m.in. Josepha Ignaza Schnabla, Carla Reinecke czy Maxa Schneidera, niczym pozytywista, za jakiego się uważa, stworzył zakład od podstaw. W 2009 roku jednostka spełniała już warunki pozwalające przekształcić ją w katedrę, natomiast od 2015 roku istnieje w Uniwersytecie Wrocławskim Instytut Muzykologii z ustabilizowaną kadrą.

Paradoksalnie autor monografii na temat granic poznania w działalności organizatorskiej postawił na przekraczanie granic. Nowo utworzony zakład nawiązał bowiem transgraniczną współpracę akademicką ze swoimi odpowiednikami na uniwersytetach w Dreźnie, Halle i Lipsku oraz w Brnie, Ołomuńcu i Pradze. Siedem placówek muzykologicznych zjednoczyło siły w celu prowadzenia badań nad tradycją muzyczną Śląska.

W naturalny sposób wrocławska muzykologia kierowana przez prof. Gołąba rozpoczęła też współpracę ze środowiskiem muzykologicznym skupionym wokół dawnego Uniwersytetu Jana Kazimierza (UJK) we Lwowie, który od 1944 roku nosi imię Iwana Franki. Odtworzenie muzykologii na jednej z najważniejszych uczelni niepodległej Ukrainy wydaje się związaniem dawno przerwanej nici łączącej polskich muzykologów

”
O ile w międzynarodowej nauce monografia *Spór o granice poznania dzieła muzycznego* ugruntowała pozycję naukową prof. Gołąba, o tyle w Polsce okazała się przełomowa.

z tą uczelnią za sprawą prof. Józefa Michała Chomińskiego. Był on pedagogiem ukraińskiego pochodzenia, założycielem jednej z czołowych szkół w polskiej muzykologii, nauczycielem kilku pokoleń badaczy tej dziedziny (w tym Macieja Gołąba), absolwentem i doktorem UJK.

Wyjątkowość naukowa monografii *Spór o granice poznania dzieła muzycznego* otworzyła jej autorowi wiele drzwi i pozwoliła zrealizować pomysły o charakterze organizatorskim. Nie ryzykując przesadą, można więc powiedzieć, że wpłynęła na rozwój muzykologii w tej części Europy. Najważniejszym jej dokonaniem jest jednak opisanie metasystemu, czyli uogólnionej z punktu widzenia filozoficznego teorii tego, co możliwe w poznaniu dzieła muzycznego. Jak przekonuje autor monografii, analiza dzieła nie musi twardo stać na gruncie teorii muzyki. Uświadamia muzykologom, że jeśli chodzi o kontakt z dziełem, są nie tylko fachowcami w swojej dziedzinie, ale

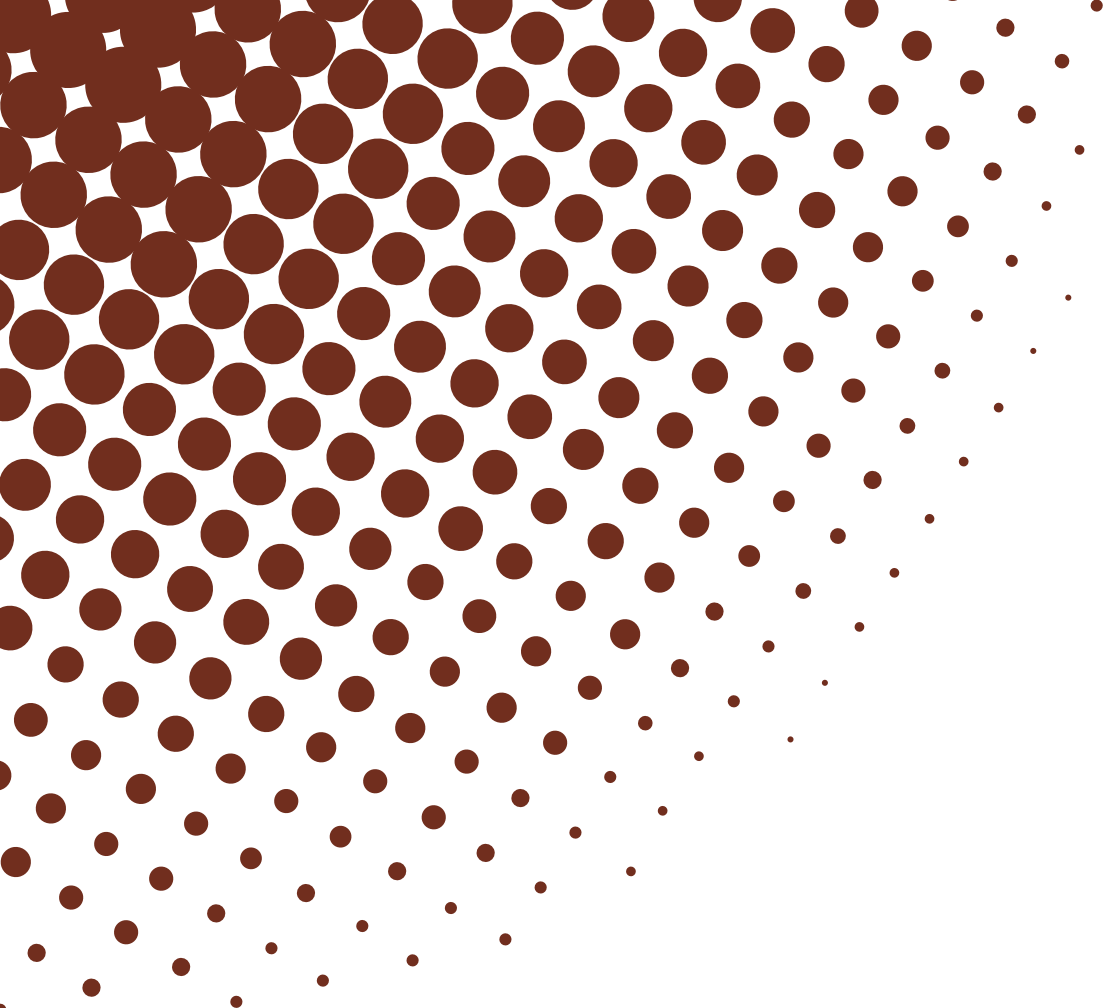
także humanistami. Twórcze może więc okazać się wyjście z muzykologicznego matecznika (prof. Gołąb mówi wręcz o „muzykologicznym getcie w humanistyce”) i spojrzenie na analizę dzieła z filozoficznego dystansu. To pozwoli odstawić narzędzia podsuwane przez teorię, historię czy estetykę muzyczną, by sięgnąć po filozoficzną systematykę samych przedmiotów analizy albo poznać relacje między interpretacją a analizą.

A granice poznania dzieła muzycznego? Naturalnie istnieją (można je odczytać z różnych klas źródeł: materiałów rękopiśmiennych, druków muzycznych czy dokumentów fonograficznych), choć nie są wyraźnie określone. Analiza filozoficzna pozwala co prawda dotrzeć do jej esencjonalnych zasobów, ale nawet ona nie da rady ich wyekspluatować. Bo czy jakakolwiek metodologia badawcza pozwoliłaby „zmierzyć i zważyć” metafizyczny wymiar arcydzieła?



Na miarę i na czas

Anna Mateja



**W jaki sposób badania
nad dwoma atomami
węgla, połączonymi
podwójnym wiązaniem
chemicznym, mogą
doprowadzić do poważnej
zmiany społecznej? Czy
przełożenie pozyskanej
wiedzy na praktyczne
rozwiązania może stać się
najważniejszym naukowym
celem?**

Prof. Karol Grela – chemik, szef Laboratorium Syntezy Metaloorganicznej na Wydziale Chemii Uniwersytetu Warszawskiego, kierownik grupy badawczej w Instytucie Chemii Organicznej PAN i laureat m.in. Nagrody Fundacji na rzecz Nauki Polskiej (2014) – nie zamierzał szyc spodni z trzema nogawkami ani wdżianka dla osobnika, co ma siedem nóg i garb. Magazyn bezużytecznej, choć interesującej garderoby Stanisław Lem w zbiorze esejów filozoficznych *Summa technologiae* nazwał matematyką. Jej twórców natomiast szalonymi krawcami, których teorie w momencie powstania są dokładnie tak potrzebne jak marynarka z zaszytymi rękawami. Wisi nietknięta aż do dnia, kiedy pojawia się szperacz i sięga po nią pewnym ruchem, wiedząc, na kim będzie leżała jak ulał. Marynarką może nazywać się np. teoria gier, a klientem o nietypowej anatomii – bankowość, która wykorzysta matematyczne rozwiązanie, np. jako instrument zarządzania.

Chemia katalitycznej reakcji metatezy olefin, uprawiana przez prof. Grełę, nie rządzi się prawami szalonych krawców. Prędszej alchemików, którzy kilkaset lat temu opracowywali receptury zamiany piasku w złoto albo substancji mającej zapewnić wieczne życie. Zamiast kruszcu czy eliksiru nieśmiertelności pojawiły się co prawda

porcelana i przepis na pirotechniczny czarny proch, ale najważniejsza była możliwość wykorzystania niespodziewanych odkryć.

Katalizatory, jakie można byłoby zastosować w metatezie olefin – powszechnie obecnych w przyrodzie związków, nazywanych węglowodorami nienasyconymi, w których dwa atomy węgla są połączone podwójnym wiązaniem – zainteresowały prof. Grełę w 2000 roku. Finał tych badań był na pewno bardziej przewidywalny niż w czasach alchemików, ale szansa na dokonanie czegoś nowego – niepewna. Karol Grela miał wtedy 30 lat, doktorat i poczucie, że na pociąg z napisem „metateza olefin” nieodwołanie się spóźnił.

Mechanizm reakcji – czyli takiej wymiany między dwiema cząsteczkami olefin, w której każda rozpada się na dwie części, doprowadzając do zmiany wiązań w parach – prof. Yves Chauvin opisał już w 1971 roku. Wiedzano więc, że wymiana wiązań w związku zawierającym parę atomów węgla połączonych wiązaniem podwójnym umożliwia dowolne jego przekształcanie i tworzenie nowych pochodnych. Reakcja była bezcenna i niepodrabialna (metatezy nie wywoła żaden znany enzym ani mikroorganizm). Jej odkrycie – nie bez powodu uhonorowane w 2005 roku

”
Finał tych badań
był na pewno bar-
dziej przewidywalny niż
w czasach alchemików,
ale szansa na dokonanie
czegoś nowego –
niepewna.

Nagrodą Nobla – nabrało dodatkowej wartości, gdy w latach 80. pojawiły się katalizatory, np. trwałe i odporne katalizatory rutenowe, ułatwiające kontrolę przebiegu tej reakcji. Poruszające wyobraźnię możliwości metatezy olefin – synteza leków, opracowywanie innowacyjnych materiałów czy paliw ze źródeł odnawialnych – wydawały się znajdować na wyciągnięcie ręki. I takimi pozostały, bo dla dużej części przemysłu katalizatory do metatezy były nieosiągalne z powodu wysokiej marży naliczanej przez producenta, amerykańskiego monopolistę Materia Inc.

To była szansa dla młodego chemika z Warszawy: opracowanie niedrogiego, wysoko aktywnego i stabilnego w działaniu katalizatora metatezy olefin, możliwego do zastosowania w niewyszukanych laboratoryjnie warunkach (np. w temperaturze otoczenia i roztworach wodnych), bezpiecznego dla środowiska i łatwego do wydzielenia po zakończeniu reakcji. W 2001 roku dr Grela założył zespół badawczy, w którym znaleźli się m.in. Michał Bieniek i Cezary Samojłowicz. Rok później zaproponował pierwszy katalizator, który – ujmując rzecz metaforycznie – „można było trzymać w beczce w magazynie i sypać łopatą do reaktora”.

„Czy potrafilibyście produkować go masowo?” – słyszał od ludzi z kolejnych firm farmaceu-

tycznych i chemicznych. Odpowiedź mogła być jedynie przecząca. I to dr Grela uważał za jedyny mankament pracy wykonanej przez niego i jego zespół. Poza tym mógł czuć tylko satysfakcję: zaproponował przecież rozwiązanie tak dobre, że zainteresował się nim przemysł, a przy okazji podważył praktyki monopolistyczne amerykańskiego giganta.

Artykuł dla prestiżowego *Chemical Reviews* napisali we trójkę: prof. Grela (tytuł profesora otrzymał w 2008 roku, w wieku zaledwie 37 lat) oraz dwóch wypromowanych przez niego doktorów, Michał Bieniek i Cezary Samojłowicz, na zaproszenie redakcji. Praca “Ruthenium-Based Olefin Metathesis Catalysts Bearing N-Heterocyclic Carbene Ligands”, opublikowana w czerwcu 2009 roku, była podsumowaniem wiedzy o katalizatorach metatezy zbudowanych na bazie rutenu. Tekst zbierał wszystkie istotne wyniki i stawiał pytanie o możliwe drogi rozwoju. Kończyły go rozważania na temat symetrycznych ligandów NHC (N-heterocyklicznych ligandów karbenowych) – najbardziej popularnych motywów w strukturze rutenowych katalizatorów metatezy, które, niczym greckie kanony piękna, okazały się najbardziej uniwersalne. Autorzy pytali jednak, czy nie powinny zyskiwać na znaczeniu modyfikacje wprowadzane do klasycznego

modelu tego związku. Nie mogli wówczas wiedzieć, czy bogactwo wariacji to szansa, czy ślepa uliczka. Dopiero późniejsze prace, także zespołu prof. Greli, pokazały, że sugestia trafiała w punkt. Chemicy przekonali się o tym, m.in. wprowadzając do katalizatorów niesymetryczne ligandy NHC oraz ligandy CAAC (cykliczne alkilo-amino karbenowe), które okazały się wdzięcznym materiałem do tworzenia nowych katalizatorów, interesujących zarówno dla firm z przemysłu, jak dla instytutów badawczych.

Tekst do maja 2021 roku doczekał się ponad 800 cytowań. To imponujący wynik, nawet jeśli wziąć pod uwagę, że nie dotyczy pracy oryginalnej, ale przeglądowej. Kilkanaście lat po publikacji zmieniło się na tyle dużo w postrzeganiu tak nowoczesnej metody produkcji, jaką jest metateza olefin, że nawet polski przemysł zauważył jej istnienie. Jeszcze dekadę temu pytania o katalizatory zadawały przede wszystkim firmy zagraniczne, a – jak twierdzi prof. Grela – „innovacyjne rozwiązania polskich naukowców nie miały większych szans na wdrożenie do produkcji w kraju”. Dzisiaj jest inaczej, w czym trójka autorów tekstu z *Chemical Reviews* ma swój udział.

Dr inż. Bieniek – laureat m.in. programu INNOWATOR (2007) FNP – zrezygnował z ka-

riery naukowej, by założyć firmę produkującą wybrane katalizatory metatezy. Spółka akcyjna Apeiron Synthesis (o wartości szacowanej na kilkadziesiąt milionów dolarów) ma w portfolio dużą liczbę własnych oraz licencjonowanych katalizatorów chronionych patentami i współpracuje z największymi firmami na rynku. Jej pierwszymi klientami były właśnie te, których szefowie w pierwszych latach nowego wieku pytali dra Grełę, czy może produkować swój katalizator na skalę przemysłową... Z kolei dr inż. Samojłowicz, laureat m.in. programów START (2012) i VENTURES (2014) FNP, doświadczenia zdobyte w pracy naukowej wykorzystuje jako rzecznik patentowy. W biografii zawodowej ma także zaangażowanie w działania największej polskiej firmy petrochemicznej – PKN Orlen.

Artykuł z *Chemical Reviews* uświadomił wielu uczonym, że w katalizatorach metatezy olefin nie tylko klasyczne piękno ma wartość. Tak jak w sztuce – czasami dopiero zaburzenie harmonii i niespodziewany dysonans potrafią otworzyć oczy. Inaczej jednak niż tam, w nauce liczy się jeszcze rzeczywistość – na ile proponowane twierdzenie przybliża do prawdy o niej. Dla wielu naukowców, w tym dla

prof. Greli, satysfakcja z naukowych sukcesów w grze między nimi a złożonością świata czy prestiżowe łamy szacownych periodyków, choć ważne, nie liczą się tak bardzo jak... telefon z firmy, która jest zainteresowana odkryciem, bo widzi w nim rozwiązanie własnych problemów albo potencjał komercyjny. Wiadomo przecież,

że żadna firma nie kupiłaby pomysłu, jeśli nie byłby on w danym momencie najlepszy.

Samojłowicz, C., Bieniek, M., Grela, K. (2009). Ruthenium-Based Olefin Metathesis Catalysts Bearing N-Heterocyclic Carbene Ligands. *Chemical Reviews*, 109 (8), 3708–3742.



W jednym garnku

Anna Mateja



**W jaki sposób zastrzeżenie
nazwy *utleniające*
sprzęganie związków
aromatycznych może
wpłynąć na rozwój chemii
organicznej? Czy w świecie
dynamicznego przyrostu
tekstów naukowych
może mieć znaczenie
opis eksperymentu
przeprowadzonego po raz
pierwszy ponad 100 lat
temu?**

Prof. Daniel Gryko – badacz i nauczyciel akademicki z Instytutu Chemii Organicznej PAN w Warszawie, laureat kolejnych programów FNP (START, TEAM, MISTRZ), wreszcie Nagrody FNP (2017) – jest specjalistą od chemii porfirynoidów. Te organiczne związki heterocykliczne występują przede wszystkim w białkach zawierających hem (choćby w hemoglobinie nadającej krwi czerwony kolor). Szczególną ich odmianę stanowią korole – barwniki organiczne, które prof. Gryko z zespołem badawczym projektuje i syntetyzuje, odkrywając nieprzewidywane wcześniej możliwości ich zastosowania. Rozpuszczalne w wodzie kompleksy koroli mogą stać się np. katalizatorami rozpadu reaktywnych związków azotu w komórkach objętych schorzeniami neurodegeneracyjnymi w rodzaju chorób Alzheimera albo Parkinsona. W czerwcu 2020 roku Gryko ze współpracownikami zaprezentowali światu stabilne barwniki, silnie emitujące światło czerwone, które z tej racji, że są znakomicie widoczne w mikroskopii fluorescencyjnej, mogą stać się sondami. Pozwalają badać głęboko położone struktury biologiczne oraz obserwować przeciwciała lub białka zaangażowane w rozwój chorób uszkadzających mózg.

Uporządkowanie nazewnictwa to jednak problem z zupełnie innej półki i pomysł napi-

sania pracy przeglądowej opierającej się na rewizji materiału historycznego na temat dwóch reakcji – utleniającego sprzęgania związków aromatycznych i reakcji Scholla – wydaje się w naukowej biografii chemika aktywnego w swojej dziedzinie dość egzotyczny. Chyba że chodzi o reakcje, które zachodzą w związkach tak „gorących” (z racji zainteresowania budzonego u badaczy) jak związki aromatyczne. To substancje posiadające na tyle zdelokalizowane elektrony, że zapewniają one cząsteczce większą trwałość, niż można byłoby oczekiwać po występującym w niej wiązaniu podwójnym między atomami. Nazwa grupy, wywołująca u chemicznego laika intrygujące skojarzenia, wzięła się stąd, że pierwsze związki aromatyczne wyodrębniono z olejków eterycznych i balsamów.

We współczesnej chemii związków aromatycznych fundamentalne znaczenie ma reakcja ich utleniającego sprzęgania. Jak zapewnia prof. Gryko, to „ulubione narzędzie tworzenia dużych i oszałamiających struktur”, wciąż udoskonalane przez chemików, którzy wykorzystują je w tworzeniu cząsteczek z grupy nanografenów i ich heterocyklicznych analogów. Po nanografenach naukowcy spodziewają się wiele, więc temat – jeśli wziąć pod uwagę przyrost publikacji – znaj-

”
W czerwcu 2020 roku Gryko ze współpracownikami zaprezentowali światu stabilne barwniki, silnie emitujące światło czerwone, które z tej racji, że są znakomicie widoczne w mikroskopii fluorescencyjnej, mogą stać się sondami.

”
Po nanografenach naukowcy spodziewają się wiele, więc temat – jeśli wziąć pod uwagę przyrost publikacji – znajduje się w pierwszej piątce najmodniejszych zagadnień chemii organicznej.

duje się w pierwszej piątce najmodniejszych zagadnień chemii organicznej. Materiały te są zbudowane z wielu połączonych ze sobą pierścieni aromatycznych, które za sprawą ich właściwości wykorzystuje się w licznych nowoczesnych technologiach, np. w budowie instalacji fotowoltaicznych czy diod luminescencyjnych.

Reakcja Scholla, zbliżona do utleniającego sprzęgania związków aromatycznych, choć dużo rzadziej stosowana, jest nieodzowna w takich procesach chemii organicznej jak syntezy chiralnych bifenyli albo produktów naturalnych. Naukowcy wciąż więc po nią sięgają, np. wykonując syntezę barwników.

Pytania, jakie postawili sobie prof. Gryko i jego młodzi współpracownicy, brzmiały: „Dlaczego obie reakcje – nie tylko zwyczajowo, ale także w literaturze naukowej – określane są jedną nazwą, wziętą od nazwiska austriackiego chemika Rolanda Heinricha Scholla? Skoro nie każde utleniające sprzęganie aromatów jest reakcją Scholla, która reakcja naprawdę nią jest?”.

Praca nad artykułem mającym przywrócić ład w nazewnictwie zamieszaniu trwała siedem miesięcy. Większość czasu zajęło odnajdywanie tekstów powstałych w ciągu minionego stulecia, których nie zawierały współczesne bazy danych.

Staranna kwerenda – przeprowadzona przez dwóch naukowców tuż po studiach, wychowanków prof. Gryko: Marka Grzybowskiego i Kamila Skoniecznego – była niezbędna, bo artykuł miał porządkować nazewnictwo i przypominać mechanizm obu reakcji, opierając się na przeglądzie najważniejszych osiągnięć z ostatnich 140 lat (ostatnią pracę przeglądową na temat reakcji Scholla napisali w 1964 roku rumuńscy uczeni Alexandru Balaban i Costin Nenițescu). Pierwszy opis utleniającego sprzęgania bogatych w elektrony związków aromatycznych opublikowano bowiem w 1871 roku. Dotyczył on syntezy kwasu elagowego (związku z grupy polifenoli) z kwasem galusowym (należy do podobnej grupy związków, nazywanych kwasami fenolowymi). Cztery dekady później, w 1910 roku, uczony z uniwersytetu w Grazu – prof. Scholl – ogłosił, że osiągnął podobnie utleniający efekt, prowadzący do sprzęgania związków aromatycznych. Aby go uzyskać, trzeba tylko podgrzać związki do temperatury 130 stopni Celsjusza w mieszaninie stopionego chlorku gliny i chlorku sodu.

W artykule “Comparison of Oxidative Aromatic Coupling and the Scholl Reaction”, który ukazał się w 2013 roku na łamach międzynarodowej edycji pisma *Angewandte Chemie* autorzy: Marek Grzybowski, Kamil Skonieczny, Holger Buten-

schön i Daniel Gryko, opierając się na materiale historycznym i doświadczeniu laboratoryjnym, uznali, że mechanizmy działania obu reakcji zależą od struktury elektronowej substratów (czyli wykorzystywanych substancji) i charakteru katalizatora. Zaproponowali więc, aby nazwą *utleniające sprzęganie związków aromatycznych* określać reakcje z udziałem substratów bogatych w elektrony (m.in. chlorków glinu, żelaza czy molibdenu albo żelazicyjanku potasu) zachodzące w temperaturze pokojowej przy udziale utleniaczy. Natomiast reakcją Scholla miałyby być nazywane jedynie procesy przeprowadzane w temperaturze 130 stopni Celsjusza, w których uczestniczyłyby nieutleniające kwasy Brønsteda lub Lewisa (wykorzystanie dodatkowego utleniacza nie byłoby warunkiem obowiązkowym) oraz substraty takie jak chlorek sodu i chlorek glinu. Ponadto naukowcy, opierając się na własnych eksperymentach, udowodnili, że reakcja Scholla zachodzi także z udziałem substratów o niskim potencjale utleniania. Sytuacje niejasne, kiedy mechanizm reakcji nie opierałby się w pełni ani na warunkach utleniającego sprzęgania związków aromatycznych, ani na warunkach wskazanych przez prof. Scholla, miałyby być nazywane reakcjami odwodorniającego sprzęgania aromatów.

Propozycje polskich naukowców nie przyjęły się. Chociaż z powodu wyśrubowanych warunków, jakich wymaga przeprowadzenie reakcji Scholla, jest ona wykonywana bardzo rzadko (współcześni chemicy unikają reakcji w wysokiej temperaturze, a przede wszystkim przy udziale szkodliwych dla środowiska składników, które produkują trudne w utylizacji odpady), siła przyzwyczajenia okazała się bliższa naukowcom niż precyzja sformułowań. Jak zauważa prof. Gryko, w latach 2013–2021 chemicy, nie zważając na dowody zawarte w artykule z *Angewandte Chemie*, nazywali reakcją Scholla niemal wszystkie opisane w czasopismach naukowych przypadki przeprowadzania utleniającego sprzęgania związków aromatycznych. W tym samym czasie artykuł przeglądowy, autorstwa uczonych z Polskiej Akademii Nauk, doczekał się jednak niebagatelnej liczby ponad 470 cytowań.

Paradoks? Tylko pozornie. Liczba prac publikowanych na temat reakcji z udziałem związków aromatycznych – nie miała już w momencie ukazania się publikacji prof. Gryko i jego współpracowników – w ciągu minionej dekady wzrosła wielokrotnie. Temat zyskał na popularności przede wszystkim z powodu zainteresowania opisywanymi już nanografenami. W ich tworzeniu można bowiem wykorzystać reakcję Scholla,

która – jak żadna inna reakcja – pozwala na wydajną syntezę cząsteczek dużych rozmiarów z jednoczesnym i efektywnym wytworzeniem blisko stu wiązań węgiel–węgiel. Większość nanografenów otrzymano właśnie poprzez wielokrotne utleniające sprzęganie w warunkach *one pot* – w jednym garnku, jak potocznie chemicy nazywają takie reakcje – oszczędzając czas i minimalizując zanieczyszczenie środowiska.

Autorom artykułu udało się zachęcić naukowców do przeprowadzenia nad reakcją Scholla kolejnych badań o charakterze mechanistycznym. Ukazało się już kilkanaście prac będących próbą m.in. znalezienia przyczyn, dla których wciąż trudno przewidzieć, kiedy reakcja nastąpi, albo wyjaśnienia, dlaczego w pewnych przypadkach jest ona niezwykle efektywna, a w innych rozczarowuje. Natomiast ekipa prof. Gryko napisała na zaproszenie redakcji *Angewandte Chemie* artykuł

kontynuujący temat (“Synthetic Applications of Oxidative Aromatic Coupling – From Biphenols to Nanographenes”, który ukazał się w 2020 roku) oraz rozdział w książce wydawnictwa “Organic Reactions”.

Publikacja z 2013 roku spotkała się z uznaniem nie tylko dlatego, że dotyczyła złożonego zagadnienia opisanego wszechstronnie, bo od strony mechanistycznej i historycznej. O sukcesie przesądziło pojawienie się pracy we właściwym czasie, czyli tuż przed momentem, kiedy jej temat stał się ważny, potrzebny i zyskał ogromną popularność. Taką umiejętność wykorzystania odpowiedniego momentu posiadają nieliczni.

Grzybowski, M., Skonieczny, K., Butenschön, H., Gryko, D.T. (2013). Comparison of Oxidative Aromatic Coupling and the Scholl Reaction. *Angewandte Chemie – International Edition*, 52 (38), 9900–9930.



Szum w czarnej dziurze

Anna Mateja



**Dlaczego splątanie
kwantowe może
być zagadnieniem
filozoficznym? I co na jego
temat ma do powiedzenia
zarozumiały człowiek-
jajo, czyli Humpty Dumpty,
znawca semantyki, którego
spotkała Alicja po drugiej
stronie lustra¹?**

Jak przypomina prof. Ryszard Horodecki – fizyk z Międzynarodowego Centrum Teorii Technologii Kwantowych przy Uniwersytecie Gdańskim (UG), laureat m.in. Nagrody FNP (2008) – pod koniec XIX wieku fizycy byli przekonani, że znają odpowiedzi na niemal wszystkie pytania ze swojej dziedziny. Na klarownym błękanie pełni informacji pozostawał zaledwie jeden – i to, jak przypuszczano, niewielki – obłoczek niewiedzy, którym był problem ciała doskonale czarnego, czyli pochłaniającego promieniowanie elektromagnetyczne niezależnie od temperatury ciała oraz kąta padania i widma promieniowania. Nikt nie mógł przewidzieć, że w bagatelizowanej niewiadomej kryją się takie cuda, jak choćby laser, fotokomórka, mikroelektronika, bezpieczne przesyłanie informacji na odległość czy projekt komputera kwantowego.

Na początku XX wieku próby teoretycznego opisu ciała doskonale czarnego doprowadziły Maxa Plancka do sformułowania pojęcia *kwantu energii*. Kiedy w 1925 roku ogłoszono podstawy teoretyczne mechaniki kwantowej, opisującej zasady rządzące wewnątrz atomów i molekuł,

¹ Carroll, L. (1975). *O tym, co Alicja odkryła po drugiej stronie lustra*. Przeł. M. Słomczyński. Warszawa: Czytelnik. Za tę edycję podałam też przekład rymowanki o człowieku-jajo.

fizycy wiedzieli już, że niewielki obłok niewiedzy przekształca się na ich oczach w osobną dziedzinę wiedzy, wywracając na nice zdroworozsądkowy obraz budowy i funkcjonowania świata materialnego. W pracach, które ukazały się w kolejnych latach, przewidywano, że w złożonych układach kwantowych istnieją „upiorne korelacje” między własnościami pary elektronów lub fotonów powiązanych ze sobą, nawet jeśli przebywają w oddalonych od siebie laboratoriach czy w różnych miejscach galaktyki. O splątaniu kwantowym, jak nazwano te korelacje, Erwin Schrödinger pisał w 1935 roku, iż jest „esencją mechaniki kwantowej”. Teoria okazała się jednak na tyle trudna do przyjęcia przez wielu fizyków (uważano ją także za niedokończoną), że niektóre jej cechy, szczególnie samo pojęcie *splątania kwantowego*, zlekceważono.

„W jakim jestem stanie? Nie wiem, ale kiedy się zdecyduję, na pewno będzie to stan przeciwny do tego, w którym znajduje się druga cząstka z mojej pary” – tym wymyślonym dialogiem z cząstką elementarną Ryszard Horodecki opisał własność splątania kwantowego w 1964 roku ujawnioną przez Johna Bella: w świecie kwantów własności cząstek nie istnieją przed pomiarem. Uczony udowodnił, że jeżeli jedna cząstka ze splątanej pary podczas pomiaru ujawni polaryzację

„
„Tym właśnie zajmuję się w pracy” – wyjaśnił Ryszard Horodecki najmłodszemu synowi, Karolowi, gdy ten [...] jako czternastolatek zapytał go, czemu na kartce z obliczeniami szkicuje człowieka-jajo z powieści Lewisa Carrolla.

panioną, jej partnerka niezależnie od dzielącej ich odległości otrzyma polaryzację poziomą.

Po raz pierwszy splątanie kwantowe zaobserwowano laboratoryjnie w latach 70. (bardziej przekonujące wyniki uzyskano w następnej dekadzie), ale dopiero w 1991 roku praca Artura Ekerta przedstawiła splątanie jako zasób fizyczny istniejący realnie, w przyrodzie. Odkrycie nieuchronnie uruchomiło listę możliwych zastosowań „upiornych korelacji”. Można wśród nich wymienić: kryptografię kwantową, teleportację kwantową, obliczanie kwantowe, gęste kodowanie... By projekty stały się rzeczywistością, potrzebowano splątania kwantowego o wysokiej czystości. Tymczasem jest ono na tyle czułe na oddziaływanie środowiska, że w laboratorium szybko ulega zaszumieniu, które obniża jego wartość. Fizycy musieli więc nauczyć się wykrywania i oznaczania splątania w dający pewność sposób oraz oczyszczania go z szumów, by uzyskać „paliwo” w najczystszej możliwej postaci.

„Humpty Dumpty na murze siadł/ I Humpty Dumpty z muru spadł./ A nie sprawią wszystkie Króla konie ni żołnierze,/ Że w jedną Humpty Dumpty całość znów się zbierze”. Jaki jest wzór na obliczenie tego, co zostanie po odjęciu od całości człowieka-jajo sumy jego części?

„Tym właśnie zajmuję się w pracy” – wyjaśnił Ryszard Horodecki najmłodszemu synowi, Karolowi, gdy ten w pierwszej połowie lat 90. jako czternastolatek zapytał go, czemu na kartce z obliczeniami szkicuje człowieka-jajo z powieści Lewisa Carrolla. Obliczenia dotyczyły „problemu zaszytego w gąszczu formalizmu”, czyli wykrycia i oczyszczenia splątania kwantowego.

Ciąg dalszy historii stanie się niezrozumiałą, jeżeli nie zostaną do niej wprowadzeni starsi synowie prof. Horodeckiego – Paweł i Michał (obaj, później także najmłodszy Karol, z sukcesem starali się o fundacyjne stypendium START) – zajmujący się dzisiaj tematami, do których doprowadziły rozmyślenia ich ojca nad istotą człowieka-jajo. Najstarszy, prof. Paweł Horodecki – fizyk z Politechniki Gdańskiej, który dzięki wsparciu FNP w 2018 roku razem z prof. Markiem Żukowskim uruchomił w ramach programu MAB Międzynarodowe Centrum Teorii Technologii Kwantowych przy Uniwersytecie Gdańskim – zajmuje się ze współpracownikami m.in. teorią detekcji splątania kwantowego i naturą losowości kwantowej. Ma też swój udział w rozwoju nowej gałęzi fizyki – teorii informacji kwantowej².

² Paweł Horodecki był asystentem, kiedy w 1997 roku na konferencji fizyków w Jaszowcu usłyszał pytanie Karola Życzkowskiego: „Czy zbiór stanów splątanych

Z kolei prof. Michał Horodecki pracuje w Instytucie Fizyki Teoretycznej i Astrofizyki Uniwersytetu Gdańskiego oraz w powstałym przy tej uczelni Krajowym Centrum Informatyki Kwantowej. W pracy badawczej, poza podstawami teorii splątania kwantowego, zajmuje się tematami powstałymi na styku informatyki kwantowej i podstaw termodynamiki oraz teorią ciała stałego.

Właśnie z Pawłem i Michałem Ryszard Horodecki zaproponował nową metodę wykrywania (detekcji) splątania cząstek, ogłaszając w 1996 roku możliwość wykonania pomiaru tzw. świadka splątania, którego posiada każdy taki układ cząstek elementarnych³ (publikacja w *Physics Letters A* była dotąd cytowana ponad

jest płaski, czy zawiera kulę?”. Naukowiec dowodził, że w szczególnym przypadku bitu kwantowego kula istnieje. Analiza problemu (wsparta przez FNP) – prowadzona przez Annę Sanperę, Horodeckiego, Macieja Lewensteina i Życzkowskiego – została zwieńczona wspólną publikacją na łamach *Physics Letters A* w 1998 roku (praca ma blisko 900 cytowań). Rok później inny zespół naukowców publikacją w *Physical Review Letters* dowiódł, że duża objętość kuli zmniejsza szansę na zbudowanie efektywnego komputera kwantowego wykorzystującego jądrowy rezonans magnetyczny.

³ Nazwę *świadek splątania* dla wielkości obserwowalnych wykrywających splątanie wprowadziła Barbara Terhal (2000).

2500 razy⁴). Stwierdzona pomiarem ujemna wartość świadka splątania daje pewność, że badacze w laboratorium mają do czynienia z takim właśnie stanem. Nowo odkryte narzędzie badawcze dzięki prostocie i ekonomii użycia błyskawicznie zyskiwało uznanie. Pozwalało z „bezcennego zasobu” splątania kwantowego zrobić użytek w kwantowych odmianach kryptografii czy komunikacji (nazywanej teleportacją).

W tym samym roku, kiedy Horodeccy udowodnili istnienie świadka o ujemnej wartości, Charles H. Bennett – współtwórca informatyki kwantowej związany z IBM Watson Research Centre w USA – opublikował ze współpracownikami pracę, w której przedstawił opis metody oczyszczania splątania z zaszumienia obniżającego jego wartość. Lokalne operacje i klasyczne komunikacje (nazywane w skrócie LOKK) miały umożliwiać partnerom pracującym w różnych laboratoriach uzyskiwanie z zaszumionych par splątanych cząstek par maksymalnie splątanych. Z trwającej kilka tygodni analizy tych założeń przeprowadzonej przez prof. Horodeckiego oraz Pawła i Michała wynikało jednak, że zaprezentowana przez amerykańskich naukowców

⁴ Wyniki cytawalności tekstów podawane są za portalem Web of Science.

„maszynka do destylowania czystego paliwa dla zadań kwantowych” nie jest uniwersalna. Na dwa rodzaje splątań – swobodne i związane – radzi sobie ze splątaniem pierwszego rodzaju, ale nie potrafi oczyścić splątania związanego, które jest uwięzione w szumie niczym w czarnej dziurze (gdańscy fizycy odkrycie opisali na łamach *Physical Review Letters* w 1998 roku; publikacja była cytowana blisko 800 razy).

Trzech Horodeckich udowodniło też, że splątanie związane, choć wydawało się pasywne, a więc trudne do praktycznego zastosowania, można aktywować, czyli „zmusić do pracy”. Zaszumienia, w jakim się ono znajduje, nie sposób zlikwidować, ale można z niego „wyciągnąć” klucz kryptograficzny. Dokonali tego w 2005 roku Paweł, Michał i Karol Horodeccy (najmłodszy z „klanu” jest matematykiem, profesorem w Instytucie Informatyki UG) i prof. Jonathan Oppenheim z University College London (wówczas odbywał w Gdańsku staż podoktorski).

Michał Horodecki i Oppenheim są też odpowiedzialni za przełom, do jakiego doprowadziła m.in. praca ich autorstwa pt. “Fundamental Limitations for Quantum and Nanoscale Thermodynamics” opublikowana na łamach *Nature Communications* w 2013 roku. W pracy odpowiedzieli na pytanie o możliwe przejścia

w qubicie, czyli elementarnym układzie kwantowym. Artykuł przez kolejne lata doczekał się ponad 350 cytowań, na co miał wpływ przede wszystkim fakt, że jego autorzy dowartościowali znaczenie termodynamiki (choć już wcześniej dostrzegano wiele analogii między tą dziedziną a stanem splątania, m.in. badacze zaczęli zastępować protokół LOKK, używany do oczyszczania splątania z zaszumienia, transformacjami zachowującymi energię). Termodynamika rozpatrywana w kontekście reżimu mikroskopowego stała się bardziej zrozumiała, mimo że pytania o definicje pracy i ciepła oraz koherencji kwantowych w termodynamicznych procesach kwantowych wciąż pozostają bez odpowiedzi.

Liczna rodzina przydaje się w życiu, także naukowym, zwłaszcza jeśli otrzymuje się taką propozycję jak prof. Ryszard Horodecki. W 2005 roku prof. Ignacio Cirac, dyrektor Instytutu Optyki Kwantowej im. Maxa Planca i redaktor pisma *Review of Modern Physics*, poprosił go o napisanie pracy przeglądowej na temat enigmy splątania kwantowego. Miała ona zebrać i usystematyzować wiedzę – tak teoretyczną, jak i eksperymentalną – pozyskaną w wielu ośrodkach badawczych, także w ciągu wcześniejszych 10 lat w Gdańsku.

W głowie prof. Horodeckiego pojawił się wers zapamiętany z *Myśli Pascala*, że oto otrzymał szansę poznania, skąd „węzeł naszej natury czerpie swe skręty i zwoje”. Zadanie porządkowania zjawisk fizycznych dotyka przecież nieuchronnie istotnych zagadnień filozoficznych, stawiając przed uczonymi choćby takie pytanie: „Czy jest możliwe, żeby dom był idealnie posprzątany mimo zabałaganionych półek i szaf w konkretnych jego pomieszczeniach?”. Jeśli przenieść pytanie do świata pomiaru entropii układu kwantowego, paradoks stanie się oczywistością. Entropia układu splątanych cząstek jest bowiem mniejsza od entropii poszczególnych cząstek, co świadczy o występowaniu splątania i łamie klasyczny porządek świata. Pełne wyjaśnienie tego rodzaju paradoksu – opisane przez Michała Horodeckiego, Jonathana Oppenheima i Andreasa Wintera na łamach *Nature* w 2005 roku – obaliło intuicyjne wyobrażenia o naturze komunikacji w świecie kwantowym, w którym, jak się okazało, informacja może być ujemna.

Horodecki-senior, pisząc artykuł dla *Review of Modern Physics* (RMP), nie planował rzecz jasna wprowadzania wymuszonych mechaniką kwantową zmian w założeniach obowiązującej filozofii przyrody, ale ambicje były nie mniejsze. Do pracy zaprosił Pawła i Michała. Najmłodszy –

Karol – pisał doktorat z kryptografii kwantowej, kiedy okazało się, że zadanie jest trudniejsze i bardziej czasochłonne niż przewidywano i – za wiedzą Ciraca – dołączył do ojca oraz braci. Niepozbowiona mokołu praca trwała dwa lata. Artykuł „Quantum Entanglement” ukazał się w RMP w 2009 roku, a w ciągu następnych lat uzyskał ponad 4500 cytowań. Jednak ani ta praca, ani żadna z dziedziny mechaniki czy informatyki kwantowej nie odpowiedziała na jedno zasadnicze pytanie, które wyłoniło się prawie 100 lat temu z obłoku niewiedzy i zaskoczyło samych fizyków: „Po co naturze »tajemnicza inwencja« w postaci splątanych cząstek elementarnych na zawsze uwięzionych w szumie?”.

Pytanie nie musi pozostać bez odpowiedzi. Od 2007 roku przy UG istnieje Krajowe Centrum Informatyki Kwantowej (KCIK) założone przez prof. Ryszarda Horodeckiego i prof. Marka Kusia z Centrum Fizyki Teoretycznej PAN we współpracy z ówczesnym rektorem uczelni Andrzejem Ceynową. KCIK, zrzeszające siedem uczelni i dwa instytuty PAN-u, stało się ważnym na świecie miejscem badań z zakresu informatyki kwantowej. Jest więc gdzie i kogo pytać o paradoksy ze świata cząstek elementarnych.

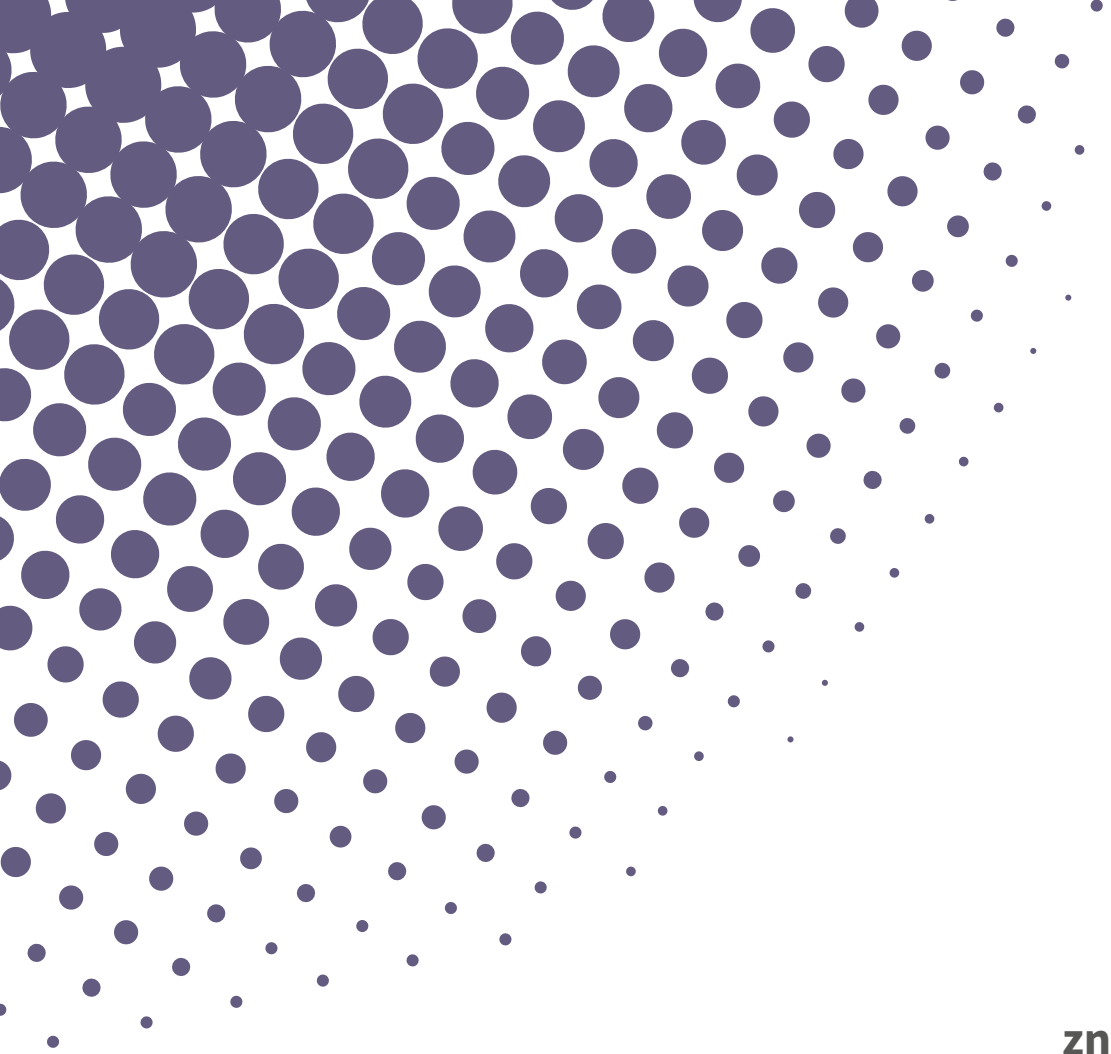
”
W głowie
prof. Horodeckiego
pojawił się wers zapamiętany z *Myśli Pascala*,
że oto otrzymał szansę
poznania, skąd „węzeł
naszej natury czerpie swe
skręty i zwoje”.

Horodecki, R., Horodecki, P., Horodecki, M., Horodecki, K. (2009). Quantum Entanglement. *Reviews of Modern Physics*, 81 (2), 865–942.

Horodecki, M., Oppenheim, J. (2013). Fundamental Limitations for Quantum and Nanoscale Thermodynamics. *Nature Communications*, 4 (1).

**Teoria
wystarczająco
dobra**

Anna Mateja



**Czy Model Standardowy
to punkt zwrotny
w rozwoju fizyki cząstek
elementarnych? Jakie
znaczenie ma tak precyzyjna
wiedza o budowie materii
dla mieszkańców Ziemi
pozbawionych dostępu
do wody czy umierających
z powodu chorób, na które
brakuje lekarstwa?**

Teoria opisująca elementarne cząstki materii i problemy świata widoczne gołym okiem to dwie strony tej samej materialnej rzeczywistości. Artur Kalinowski, fizyk cząstek elementarnych i doktor habilitowany z Uniwersytetu Warszawskiego, który – korzystając z grantu FNP HOMING PLUS (2011) – pracował przy Wielkim Zderzaczu Hadronów w Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych (CERN) na przedmieściach Genewy, nie kryje braku złudzeń. Ustalenia, które stały się udziałem jego i sporej grupy naukowców zaangażowanych do podzespołu badającego możliwości rozpadu bozonu Higgsa, to sukcesy jedynie tzw. Pierwszego Świata. Ale za to jakie!

Kalinowski niedawno przekroczył czterdziestkę. Jest więc niemal równolatkiem teorii fizyki cząstek elementarnych (czyli takich, które – jak wskazuje przytaczana przez niego definicja – „według obecnej wiedzy nie mają żadnych składników ani rozmiarów”) nazywanej Modelem Standardowym. Teoria, sformułowana w języku matematyki w latach 70. XX wieku, stanowi, że cząstki budujące materię to kwarki i leptony. Między nimi pojawiają się oddziaływania: elektromagnetyczne, silne, słabe oraz grawitacyjne, którego siła jest na tyle mało znacząca, że może być pomijana. Zwłaszcza że, jak przypomina Kalinowski, wciąż „nie istnieje wystarczająco dobra

teoria, która potrafiłaby połączyć teorię grawitacji z mechaniką kwantową”. Oddziaływanie między kwarkami i leptonami dokonuje się przez wymianę cząstek-nośników oddziaływania, czyli bozonów. Model Standardowy przewidywał istnienie wśród nich takiego, który – oddziałując z innymi – nadawał im masę, ale sam nie miał być ani budulcem materii, ani nośnikiem oddziaływania. Model Standardowy przewidywał zresztą każdą własność dodatkowej cząstki poza jedną: nie określał jej masy.

O tym wszystkim pisali już w 1964 roku w pracach ogłoszonych niezależnie od siebie na łamach *Physical Review Letters* Robert Brout, François Englert i Peter Higgs. Przewidywania okazały się słuszne i 4 lipca 2012 roku świat – tzn. ta niewielka jego część zaintrygowana tajnikami budowy materii – dowiedział się o istnieniu bozonu o opisanych właściwościach, noszącego nazwę od nazwiska uczonego – Higgsa, który przewidział istnienie tej cząstki (z Englertem otrzymał rok później Nagrodę Nobla z fizyki). Bozon wykryły detektory ATLAS i CMS podczas eksperymentów przeprowadzanych w Wielkim Zderzaczu Hadronów.

Historia nie skończyła się na eksperymentalnym potwierdzeniu znalezienia cząstki tak

”
Teoria opisująca
elementarne cząstki
materii i problemy
świata widoczne gołym
okiem to dwie strony
tej samej materialnej
rzeczywistości.

nietrwałej (z tego wynikała podstawowa trudność w dowiedzeniu jej istnienia), że rozpadała się w ułamkach sekund. Bozon Higgsa udało się odnaleźć dzięki poznaniu jego „kanałów rozpadu”, czyli, mówiąc mniej naukowo, śladów, jakie pozostawił, zdradzając przed eksperymentatorami swoje istnienie. Dane doświadczalne pozwoliły m.in. stwierdzić, że w 6% przypadków cząstka może się rozpaść na dwa leptony tau oraz neutrino, następnie jeden z leptonów rozpada się na cząstki nazwane mionami, drugi na hadrony.

Tu konieczna jest zmiana perspektywy: z trudnej do wyobrażenia mikroskali leptonów, mionów i antyelektronów na skalę przemysłową, w jakiej dokonują się eksperymenty umożliwiające znalezienie i poznanie nowych cząstek. ATLAS (jeden z siedmiu detektorów w akceleratorze cząstek LHC, wybudowany w ośrodku CERN) i CMS (detektor powstały przy Wielkim Zderzaczu Hadronów, służący m.in. do obserwacji mionów) to fabryki z zespołami i podzespołami zatrudniającymi setki ludzi. Każda z grup zajmuje się konkretnym, z reguły dość szczegółowym, zagadnieniem w ramach eksperymentu, którego głównym celem jest np. poszukiwanie bozonu Higgsa w kanale X, Y albo Z.

Dr hab. Kalinowski jest członkiem jednego z takich podzespołów. Razem z innymi uczo-

nymi zajmuje się zagadnieniami dotyczącymi poszukiwania bozonu Higgsa w kanale jego rozpadu na dwa leptony tau. Pełni – jak członkowie pozostałych, równie ważnych zespołów badawczych – rolę inżyniera „dokręcającego jedną ze śrubek”. „Śrubki” to zadania wykonywane przez członków grup badawczych, m.in. konstruowanie układów elektronicznych pomagających odczytać sygnały rejestrowane w detektorach, tworzenie milionów linii kodu komputerowego kontrolującego działania detektorów i przetwarzającego otrzymywane w eksperymencie dane. Wreszcie „inżynierowie” tworzą algorytmy, które pozwalają wyłuskać z setek milionów zderzeń cząstek elementarnych, zachodzących w każdej sekundzie w Wielkim Zderzaczu Hadronów, pojedyncze i najbardziej interesujące spośród nich.

Artykuły naukowe powstające w tak liczonym towarzystwie podpisuje nawet trzy tysiące autorów. Jednym z nich jest Artur Kalinowski – badacz szukający odpowiedzi na pytania postawione na kilka lat przed jego przyjściem na świat i analizujący dane z urządzeń, których zadania są programowane na czas, kiedy on będzie już zapewne wybierał się na emeryturę. Wielka nauka przedstawiana w takiej perspektywie robi wrażenie maszyny pożerającej dowolnie duże sumy pieniędzy i niemało ludzkiego czasu.

Dzięki temu jednak pytania, jakie stawiają sobie Kalinowski i inni uczeni zaangażowani w eksperymenty planowane w ośrodku pod Genewą, nie zmniejszają skali.

Jedno z najbardziej intrygujących dotyczy Modelu Standardowego, który po potwierdzeniu przyjętych w nim założeń, czego dobitnym przykładem było odkrycie bozonu Higgsa, stał się nie tyle punktem zwrotnym w fizyce cząstek elementarnych, ile kolejnym etapem w rozwoju dziedziny. Model Standardowy, według Kalinowskiego i innych fizyków, ma być jedynie przybliżeniem, w granicach małych energii, teorii bardziej fundamentalnej, tak jak mechanika klasyczna była jedynie przybliżeniem mechaniki relatywistycznej dla prędkości – w porównaniu z prędkością światła – niewielkich. Sprawdzenia wymaga bowiem teoria supersymetrii, która – w dużym uproszczeniu – zakłada, że każdy kwark, lepton, mion i inne cząstki elementarne mają supersymetrycznego partnera. Jeśli założenia okażą się prawdziwe, na potwierdzenie istnienia będzie czekało dokładnie tyle cząstek, ile już zidentyfikowano. Bezskuteczne, jak do tej pory, poszukiwania prowadzone są w przewidywanych kanałach rozpadu cząstek – dokładnie tak jak działo się to, kiedy usiłowano znaleźć bozon Higgsa czy leptony tau.

Wskazówek co do kształtu dalekosiężnej teorii będącej kolejnym przybliżonym opisem rzeczywistości, uwzględniającym nie tylko istnienie bozonu Higgsa, ale też supersymetrii, naukowcy poszukują w niewielkich różnicach między wynikami doświadczalnymi a przewidywaniami Modelu Standardowego. Same cząstki supersymetryczne, jeśli istnieją, być może „pozwolą” się znaleźć, gdy w ich poszukiwania zaangażowana zostanie jeszcze większa energia niż ta, którą naukowcy mają do dyspozycji za sprawą Wielkiego Zderzacza Hadronów. W 2020 roku CERN zatwierdził budowę urządzenia o nazwie Future Circular Collider, co można przetłumaczyć jako Przyszły Zderzacz Kołowy. Jego obwód przekroczy 100 km, a wygenerowana energia zderzeń będzie sześć razy większa od możliwości obecnego zderzacza. Pracę rozpocznie najwcześniej w latach 50. obecnego wieku.

Zaawansowane badania cząstek elementarnych nie muszą pozostawać bez związku ze światem, jaki znamy i problemami, z którymi próbujemy się mierzyć. Artur Kalinowski przypomina m.in. pomysł wykorzystania neutrin – cząstek, które słabo oddziałują z materią – do skanowania wnętrza Ziemi. Jednak pytanie, na ile osiągnięcia naukowe zmieniają świat na

lepsze miejsce do życia, to już zagadnienie z innej dziedziny niż fizyka cząstek elementarnych.

- The CMS Collaboration (w tym Kalinowski, A.). (2016). Event Generator Tunes Obtained from Underlying Event and Multiparton Scattering Measurements. *European Physical Journal C*, 76, 155.
- The CMS Collaboration (w tym Kalinowski, A.). (2013). Identification of B-Quark Jets with the CMS Experiment. *Journal of Instrumentation*, 8.
- The CMS Collaboration (w tym Kalinowski, A.). (2013). Multiplicity and Transverse Momentum Dependence of Two- and Four-Particle Correlations on pPb and PbPb Collisions. *Physics Letters B*, 724, 213–240.
- The CMS Collaboration (w tym Kalinowski, A.). (2012). Observation of a New Boson at a Mass

of 125 GeV with the CMS Experiment at the LHC. *Physics Letters B*, 716 (1), 30–61.

- The CMS Collaboration (w tym Kalinowski, A.). (2013). Observation of a New Boson with Mass Near 125 GeV in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV. *Journal of High Energy Physics*, 6 (6).
- The CMS Collaboration (w tym Kalinowski, A.). (2015). Performance of Electron Reconstruction And Selection with the CMS Detector in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV. *Journal of Instrumentation*, 10 (6).
- The CMS Collaboration (w tym Kalinowski, A.). (2015). Precise Determination of the Mass of the Higgs Boson and Tests of Compatibility of Its Couplings with the Standard Model Predictions Using Proton Collisions at 7 and 8 TeV. *European Physical Journal C*, 75, 212.



Jak na wojnie

Anna Mateja



**W jaki sposób populacja
komórek zagrożonych
wirusem organizuje obronę
immunologiczną? Czy
istnieją podobieństwa
w procesie podejmowania
decyzji przez pojedyncze
komórki i przez złożony
układ wielokomórkowy,
jakim jest człowiek?**

Prof. Tomasz Lipniacki – laureat m.in. programu TEAM FNP (2009) – pracę magisterską napisał z kosmologii. Na temat doktoratu wybrał turbulencję kwantową w nadciekłym helu. Chociaż z biologii nie otrzymywał w szkole więcej niż trójkę, to właśnie biologia systemów zaintrygowała go na tyle, że porzucił wcześniejsze tematy. Jako szef Pracowni Modelowania w Biologii i Medycynie funkcjonującej w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie odwołuje się do matematyki, by opisać procesy zachodzące w komórce pod wpływem sygnałów przychodzących z zewnątrz bądź przekazywanych między komórkami.

Badania eksperymentalne i modelowanie matematyczne to narzędzia, dzięki którym zespół prof. Lipniackiego poznaje język cytokin – niewielkich białek wydzielanych przez komórki, w tym wyspecjalizowane komórki układu odpornościowego (m.in. limfocyty, monocyty i makrofagi), w odpowiedzi na stres wywołany infekcją wirusową bądź bakteryjną. Cytokiny, zdolne wiązać się z odpowiednimi receptorami na błonach komórkowych, koordynują odpowiedź immunologiczną organizmu. Są niczym zestaw najpotrzebniejszych słów, którymi porozumiewają się komórki w sytuacji niebezpieczeństwa, wspólnie wypracowując odpowiedź na zagrożenie.

nie. I tak jak w języku ludzi słowa mogą pobudzać do działania albo wywoływać emocje, tak cytokiny – nie tylko przez swoją obecność, ale też za sprawą liczebności molekuł receptorów związanych na błonie aktywowanej komórki – wpływają na rodzaj i intensywność reakcji wywołanej w komórce.

Z ponad stu rodzajów cytokin opisanych do tej pory bohaterami prac prof. Lipniackiego są interferony i interleukiny oraz cząsteczki TNF (Tumor Necrosis Factor – czynnik martwicy nowotworu) koordynujące obronę immunologiczną. W pracy „Single-Cell NF-Kappa B Dynamics Reveal Digital Activation and Analogue Information Processing” (ukazała się na łamach *Nature* w czerwcu 2010 roku) naukowcy – Savaş Tay, Jacob J. Hughey, Timothy K. Lee, Tomasz Lipniacki, Stephen R. Quake i Markus W. Covert – pokazali eksperymentalnie, że pojedyncze molekuły TNF wystarczą do aktywacji czynnika transkrypcyjnego o nazwie NF-kappa B. Czynnik ten przemieszcza się z cytoplazmy do jądra komórkowego i uruchamia transkrypcję kilkuset genów regulujących odpowiedź immunologiczną komórki. Do wiosny 2021 roku praca doczekała się ponad 500 cytowań, ale jej pierwszą wersję edytor prestiżowego pisma odrzucił.

”
Z ponad stu rodzajów cytokin opisanych do tej pory bohaterami prac prof. Lipniackiego są interferony i interleukiny oraz cząsteczki TNF [...] koordynujące obronę immunologiczną.

Kluczowy zarzut recenzentów był następujący: wbrew modelowi opracowanemu przez autorów w analizowanym mechanizmie podejmowania decyzji komórkowej nie ma przypadku. Naukowcy dzięki zaawansowanym technologicznie badaniom, przeprowadzanym równolegle w 96-komorowych układach mikroprzepływowych, udowodnili tylko tyle, że część komórek zaalarmowanych sygnałem TNF odpowiada, a część nie, przy czym frakcja odpowiadających komórek rośnie wraz ze wzrostem koncentracji cytokiny TNF. Zależność można było wyjaśnić większą czułością części komórek, które odpowiadają już przy niewielkiej koncentracji TNF.

By zrozumieć celność recenzenckiego zarzutu, trzeba przypomnieć, że istotą pytania o molekularną podstawę odpowiedzi komórek jest ustalenie, co to znaczy na poziomie komórkowym „podjąć decyzję” adekwatną do sygnału odebranego za sprawą receptorów skomunikowanych z cytokinami. Badacze intuicyjnie przeczuwali, że przetwarzanie sygnału i podejmowanie decyzji immunologicznej jest procesem z pogranicza przypadku i konieczności. Nie może mieć charakteru wyłącznie stochastycznego, bo decyzje zawsze przypadkowe są bezsensowne. Wykluczone jest też przetwarzanie całkowicie zdeterminowane, bo taka obrona nie sprostałaby

ewolucyjnie zmieniającemu się przeciwnikowi (np. szybko mutującemu wirusowi), który rozszyfrowałby zasady jej działania, czyniąc populację komórek nieodwracalnie bezbronną.

Prof. Lipniacki wiedział już wówczas, że komórka jest w stanie odpowiedzieć nawet na sygnały odebrane od pojedynczych cytokin TNF. W artykule opublikowanym wraz ze współpracownikami w 2007 roku na łamach *BMC Bioinformatics* podważył bowiem – przeliczając stężenie cytokiny TNF na liczbę molekuł – powszechnie obowiązujące założenie, że w celu wytworzenia odpowiedzi trzeba aktywować znaczącą grupę receptorów TNF na błonie komórki. Z jego obliczeń wynikało, że najmniejsze stężenie cytokiny TNF, przy którym obserwowana jest aktywacja czynnika NF-kappa B, odpowiada mniej niż jednej molekuł TNF w przeliczeniu na objętość komórki. Teoretyczny model stochastycznej aktywacji czynnika NF-kappa B przez pojedyncze molekule TNF zaproponowany przez prof. Lipniackiego zwrócił uwagę naukowców z Uniwersytetu Stanforda w Dolinie Krzemowej, którzy złożyli polskiemu uczonemu propozycję opracowania teoretycznej podstawy ich eksperymentów.

Model teoretyczny przydał się, kiedy z *Nature* przysłano negatywną recenzję. Prof. Lipniacki zainicjował wtedy przeprowadzenie kolejnego

eksperymentu, w którym badacze wygenerowali dwa impulsy cytokin, ale o tak niskim stężeniu, że jedynie 10% komórek mogło na nie odpowiedzieć. Zaobserwowano, że gdy 10% komórek reaguje tylko na pierwszy bądź na drugi impuls cytokin, na oba impulsy odpowiada również ok. 10% z nich. Przy takim wyniku wszystko stało się jasne. Gdyby każda z komórek była jednakowo czuła, na oba impulsy powinno odpowiedzieć ok. 1% z nich. Uaktywnienie się 10 razy większej liczby komórek dowodzi, że są one zróżnicowane pod względem czułości na sygnały przenoszone przez cytokinę TNF (opis heterogenności populacji komórek był jednym z ważniejszych wyników pracy). Dziełem przypadku pozostaje natomiast to, czy komórka odpowie na pierwszy, czy na drugi impuls. Większa liczba receptorów pociąga za sobą większe prawdopodobieństwo odpowiedzi, ale o niej nie przesądza.

Zmiany wprowadzone do pracy zdecydowały o możliwości jej publikacji w *Nature* i w dużym stopniu przyczyniły się do jej późniejszego powodzenia.

Sukces inwazji wirusów – np. tych, które są przedmiotem eksperymentów prowadzonych w zespole prof. Lipniackiego: syncytialnego wirusa oddechowego RSV (odpowiedzialnego za infekcje dróg oddechowych u niemowląt i dzieci)

czy grypy hiszpanki – zależy od ich możliwości przzerwania komunikacji między komórkami. Jak na wojnie: jeżeli przeciwnik z braku łączności nie będzie w stanie koordynować walki – jest bezbronny. I tak jak wirus dąży do „przerwania połączenia”, tak działania komórki są skupione na pozyskaniu i przekazaniu informacji – od tego zależy skuteczność współpracy między komórkami zainfekowanymi i komórkami obrony immunologicznej.

Komórka, rozpoznając obce RNA wirusa, ma przed sobą kilka scenariuszy działania. Może dokonać samounicestwienia (apoptozy) i zniszczyć wraz z sobą intruza. Taka decyzja może być jednocześnie sygnałem do proliferacji, czyli podziału komórek w celu przejęcia funkcji obumarłych sąsiadek. Nieliczne z zarażonych komórek sygnalizują problem innym komórkom, ale te, które to robią, „krzyczą” donośnie – cytokiny wydzielane przez jedną komórkę potrafią uruchomić program antywirusowy w kilkuset sąsiednich, jeszcze niezarażonych. Badania zespołu prof. Lipniackiego potwierdzają też, że prestymulacja, np. cytokiną interferon beta, w przypadku zagrożenia wirusem RSV poważnie utrudnia mu infekcję (liczba zarażonych komórek zmniejsza się za sprawą użycia tej cytokiny

”
I tak jak wirus dąży do „przerwania połączenia”, tak działania komórki są skupione na pozyskaniu i przekazaniu informacji – od tego zależy skuteczność współpracy między komórkami zainfekowanymi i komórkami obrony immunologicznej.

dziesięciokrotnie, a w przypadku wirusa grypy hiszpanki – aż stokrotnie).

Skuteczność obrony komórkowej zależy jednak przede wszystkim od sprawności zbierania informacji i szybkości podejmowania decyzji. Dokładnie tak opisał zachowania międzyludzkie Arie W. Kruglanski, psycholog społeczny, który wprowadził terminy *open-mindedness* na określenie otwartości na nowe pomysły i *the need for closure* jako wyczerpującą emocjonalnie niechęć do stanu, w którym z różnych powodów nie możemy podjąć ostatecznej decyzji. Komórce nie brakuje możliwości zbierania informacji i sprawdzania, czy nic jej nie zagraża, ale – jak

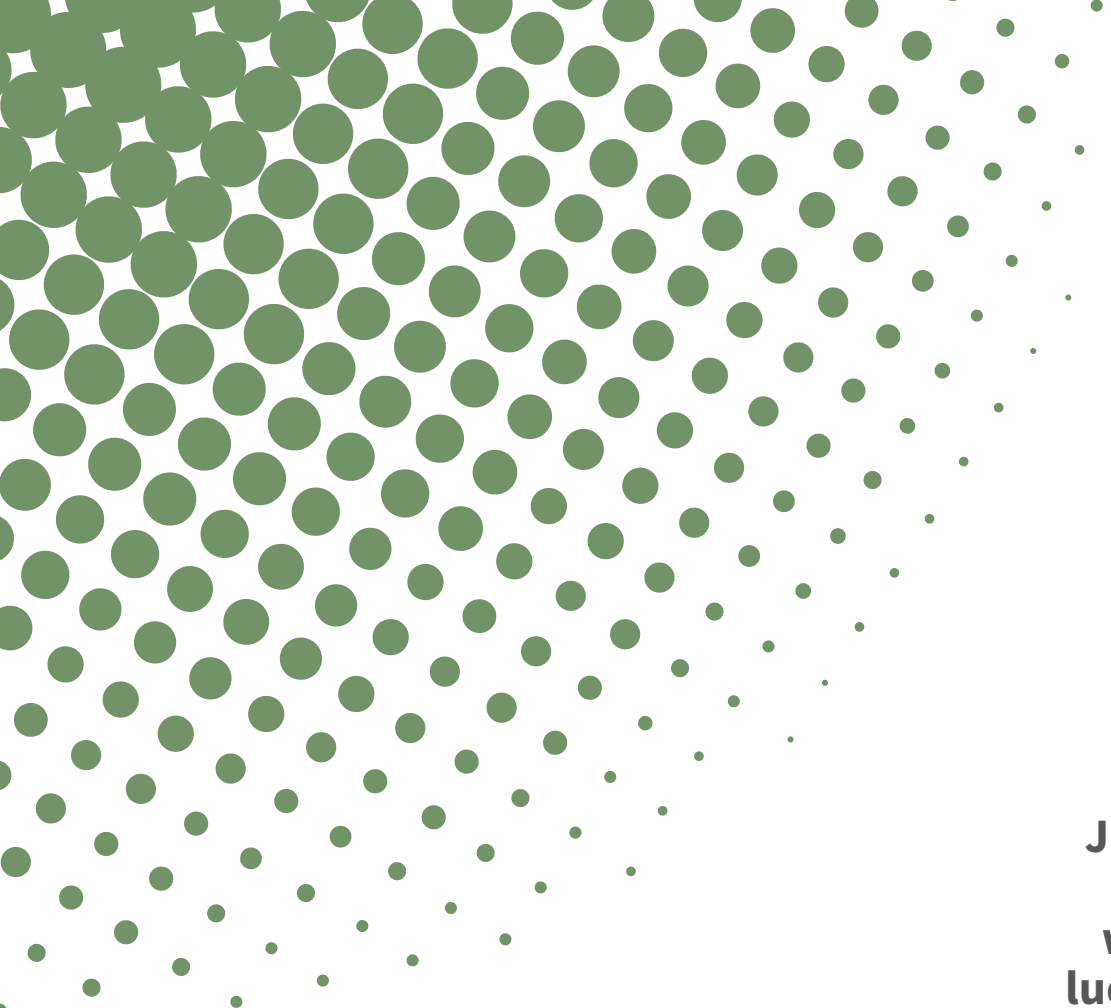
w życiu społecznym – faworyzowana jest, zwłaszcza w sytuacji stresowej, umiejętność szybkiego podjęcia decyzji, nawet nieoptymalnej – ważne, że jednoznacznej i doprowadzonej do końca. To akurat ludzie wiedzą nie od dziś – nic tak nie dezorganizuje życia społecznego jak decyzje podejmowane nie w porę i na dodatek wielokrotnie zmieniane po drodze.

Tay, S., Hughey, J.J., Lee, T. K., Lipniacki, T., Quake, S. R., Covert, M.W. (2010). Single-Cell NF-Kappa B Dynamics Reveal Digital Activation and Analogue Information Processing. *Nature*, 466, 267–271.



Suma drobnych zmian

Anna Mateja



**Jak przeprowadzić badania
jakości życia, których
wyniki pozwolą wyciągnąć
ludzi sprzed komputerów na
jogging, a słodzony napój
zamienią im na jabłko?
Czy jedynym celem takich
dociekań jest zmiana
zachowań, a może ich sedno
dotyka spraw dużo bardziej
istotnych?**

Prof. Aleksandra Łuszczyńska – psycholożka, naukowczyni z wrocławskiej filii SWPS Uniwersytetu Humanistycznospołecznego, laureatka programów START (2000) i MISTRZ (2011) FNP – uważa, że w nauce najważniejszy jest *paradigm shift*. To taka zmiana myślenia, która zakłada poszukiwanie rozwiązań poza szlakami znanymi na pamięć, nawet jeśli miałyby wiązać się z łamaniem standardów i podważaniem intuicji. Pomysły dobre nie tylko jako eksperymenty myślowe, ale możliwe do przeprowadzenia poza laboratorium – w zmieniających się warunkach ludzkiego życia.

Nowe rozwiązanie powinno też dać się zrealizować w czasie krótszym, niż prognozują fachowcy od *implementation science* zajmujący się poszukiwaniem sprawnego wdrożenia obiecujących wyników. W naukach społecznych, zwłaszcza w badaniach skupionych na pojedynczych procesach i pozbawionych szerokiego spojrzenia, droga od pomysłu do wdrożenia potrafi trwać 20 lat. Dla interdyscyplinarnych tematów z pogranicza, m.in. psychologii zdrowia i zdrowia publicznego, którymi zajmuje się prof. Łuszczyńska, to zdecydowanie za długo. Odpowiedzi na pytanie o sposób, w jaki ludzie mogą zmienić dietę na zdrowszą albo przekonać się do systematycznych ćwiczeń fizycznych,

ograniczając siedzący tryb życia czy rezygnując z substancji psychoaktywnych, są przecież ważne tu i teraz. Podobnie jest w przypadku poznania możliwości ludzkiej psychiki i znaczenia pomocy innych w sytuacji konfrontowania się ze współczesnymi traumami, np. diagnozą trudnej do wyleczenia choroby, co stanowi kolejny temat badań psycholożki.

Naukowy *paradigm shift* prof. Łuszczyńskiej zakłada więc skrócenie ścieżki prowadzącej od badania prostych procesów w laboratorium do przygotowania wdrożeń gotowych do wykorzystania w praktyce klinicznej. Taka metodologia intensyfikuje pracę, wymaga konsultacji badaczy i praktyków z różnych dyscyplin i kultur, ale trafne rozwiązanie ma szansę szybko dotrzeć do tych, którym zdobyta dopiero co wiedza pozwoli zmienić życie. Co równie ważne, rozstrzygnięcie ma być użyteczne w jednakowym stopniu dla mieszkańca Gambii, Nowej Zelandii czy Rumunii. Praca przypomina równanie z wieloma niewiadomymi, ale – jak się okazuje – jest ono rozwiązywalne i ma ciekawy wynik.

Postanowienie zmiany trybu życia na zdrowszy z reguły rozbija się o jeden mebel. To może być kanapa, która widziana w sobotę skojarzy się z ulubionym serialem oglądanym

na niej pod kocem. W lepszej wersji siebie serial zastępuje czytanie książki, ale efekt jest ten sam: uruchamia się nawyk wykluczający ruch na świeżym powietrzu albo pedałowanie na rowerku stacjonarnym podczas seansu filmowego. Innym meblem, który niweczy wiele skrupulatnie pomyślanych planów zadbania o zdrowie, staje się biurko z komputerem. Zasiadanie przy nim niekoniecznie jest uleganiem pokusom, o wiele częściej koniecznością funkcjonowania na zdalnym rynku pracy, skutek jednak podobny: statyczny tryb życia. Jak w takiej sytuacji współczesny *Homo sapiens* ma pozbyć się nadmiarowych kilogramów? Zadbac o serce i prosty kręgosłup? O dobre myślenie o sobie samym?

Badania prof. Łuszczzyńskiej bazują na twierdzeniu wielokrotnie udowodnionym przez psychologów w ostatnich 30 latach, że siła motywacyjna do zmiany drzemie w umiejętności formułowania bardzo konkretnych, specyficznych celów. Jej opanowanie zwiększa szansę na osiągnięcie nawet tych ocenianych jako znajdujące się poza zasięgiem znanych sobie możliwości. Tymczasem, co prof. Łuszczzyńska udowodniła z zespołem współpracowników, istotne znaczenie ma i to, by poza wyznaczaniem sobie celów przygotować specyficzne plany krótkoterminowe, dotyczące np. najbliższego tygodnia. Powinny

zostać opracowane na tyle precyzyjnie, żeby stać się, jak to ujmuje badaczka, „mentalną reprezentacją” przyszłej sytuacji: co będzie robione, w jakie dni tygodnia, o której godzinie, jak długo. Kanapa kusząca w sobotnie popołudnie nawet najbardziej zmotywowanego do wysiłku użytkownika zyskuje w ten sposób alternatywę w postaci nowego „przepisu”. Może on wyglądać choćby tak: od 15.00 do 16.30 jazda na rowerze po wytyczonej wcześniej trasie, z prędkością, która pozwala rozmawiać, ale już nie śpiewać, by dbać o określone tętno. Umiejętność tworzenia „mentalnych reprezentacji” czynności, jakie planujemy wykonywać, wyraźnie i policzalnie zwiększa szansę na ich realizację. Jak efektywnie, pokazuje sytuacja wśród odchudzających się kobiet z nadwagą, którym umiejętność tworzenia specyficznych planów pozwoliła na przestrzeni miesięcy zwiększyć utratę masy ciała z 2,6 do 4,2 kg.

Badania eksperymentalne polskiej psycholożki pozwoliły również ustalić, że uwzględnienie w „mentalnych reprezentacjach” partnera (czyli bliskiej osoby, niezależnie od charakteru relacji) pomagającego stworzyć plan B na sobotnie popołudnie zwiększa efektywność jego realizacji o dodatkowe 10 min. aktywności fizycznej dziennie (badani utrzymali wynik przez ponad sześć miesięcy). Partnerowi, mimo że nie ustalał

szczegółowego planu dla siebie, współpraca też przynosi profit w postaci 6 min. aktywności dziennie więcej.

W gąszczu szczegółowych pytań nie ginie kwestia zasadnicza, która weryfikuje przydatność prowadzonych badań oraz ich znaczenie cywilizacyjne: zmiana zachowań nie jest celem samym w sobie. Mają one poprawić jakość życia, by przynosiło konkretne korzyści wynikające z rozwoju albo chociaż podtrzymywania sprawności fizycznej, zapewniało psychiczne zadowolenie ze starań o przeżycie swojego czasu na własnych warunkach, niekoniecznie przy założeniu, że wszystkie ograniczenia zawsze można przekroczyć, ale na pewno że należy podjąć próbę ich sforsowania. I wreszcie, celem jest to, by troska o dobrostan zdrowotny własny czy partnera (także dziecka, rodzica, przyjaciela) umocniła relację między nimi lub z innymi ludźmi (co nie jest oczywiste, jeśli np. walka z nawykiem stanie się powodem konfliktów).

Wyniki cytowalności artykułów prof. Łuszczyńskiej wiosną 2021 roku przekroczyły liczbę sześciu tysięcy. To fenomen, który włączył polską badaczkę do grona 1% najczęściej cytowanych naukowców w jej dziedzinie (wyniki za Web of Science). Z kolei autorzy tzw. listy stanfordzkiej zaliczyli Polkę w 2020 roku do 2% najlepszych

uczonych na świecie. Badania dotyczące tematów powstałych na styku psychologii i nauk o zdrowiu osiągnęły sukces przede wszystkim za sprawą swojej interdyscyplinarności, która nadała im znaczenie daleko przekraczające jedną, zwłaszcza wąsko rozumianą, dyscyplinę badawczą. Równie istotną przyczyną ich powodzenia jest to, że skupiają się nie tylko na poznaniu procesu psychologicznego. Pozyskana wiedza pozwala zespołowi prof. Łuszczyńskiej opracować na tyle skuteczne interwencje, że można je wprowadzić w życie, a wywołane zmiany utrzymać nawet przez kilkanaście miesięcy.

Nie dziwi więc, że na wyjątkowych badaniach dostarczających dowodów nowej jakości poznały się instytucje rządowe (m.in. National Institutes of Health w USA czy Public Health England w Wielkiej Brytanii) oraz fundacje i organizacje pozarządowe wykorzystujące wyniki tych dociekań naukowych w swojej pracy. Natomiast Międzynarodowe Stowarzyszenie Psychologii Stosowanej (najbardziej licząca się na świecie organizacja psychologów, zrzeszająca uczonych tej dziedziny z różnych jej dyscyplin) doceniło badania, honorując prof. Łuszczyńską w 2018 roku swoją nagrodą: Distinguished Scientific Contributions Award (wyróżnienie przyznawane jest zaledwie raz na cztery lata).

”

Każde ustalenie, najbardziej nawet przełomowe, trzeba przełożyć na konkretne ludzkie potrzeby. Zwłaszcza kiedy pracuje się z żywym człowiekiem i trzeba odpowiedzieć na jego bardzo proste pytanie: „Jak może mi to pomóc?”.

110

Wyniki badań naukowych powinny pojawić się na czas – wtedy, kiedy ich wykorzystanie pomoże ludziom rozwiązać doskwierające im problemy: znaleźć źródła energii nieoparte na kopalinach, zaproponować szczepionkę na chorobę, na którą nie ma lekarstwa, ale też opisać czynniki sprzyjające zmianie zachowań, dzięki czemu ludzie otrzymają szansę na zminimalizowanie u siebie ryzyka wystąpienia chorób cywilizacyjnych. Cenione wyniki polskiej badaczki – uzyskane m.in. w Lyda Hill Institute for Human Resilience w University of Colorado oraz w University of Melbourne (uczelnia znajdującej się wśród 50 najlepszych na świecie, w której w 2020 roku prof. Łuszczynska, po pozytywnym przejściu niełatwej ścieżki

ewaluacji, została honorowym profesorem) – wpisują się idealnie w sektor nauki pod koniec lat 90. nazwany kwadrantem Pasteura. Inaczej niż kwadrant Bohra (gdzie ważne jest przede wszystkim poznanie) czy kwadrant Edisona (priorytetem jest zastosowanie), kwadrant nazwany imieniem twórcy szczepionki przeciwko wściekliźnie skupia badaczy, dla których poszukiwanie odpowiedzi na pytanie: „Jak jest?” nieodłącznie łączy się z kwestią: „Jak rozwiązać problem?”. Dla prof. Łuszczynskiej właśnie takie połączenie jest najbardziej pasjonujące. Każde ustalenie, najbardziej nawet przełomowe, należy przełożyć na konkretne ludzkie potrzeby. Zwłaszcza kiedy pracuje się z żywym człowiekiem i trzeba odpowiedzieć na jego bardzo proste pytanie: „Jak może mi to pomóc?”.



Nitki, pułapki, szkielety

Anna Mateja



**Czy z chorobą nowotworową
i brakiem błony maziowej
w torebce stawowej może
sobie poradzić szczotka
nazywana molekularną?
W jaki sposób chemia
i biologia wzajemnie się
inspirują, poszukując
materiałów użytecznych
w rozwiązywaniu znanych
od dawna problemów?**

Dwa rzędy podługowatych, naprzemiennie ułożonych listków mimozy wstydlivej (*Mimosa pudica*) składają się w ułamkach sekund od najlżejszego trącenia jednego z nich. Dr hab. inż. Joanna Pietrasik – chemiczka z Instytutu Technologii Polimerów i Barwników Politechniki Łódzkiej, laureatka m.in. programu FNP HOMING/POWROTY (2007/2009) – poleca studentom obejrzenie parominutowego filmiku na YouTube, nim zabiorą się za „rozgryzanie” tajemnic szczotek molekularnych. Sama zetknęła się z nimi po raz pierwszy na początku wieku, kiedy wyjechała na staż podoktorski do prof. Krzysztofa Matyjaszewskiego – szefa Center for Macromolecular Engineering w Carnegie Mellon University w Pittsburghu, laureata Nagrody FNP (2004) – który tematem polimerów o specyficznych cechach zajmował się od lat 90. z uznanymi na świecie sukcesami. Rozpoczęła od zera, ale sprawnie wchodziła w nową dziedzinę, dzięki czemu na początku 2010 roku adeptyka i profesor, a także ich współpracownicy, Hyung-il Lee i Sergei S. Sheiko, opublikowali na łamach *Progress in Polymer Science* wspólny artykuł przeglądowy pt. “Stimuli-Responsive Molecular Brushes”. Tekst doczekał się ponad 500 cytowań.

Obserwacja kilkunastu par listków, które – zwijając się od góry do dołu łodygi – przywierają

do siebie górnymi powierzchniami, ma wprowadzić laików w świat polimeryzacji rodnikowej z przeniesieniem atomu. Metoda nazywana ATRP (od Atom Transfer Radical Polymerization), opracowana w 1995 roku na Wydziale Chemii Carnegie Mellon University, umożliwia przeprowadzanie kontrolowanej syntezy związków wielkocząsteczkowych. Te z kolei – i w tym tkwi klucz do sukcesu metody ATRP – pozwalają tworzyć polimery o precyzyjnie ustalonych właściwościach. Komu nazwa *polimer* kojarzy się z jednorazową torebką foliową, obecną w każdym supermarkecie, a nawet w oceanach, trzeba przypomnieć, że jest to związek chemiczny o dużej masie cząsteczkowej, którego cechy zależą od rodzaju cząsteczek i łączących je wiązań. Stąd polimer może być rozciągliwy jak spotykany w przyrodzie kauczuk (polimer naturalny), albo wytrzymały jak żywica epoksydowa (polimer syntetyczny), albo twardy jak szkło (polimer niemal tak stary jak ludzka kultura), albo biokompatybilny jak złożone z aminokwasów białka (to również polimery naturalne), budujące każdy żywy organizm.

Metoda ATRP otworzyła przed niepoliczalną ilością znanych od dawna związków kolejne możliwości tworzenia nieznanych układów

113

”
Metoda ATRP otworzyła przed niepoliczalną ilością znanych od dawna związków kolejne możliwości tworzenia nieznanych układów o skomplikowanych strukturach, np. makrocząsteczek w postaci szczotek molekularnych.

”
Natura sama podsu-
wa więc inspiracje [...],
jak zaprojektować ma-
teriały o specyficznych
właściwościach, których
człowiek potrzebuje, by
uporać się z chorobami
czy innymi problema-
mi stworzonej przez
siebie cywilizacji.

o skomplikowanych strukturach, np. makrocząsteczek w postaci szczotek molekularnych. Żeby jednak pokazać potencjał tej struktury, trzeba pochylić się nad talerzem z porcją spaghetti jak dziesięcioletnia córka inż. Pietrasik, której naukowczyni w taki właśnie sposób tłumaczyła, czym są polimery i na czym polega jej praca. Makaron oblany pikantnym sosem z pomidorów wygląda jak kłębek splątanych nitek. Kiedy nawijamy jedną z nich na zęby widelca, okazuje się, że każda jest kłębkim, tyle że mniejszych rozmiarów. Taką właśnie strukturę ma większość polimerów. Z kolei pojedyncza szczotka molekularna jest pojedynczą nitką albo, ujmując rzecz fachowo, długim liniowym polimerem, który niczym szkielet daje oparcie łańcuchom bocznym nazywanym drugim segmentem polimeru.

Dzięki temu, jak wyjaśnia dr hab. Pietrasik, powstaje struktura przestrzenna „typu cylindrycznego o kontrolowanych rozmiarach nanoskopowych”.

Zbudowane w ten sposób makrocząsteczki szczotek polimerowych pozwoliły pojawić się na świecie m.in. niebywale miękkim elastomerom (to związki w temperaturze pokojowej i przy nawet niewielkich naprężeniach zdolne do dużych i odwracalnych odkształceń), które pod pewnymi względami

przypominają hydrożele. Tyle że w przeciwieństwie do nich nie stwardnieją pozbawione wody, bo jej w ogóle nie potrzebują. W elastomerach funkcję rozpuszczalnika, który nadaje im sprężystość, pełnią łańcuchy boczne szczotki molekularnej. Jeśli wspomnieć, że właściwości mechaniczne analogiczne do cech hydrożeli mają wszystkie tkanki miękkie, wyobraźnia sama podsunie obrazy hodowli tkanek na bazie tego rodzaju polimerów, które będą mogły być wykorzystywane do reperowania zniszczonych wirusem płuc, oparzonej skóry czy nefunkcjonalnych żył.

Szczotki molekularne – niczym listki mimozy albo liście pułapkowe rosiczki okrągłolistnej (*Drosera rotundifolia* L.) rosnącej na polskich torfowiskach, które zamykają się pod ciężarem owada zwabionego kolorem i zapachem wydzielanej cieczy – to materiały inteligentne. Nazwa wynika z ich zdolności reagowania na bodźce, np. określone natężenie światła, zmianę temperatury, kwaśny lub zasadowy odczyn środowiska. Natura sama podsuwa więc inspiracje naukom chemicznym, jak zaprojektować materiały o specyficznych właściwościach, których człowiek potrzebuje, by uporać się z chorobami czy innymi problemami stworzonej przez siebie cywilizacji. Pomysły chemików znajdują z kolei odbiorców

u biologów molekularnych czy nanotechnologów, którzy poszukują np. szczególnego rodzaju makrocząsteczek zdolnych do przenikania przez błony komórkowe i dostarczania leku – takich jak szczotka molekularna o specyficznym składzie chemicznym otrzymana niedawno przez dr hab. Pietrasik i jej zespół. Szczotka molekularna może być nośnikiem doksorubicyny – cytostatyku niszczącego m.in. komórki szpiczaka mnogiego, chłoniaków, nowotworów sutka i jajnika. W warunkach laboratoryjnych pokazano, że nośnik sprawdza się w terapii antynowotworowej: potrafi dostarczyć substancję aktywną do komórki rakowej, w której ze względu na pH (jej kwasowy odczyn, inaczej niż w przypadku komórki prawidłowej, jest niższy od pH macierzy pozakomórkowej) uwalnia lek w odpowiednim miejscu. Produkty rozpadu szczotki nie należą do szkodliwych, a za sprawą jej użycia terapia doksorubicyną, oszczędzająca zdrowe komórki, jest mniej niszcząca dla organizmu.

Twórczy potencjał szczotek tkwi w samej ich architekturze, niezależnie od możliwości reagowania na bodźce. Pokazują to ostatnie prace prof. Matyjaszewskiego, dotyczące np. tworzenia na bazie szczotek syntetycznych odpowiedników lubrycyny – składnika płynu otulającego chrząstkę w zespoleniu stawowym, który sprawia, że może

ono bezszmerowo pracować (tematem zajmują się zresztą nie tylko chemicy na uniwersytecie w Pittsburghu, ale także w Politechnice Łódzkiej). Badaczy interesuje pozyskanie materiałów, które przejmą funkcje lubrycyny, jeśli jej zabraknie w torebce stawowej na skutek zmian chorobowych, i będą zdolne oddziaływać na chrząstkę szklistą pokrywającą powierzchnię stawów. Istotne są – rzecz jasna – te rozwiązania, które przyniosą ulgę osobom zmuszonym żyć z bólem zmian zwyrodnieniowych w stawach kolanowych bądź biodrowych, dzisiaj nieuleczalnych farmakologicznie. Jedynym antidotum jest operacja wszczepienia endoprotez.

12 tys. – tyle publikacji ukazało się do 2021 roku na temat polimerów inteligentnych, w tym polimerów, których makrocząsteczki mają kształt szczotek molekularnych czułych na zmianę temperatury, naświetlenia i inne bodźce zewnętrzne. Jednym słowem – masa tekstów, mimo że od opublikowania na łamach *Progress in Polymer Science* artykułu Matyjaszewskiego i Pietrasik oraz ich współpracowników, którzy jako pierwsi zwrócili uwagę na potencjał ukryty w strukturze szczotki molekularnej, upłynęło zaledwie 11 lat. To oni zaprezentowali jednak istotę tego wciąż wówczas nowego materiału i odkryli możliwości projektowania jego właściwości. Kolejne prace

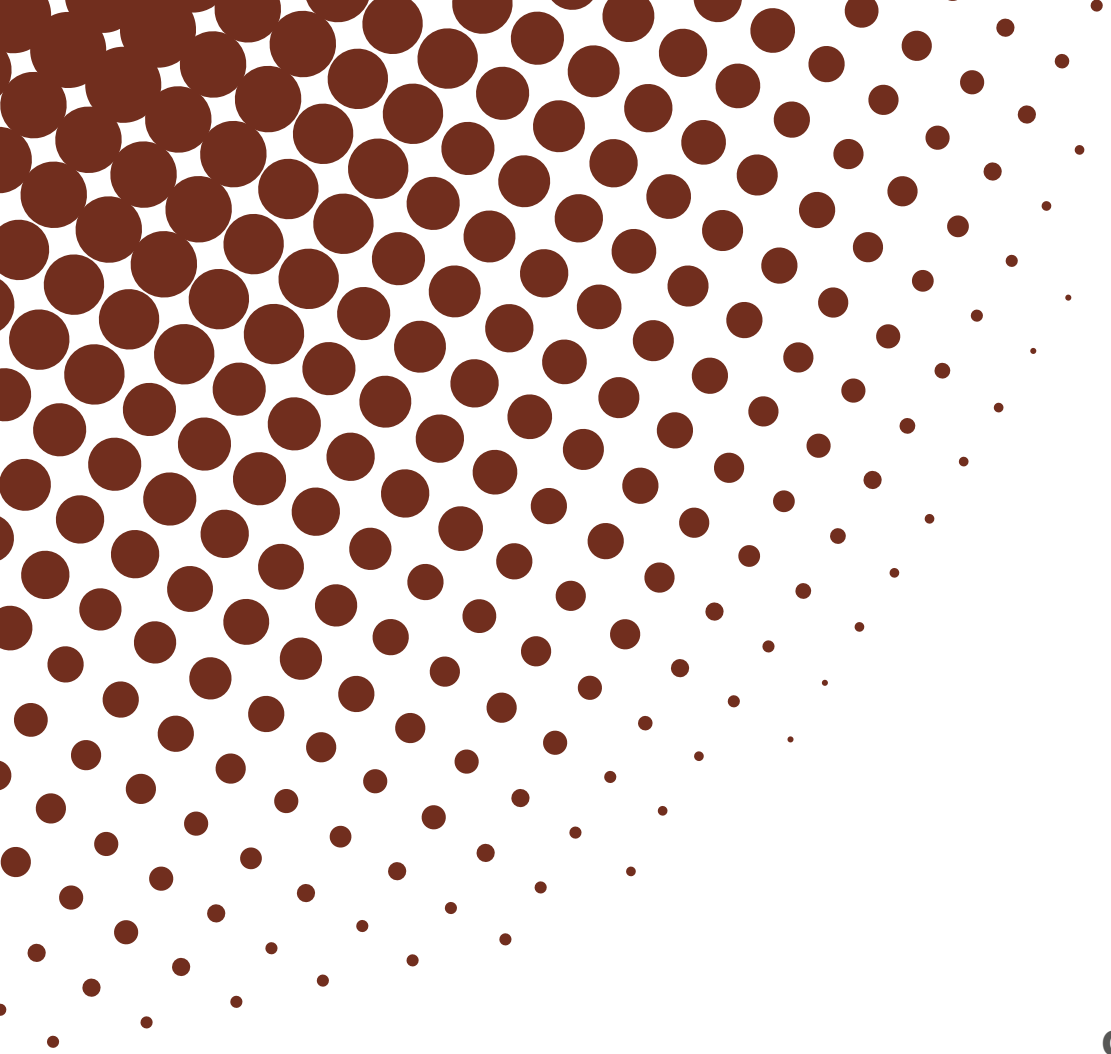
badaczy, które ten potencjał udowodniły, czyniąc z tzw. materiałów inteligentnych jeden z najważniejszych tematów w dziedzinie materiałów polimerowych, pokazały, jak wiele mieli racji.

Lee, H., Pietrasik, J., Sheiko, S.S., Matyjaszewski, K. (2010). Stimuli-Responsive Molecular Brushes. *Progress in Polymer Science*, 35 (1–2), 24–44.



Sojusz u grobu przyjaciela

Anna Mateja



**W jakim stopniu do zjazdu
władców w Gnieźnie
w roku 1000 – wydarzenia
przełomowego dla młodej
polskiej państwowości –
doprowadziły przemiany
duchowe, które zachodziły
wówczas w Niemczech i we
Włoszech? Czy polityką
międzynarodową mogą
kierować nie tylko doraźne
interesy polityczne, ale
także idee?**

Prof. Roman Michałowski – historyk z Uniwersytetu Warszawskiego, autor książki *Zjazd gnieźnieński. Religijne przesłanki powstania arcybiskupstwa gnieźnieńskiego* wydanej w 2005 roku w serii „Monografie” prowadzonej przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej – podjął badania nad spotkaniem cesarza Ottona III i księcia Bolesława Chrobrego ponad dwie dekady temu, kiedy zbliżało się tysiąclecie tego wydarzenia.

Autor stawiał sobie dwa cele. Po pierwsze, sprostowanie nieporozumień, jakie do dyskusji o zjeździe wprowadził Johannes Fried książką wydaną w Stuttgarcie w 1989 roku (publikacja pt. *Otton III i Bolesław Chrobry. Miniatura dedykacyjna z Ewangeliarza z Akwizgranu, zjazd gnieźnieński a królestwa polskie i węgierskie: analiza ikonograficzna i wnioski historyczne* ukazała się po polsku w 2000 roku w tłumaczeniu Elżbiety Kaźmierczak i Witolda Lедера). Po drugie, proponował, żeby na zjazd w Gnieźnie patrzeć jak na wydarzenie o randze europejskiej, przekraczające znaczeniem granice nowo powstałych państw Europy Środkowej. I słuszność tak postawionej tezy udowodnił, co podkreślił niemiecki historyk Otfried Krafft w recenzji monografii prof. Michałowskiego, której angielski przekład pt. *The Gniezno Summit. The Religious Premises of the Founding of the Archbishopric of Gniezno* – dofi-

nansowany przez FNP – ukazał się w 2016 roku w wydawnictwie naukowym Brill w tłumaczeniu Anny Kijak. Recenzent zaznaczył wręcz, że nauka zachodnia powinna ustosunkować się do wyводу polskiego historyka na temat ogólnoeuropejskiego znaczenia zjazdu gnieźnieńskiego.

Tak sformułowane zalecenie stanie się zrozumiałe, jeśli zjazd z roku 1000, mimo że jest wydarzeniem jednostkowym, potraktuje się jak soczewkę skupiającą najważniejsze osoby i problemy epoki. Jeśli chodzi o postaci, jest taką m.in. cesarz Otton III, który pojawia się w Gnieźnie jako dwudziestoletni pielgrzym nawiedzający relikwie św. Wojciecha zamordowanego trzy lata wcześniej podczas prowadzenia misji ewangelizacyjnej na ziemiach Prusów. Starannie wykształcony władca (znał łacinę, uczył się m.in. filozofii, teologii i prawa), nazywany przez następne pokolenia *mirabilia mundi* – cud świata, przybywa do grobu męczennika jako bosonogi asceta. Podczas pielgrzymki przyjmuje tytuł: *Servus Iesu Christi* – Sługa Jezusa Chrystusa. Przedstawia się więc jak św. Paweł Apostoł, który takim właśnie zwrotem rozpoczął list do chrześcijan w Rzymie, i nie jest to jedynie chwyt retoryczny pobożnego młodzieńca.

Wyobraźnię władcy rządzi idea odnowienia Cesarstwa Rzymskiego. Po zdetronizowaniu

”
Wydarzenia w Gnieźnie nie byłyby możliwe, gdyby spotkanie z roku 1000 nie zostało zakorzenione w głębokich procesach duchowych zachodzących wówczas na całym kontynencie.

cesarza Romulusa Augustulusa w 476 roku na Zachodzie formalnie istniało ono wciąż, uosobione przez cesarza wschodniorzymskiego (w 800 roku odnowił je Karol Wielki). Zafascynowany antykiem (a właściwie swoim jego wyobrażeniem) Otton III, obrawszy za dewizę polityczną *Renovatio Imperii Romanorum*, uważał – jak jemu współcześni – że zadaniem władzy politycznej jest doprowadzenie poddanych do zbawienia, a Cesarstwo Rzymskie powstało z zamysłu Bożego, by to zbawienie mogło się dokonać. Inaczej jednak niż pozostali – co wykazuje prof. Michałowski – Otton III w koncepcji politycznej silniej podkreślał rolę religijną cesarstwa. W jego przekonaniu sednem odnowy cesarstwa miała być odnowa Kościoła, rozszerzanego dzięki sys-

tematycznie rozbudowywanej strukturze i kolejnym fundacjom, w tym nowych siedzib biskupich. Tak robił św. Paweł Apostoł, zakładając gminy chrześcijańskie.

Otton III przybywa więc do grobu zamordowanego przez pogan świętego biskupa i swojego przyjaciela. Odwiedza kraj, który przyjął chrześcijaństwo niewiele ponad trzy dekady wcześniej, z wyraźnym zamiarem utworzenia w miejscu, gdzie książę Bolesław złożył szczątki zamordowanego, arcybiskupstwa. Realizuje to, twórczo

interpretując obowiązującą tradycję Kościołów apostoelskich, która wymagała, by znaczące w strukturze kościelnej siedziby pasterzy były założone przez apostołów lub ich uczniów. Cesarz – inaczej niż to uczyniono np. z arcybiskupstwem Paryża czy Trewiru, gdzie zmieniono życiorysy św. Dionizego i św. Euchariusza tak, by pierwszy mógł zostać uczniem św. Pawła z Tarsu, a drugiego św. Piotr mógł wysłać do ewangelizowania Kraju Mozeli – nie zamierza przepisywać historii. Kreuje na apostoła św. Wojciecha – ewangelizatora pogan. To duchowy fundament, na którym Otton III ustanawia arcybiskupstwo w Gnieźnie.

Prof. Michałowski zadał w monografii pytanie o podstawy ideowe, jakie musiał posiadać we wczesnym średniowieczu nowo tworzony ośrodek kościelny, żeby otrzymać rangę arcybiskupstwa. Bez poznania tej kwestii decyzja Ottona III wydaje się nielogiczna. Uniezależnia przecież młode państwo polskie od metropolii niemieckich. Dlatego właśnie prof. Fried we wspomnianej publikacji z 1989 roku twierdził, że była przypadkowa, a Otton III zapewne zamierzał utworzyć arcybiskupstwo w Pradze, stolicy kraju ochrzczonego 80 lat przed Polską, wyniesionego do godności siedziby biskupa w 973 roku, ale wciąż bez przedrostka „arcy” (biskupstwo pra-

skie stanie się metropolią ostatecznie dopiero w XIV wieku).

Polski historyk obalił to twierdzenie, rekonstruując duchowe przesłanki cesarskiej decyzji i pokazując jej wyraźnie określone cele polityczne. Otton III zrywa ze zdroworozsądkową polityką niemiecką, bo dostrzega jej wynikającą z doraźności nieskuteczność. Polityka ta opierała się na założeniu, że pozwalając na utworzenie arcybiskupstwa w Polsce czy na Węgrzech (powstanie w 1001 roku w Ostrzyhomiu), traci się jeden z instrumentów ich kontroli. Władca wyciąga wnioski z dotychczasowych niepowodzeń, proponuje politykę, która ma zapewnić cesarstwu kontrolę nad Europą Wschodnią przez ułożenie stosunków z nowo powstałymi państwami drogą zawieranych z nimi sojuszy. Chrobry otrzymuje więc podczas zjazdu w Gnieźnie specjalnie dla niego utworzony wysoki urząd współpracownika cesarstwa, być może także obietnicę koronacji, a przede wszystkim stolicę arcybiskupią zbudowaną na mocnej ideowej podstawie, której nikt nie podważył mimo śmierci Ottona III zaledwie dwa lata po zjeździe.

Wydarzenia w Gnieźnie nie byłyby możliwe, gdyby – jak prof. Michałowski udowadnia w monograficznym wywodzie – spotkanie z roku 1000

nie zostało zakorzenione w głębokich procesach duchowych zachodzących wówczas na całym kontynencie. Zwrócili na to uwagę m.in. recenzenci książki w Niemczech.

„Ze wszech miar słusznie przetłumaczono na język zachodni tę inspirującą i szeroko zakrojoną książkę” – ocenił publikację prof. Michałowskiego wspomniany już Otfried Krafft w recenzji, która ukazała się w 2018 roku na łamach *Zeitschrift für Ostmitteleuropa-Forschung*. „Zjazd gnieźnieński był ostatecznie wydarzeniem o randze europejskiej i dyskusję naukową powinno się prowadzić na tej płaszczyźnie. Michałowski wiele w tym zakresie dokonał, co dzięki angielskiemu przekładowi szersze kręgi badaczy będą mogły docenić”.

W podobnym duchu wypowiedział się amerykański recenzent Robert E. Alvis, który zauważył w *Slavic Review*, że książka Michałowskiego z racji „bogactwa i różnorodności wykorzystanych źródeł” nie jest jedynie monografią wydarzenia istotnego dla jednego z krajów Europy Wschodniej. Porusza bowiem szereg tematów ważnych dla całej Europy tamtego czasu, nie unikając zagadnień spornych. Publikacja, w której istotnymi wątkami są znaczenie św. Wojciecha jako apostoła oraz

kult jego osoby, pokazuje też wpływ związków biskupa z Ottonem III na „program polityczny o wielowątkowej treści”, jakim w istocie było *Renovatio Imperii Romanorum*. Tę właśnie kwestię

podkreśliła niemiecka historyczka Maike Sach, pisząc w *Jahrbücher für Geschichte Osteuropas*, że rozprawa prof. Michałowskiego ma znaczenie dla historii powszechnej.



Czego dowiemy się od małży?

Patrycja Dołowy



**Na czym polega skuteczność
metod diagnostycznych
stosunku stężeń związków
z grupy WWA? Jakie są
ich ograniczenia? Które
podejście najskuteczniej
pozwoli zidentyfikować
źródła emisji?**

Prof. Jacek Namieśnik, laureat subsydium profesorskiego MISTRZ FNP i jego ówczesny doktorant, Marek Tobiszewski, dziś profesor w Katedrze Chemii Analitycznej Wydziału Chemicznego Politechniki Gdańskiej, postanowili przyjrzeć się tym zagadnieniom w 2012 roku, czego efektem była doskonała praca przeglądowa “PAH Diagnostic Ratios for the Identification of Pollution Emission Sources” opublikowana w *Environmental Pollution*. Praca, oparta na rzetelnym, krytycznym przeglądzie literatury, nie miała elementu doświadczalnego. Jej przyjęcie przez środowisko naukowe (do tej pory ma ponad 1200 cytowań) pokazuje, jak ważny jest to przegląd. Wielu autorów odnosi się do tej publikacji, gdyż temat związków z grupy Wielopierścieniowych węglowodanów aromatycznych (WWA) wciąż wzbudza na świecie duże zainteresowanie. Badacze, którzy charakteryzują stan środowiska w odniesieniu do tych związków i raportują ich stężenia, odwołują się do pracy Namieśnika i Tobiszewskiego, próbując na jej podstawie spekulować czy wnioskować na temat możliwych źródeł emisji.

Związki z grupy WWA to wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne należące do grupy związków chemicznych, które wykazują właściwości toksyczne, mutagenne, część z nich

ma udowodnione właściwości rakotwórcze lub jest o nie podejrzewana. W dodatku ulegają bioakumulacji. Stanowią więc poważny problem środowiskowy. Ekspozycja na związki z grupy WWA obecne w powietrzu atmosferycznym może powodować stany zapalne układu oddechowego. Często przy raportowaniu stanu powietrza atmosferycznego mówi się o benzo[a]pirenie, który jest zawieszony w pyłach.

Związki te mogą być emitowane do środowiska podczas wielu procesów, takich jak spalanie produktów ropopochodnych, drewna, węgla lub biomasy. Obecne są również w ropie naftowej oraz innych paliwach i mogą dostawać się do środowiska podczas rozlewów tych paliw. Znajdują się też w dymie tytoniowym oraz powstają podczas procesu obróbki termicznej żywności poprzez grillowanie. Co ważne, związki z grupy WWA nigdy nie są emitowane pojedynczo, a jako mieszanina wielu związków z tej grupy. Często istnieje potrzeba stwierdzenia, z jakiego źródła zostały one wyemitowane. Uzyskanie informacji o tych źródłach jest istotne, by móc ocenić ryzyko, przeciwdziałać mu lub podjąć działania zapobiegawcze, ewentualnie naprawcze.

Jak pokazali autorzy artykułu, profil wyemitowanej mieszaniny związków WWA jest różny

i charakterystyczny dla poszczególnych źródeł emisji. To było pierwsze podejście analityczne. Zidentyfikowano kilka charakterystycznych profili dla spalania różnych rodzajów węgla i różnych paliw płynnych, które można było badać. Niestety, zastosowanie tego narzędzia okazało się problematyczne, gdyż profile ulegają zmianom w czasie. Dzieje się tak wskutek różnic w intensywności procesów losu środowiskowego, czyli tego, co z danymi związkami dzieje się w środowisku pod wpływem różnych czynników w czasie. Po wyemitowaniu do środowiska lżejsze związki odparowują z gleby, wody, cząstek zawieszonych w powietrzu atmosferycznym czy zawiesinie obecnej w wodzie. Dlatego zastosowanie profilu związków z grupy WWA w celu identyfikacji źródła ich emisji może być skuteczne jedynie w krótkim czasie od momentu emisji. Najczęściej jest to informacja niewystarczająca.

Opisywane w publikacji Namieśnika i Tobiszewskiego zastosowanie wartości diagnostycznych stosunków stężeń związków z grupy WWA jest innym podejściem, gdyż pozwala na znaczne rozszerzenie zakresu czasowego. Polega ono na

zastosowaniu par izomerów (związków o tej samej masie molowej i wzorze sumarycznym, ale różnicach w budowie strukturalnej) z grupy WWA. W takim podejściu nie bada się stężeń wszystkich obecnych związków, tylko pary izomerów. Dzięki tej metodzie można stwierdzić, z jakich źródeł zostały wyemitowane związki z grupy WWA, bo w zależności od źródła emisji (rozlewu paliw płynnych i innych produktów ropopochodnych, spalania produktów ropopochodnych w silnikach pojazdów mechanicznych, spalania węgla, drewna lub biomasy) będą dawały inny profil – charakterystyczny „odcisk palca” oparty na stosunku dwóch stężeń izomerów. Jest to możliwe, gdyż za podobieństwem chemicznym idzie podobieństwo przemian środowiskowych. Związki te w podobny sposób ulegają procesom fotodegradacji, biodegradacji i przemianom międzyfazowym – odparowują, kondensują, itp. Dzięki temu ich porównanie daje duże możliwości diagnostyczne.

Najczęściej stosowanymi w tym celu parami izomerów związków z grupy WWA są antracen i fenantren (masa molowa 178 g), fluoranten i piren (202 g), benzo[a]antracen i chryzen (228 g) oraz benzo[g,h,i]perylen i indeno[1,2,3-c,d]piren (276 g).

Po wyemitowaniu do środowiska związki z grupy WWA stają się wszędobylskie, zatem ich

wartości diagnostyczne mogą zostać wykorzystane do określenia pochodzenia tych związków w próbkach różnych składowych środowiska. W pracy w *Environmental Pollution* Namieśnik i Tobiszewski podali kilka przykładów zastosowania metody do próbek przyrody nieożywionej – powietrza atmosferycznego (zarówno fazy gazowej, jak i pyłu zawieszonego), wody, materii zawieszanej w wodzie, gleby, osadów dennych. Analiza próbek osadów i interpretacja przy pomocy wartości diagnostycznych pozwala na określenie, czy związki z grupy WWA zostały uwolnione do środowiska wodnego wraz z rozlewem ropy lub produktu ropopochodnego, czy zostały wyemitowane podczas procesów spalania paliw płynnych lub stałych. Analiza rdzeni osadów dennych umożliwia określenie dominujących źródeł emisji związków z grupy podczas tworzenia się kolejnych warstw osadu dennego. Tego typu analiza dostarcza zatem informacji retrospektywnej na temat stanu środowiska i aktywności źródeł emisji.

Metoda diagnostyczna może być też wykorzystana w przypadku biomonitorów, czyli organizmów dostarczających informacji na temat stanu środowiska. Pierwszym opisanym przykładem są igły drzew iglastych, zwłaszcza sosen. Stanowią one świetne tzw. próbki pa-

sywne. Przez to, że igła sosny powleczone jest w sposób naturalny hydrofobową warstwą woskową, również hydrofobowe związki grupy WWA łatwo się w niej akumulują. Sosna w warstwie woskowej akumuluje też inne związki lipofilowe znajdujące się w powietrzu atmosferycznym. Zebranie i analiza igieł sosnowych może więc dostarczać ważnych informacji na temat stanu środowiska. Z perspektywy funkcji czasu uzyskana w ten sposób informacja o źródłach emisji jest inna niż w przypadku próbek powietrza atmosferycznego. Ta druga dostarcza informacji na temat jakości w momencie ich pobierania, natomiast analiza próbek igieł informuje o tym, jak powietrze atmosferyczne oddziaływało na igły od momentu ich pojawienia się na drzewie do ich pobrania i analizy. Przy średnio trzyletnim okresie utrzymywania się igieł na sośnie daje to już pewien obraz. W zależności od pożądanego okresu badania zbiera się igły z różnych partii gałęzi.

Drugi przykład biomonitora to małże, które bytują w osadach dennych. Biokumulują one związki pojawiające się w pobliżu strefy przydennej w tkankach mięśniowych i tłuszczowych. Proces bioakumulacji powoduje, że stężenia tych związków są wyższe niż w środowisku

”
Po wyemitowaniu do środowiska związki z grupy WWA stają się wszędobylskie, zatem ich wartości diagnostyczne mogą zostać wykorzystane do określenia pochodzenia tych związków w próbkach różnych składowych środowiska.

i łatwiej jest je oznaczać, pracując na wyższych poziomach stężeń. W wyniku analizy małży możemy otrzymać informację na temat stanu środowiska.

Autorzy artykułu przedyskutowali osiągnięcia badawcze w zakresie stosowania wartości diagnostycznych stosunku stężeń związków z grupy WWA. Przedstawili zarówno prace, które w sposób poprawny korzystały z tego narzędzia, jak i takie, które korzystały z niego wbrew jego ograniczeniom.

Zarówno dla Jacka Namieśnika, jak i dla Marka Tobiszewskiego publikacja miała duże znaczenie. Profesor był już dojrzałym naukowcem, kierował sporym zespołem naukowym i zajmował się wieloma aspektami analityki chemicznej z zakresu analityki środowiska, ale i żywności oraz produktów przemysłowych. W ostatnich latach poza działalnością naukową zajął się też zarządzaniem uczelnią – był najpierw dziekanem Wydziału Chemii, a potem rektorem Politechniki Gdańskiej. Uważał tę rolę za ważną. Zmarł przed końcem kadencji w 2019 roku. Tobiszewski w momencie publikacji był młodym doktorantem. Zajmował się chemią środowiska. Jego ścieżka zawodowa ewoluowała potem w stronę tzw. zielonej chemii. Obecnie nauko-

wiec zajmuje się analizami i oceną „zieloności” różnych procesów oraz materiałów chemicznych, więc wiedza z chemii środowiska bardzo mu się przydaje. Zielona chemia to licząca już ponad 20 lat koncepcja, która jest odpowiedzią na negatywne postrzeganie chemii przez społeczeństwo. Wszyscy z jednej strony korzystają z jej zdobyczy, z drugiej – wyrażają się o niej z obawą. Koncepcja zielonej chemii zakłada, że procesy i produkty chemiczne powinny być bezpieczne, poczynając od projektu, poprzez zastosowanie, aż po utylizację. Etap projektu ma przewidzieć, w jaki sposób materiał czy proces będzie użytkowany i jak zostanie zagospodarowany po wykorzystaniu. To bardzo dynamicznie rozwijająca się gałąź chemii, tworząca wiele działów wewnątrz siebie. Marek Tobiszewski zajmuje się jednym z nich – oceną uciążliwości środowiskowej rozpuszczalników chemicznych. Pracuje też nad oceną procesów analitycznych, czyli bada, w jaki sposób podczas oznaczania zanieczyszczeń środowiskowych analityk wpływa na środowisko.

Tobiszewski, M., Namieśnik, J. (2012). PAH Diagnostic Ratios for the Identification of Pollution Emission Sources. *Environmental Pollution*, 162, 110–119.



Nic oczywistego

Anna Mateja



**Dlaczego w opowieściach
biblijnych nie jest istotna
treść, ale ich autorzy
i czytelnicy? Co daje nauce
konsekwentna obrona
hipotez niepopularnych
albo kontrowersyjnych?**

Dr hab. Łukasz Niesiołowski-Spanò – historyk starożytności z Wydziału Historii Uniwersytetu Warszawskiego (od 2020 roku dziekan tego Wydziału), którego publikacje dotyczą m.in. historii starożytnej Palestyny i dziejów biblijnego Izraela – w badaniach stawia na konkret. Nie jest to oczywisty wybór w przypadku autora prac dotyczących treści zawartych w księgach *Biblii*. Tymczasem, jak twierdzi polski starożytnik, dokonanie liczących się w biblistyce ustaleń staje się możliwe przede wszystkim za sprawą wykorzystania narzędzi historycznych, a więc takich, które prowadzą do oddzielenia faktów od mitów. Nie są one powszechnie stosowane w tej dziedzinie, a ustalenia poczynione za ich sprawą przyjmuje się z rezerwą.

W warsztacie historyka kluczowe jest krytyczne nastawienie do tekstu. Jeżeli mówimy o *Biblii*, oznacza to przyjęcie założenia, że większość zawartych w niej opowieści – zwłaszcza starotestamentalnych, których prawdziwości nie sposób potwierdzić np. badaniami archeologicznymi – została zmyślona. U wielu biblistów i teologów – szczególnie jeśli należą do osób religijnych i uważają, że *Biblia* pochodzi od autorów natchnionych, więc jest prawdziwa w każdym fragmencie, a za główny cel dociekań obierają ustalenie treści przekazu dla jej odbiorców – takie

twierdzenie wywołuje popłoch. U historyków – wręcz przeciwnie. Ich zdaniem np. opowieść o Mojżeszu, który – jak chcą autorzy *Pięć ksiąg* – wracał z Izraelitami z Egiptu do ojczyzny przez 40 lat, krążąc po pustyni, jest dobrze opowiedziana, ale fikcyjna.

Rzeczywistość narracji, czyli treść opowieści, dla nauki nie ma jednak większego znaczenia. Istotne jest ustalenie czasu powstania tekstu, opisanie świata autora i odbiorców oraz powodów stworzenia dzieła. Wracając do peregrynacji Mojżesza: szlak jego wędrówki z dwunastoma pokoleniami Izraela nie jest tak ważny jak zrekonstruowanie drogi intelektualnej hipotetycznego autora, który dla osiągnięcia określonego celu opisał Mojżesza i jego losy właśnie w taki sposób. Bo o ile opowieści biblijne mogą być zmyślone, o tyle autor tekstu i jego odbiorcy istnieli naprawdę, więc warci są historycznych dociekań. I to jest konkret, na którym zależy historykom – pozbawiony ładunku fantazji czy znaczeń religijnych. Rezerwę, z jaką niektórzy bibliści przyjmują wyniki badań historycznych starożytników, widać w dwóch książkach Niesiołowskiego-Spanò przełożonych na język angielski przy wsparciu Fundacji na rzecz Nauki Polskiej w ramach programu TRANSLACJE.

”

Jak twierdzi polski starożytnik, dokonanie liczących się w biblistyce ustaleń staje się możliwe przede wszystkim za sprawą wykorzystania narzędzi historycznych, a więc takich, które prowadzą do oddzielenia faktów od mitów.

”
Drugą pozycję [...] – z uznaniem przyjętą przez wielu historyków starożytnego Bliskiego Wschodu i archeologów – po jej przełożeniu na język angielski określono wręcz jako *game changer*.

Monografia *Mityczne początki miejsc świętych w Starym Testamencie*, wydana w 2003 roku, ukazała się w tłumaczeniu Jacka Laskowskiego jako *The Origin Myths and Holy Places in the Old Testament. A Study of Aetiological Narratives* dwukrotnie: w 2011 roku w oficynie Equinox Publishing i w 2016 roku w wydawnictwie Routledge. Doczekała się czterech recenzji i not w czasopismach ważnych dla poruszanej w książce tematyki, m.in. w *Journal of Hebrew Scripture* i *Zeitschrift für Alttestamentliche Wissenschaft*.

Drugą pozycję, pt. *Dziedzictwo Goliata. Filistyni i Hebrajczycy w czasach biblijnych* (ukazała się w 2012 roku w serii „Monografie” FNP) – z uznaniem przyjętą przez wielu historyków starożytnego Bliskiego Wschodu i archeologów – po jej przełożeniu na język angielski określono wręcz jako *game changer*. Książkę w tłumaczeniu Marii Kantor, jako *Goliath's Legacy. Philistines and Hebrews in Biblical Times*, wydała w 2016 roku oficyna Harrassowitz Verlag specjalizująca się w publikacjach starożytniczych i orientalistycznych. Siedem recenzji i not ukazało się chociażby na łamach *Revue Biblique* i *Zeitschrift für Religionswissenschaft*. Autorem opinii o książce, która wagą zawartych w niej ustaleń ma zmieniać reguły

gry w swojej dziedzinie, jest James E. West, wykładowca w Ming Hua School of Theology w Hong Kongu. W internetowej recenzji West uznał monografię za osiągnięcie naukowe na tyle istotne, że trudne do zignorowania w dalszym zgłębianiu dziejów starożytnego Izraela. Z kolei William P. Brown, biblista i teolog z Columbia Theological Seminary w stanie Georgia, przyznał, że to wielkie szczęście, iż „wspaniałą pracę Spanò” przełożono na język angielski. Bez tego monografia, której tezy autor postawił, opierając się na odkryciach archeologicznych, etymologicznych i biblijnych, nie miałaby szans dotrzeć do czytelników zainteresowanych skomplikowanymi i nieoczywistymi relacjami Hebrajczyków z Filistynami.

Wyobraźnię odbiorców tej monografii pobudzała oryginalna metoda opisywania kontaktów między ludami starożytnymi i porównywania stopni ich rozwoju. Autor nie stronił od narzędzi socjologicznych. Dzięki temu udało się np. wyjaśnić powody, dla których Hebrajczycy – inaczej niż można przeczytać m.in. w *Pierwszej Księdze Samuela* – nie górowali cywilizacyjnie nad Filistynami. Wręcz przeciwnie: czuli się gorsi od zamożnego sąsiada, którego ludność żyła przeważnie w miastach, posiadała monopol na produkcję żelaza i prowadziła intratny handel

morski, a jej władza dysponowała rydwanami i ciężkozbrojną piechotą. Pozostałości ich kultury, powstałej między XII a X wiekiem p.n.e. na obszarze ciągnącym się od Tel Awiwu do Gazy, są tak imponujące, że archeolodzy mają problem z wyłuskaniem z tego dziedzictwa skromnych artefaktów hebrajskiej kultury materialnej. Niewątpliwie Hebrajczycy wiele się nauczyli od bardziej rozwiniętego sąsiada, a badania biblijnej onomastyki i terminologii przekonują, że także w języku hebrajskim istnieją zapożyczenia z filistyńskiego.

Około V wieku p.n.e., kiedy Żydzi po powrocie z niewoli babilońskiej zaczęli budować poczucie tożsamości etnicznej, współpracę zastąpiła wrogość. Fundamentem tej tożsamości stały się *Tora*, *Psalmy* i *Księgi Prorockie*, gdzie spisano mityczną przeszłość Izraelitów, rzekomo otoczonych przez zagrażające im plemiona sąsiedzkie, często przedstawiane jako barbarzyńskie. W takich warunkach powstała np. opowieść o rudowłosym Dawidzie, strzałem z procy zabijającym filistyńskiego olbrzyma Goliata, który szedł na niego w zbroi z „mieczem, dzidą i zakrzywionym nożem”. Wedle historyków rzekomy król miał być lokalnym watażką pod filistyńskim nadzorem, a słowo *dawid* jest jedynie nazwą dowódcy wojskowego.

Dr hab. Niesiołowski-Spanò podał również nowe argumenty na potwierdzenie tezy, że lewici pełniący służbę w świątyni jerozolimskiej, spośród których wybierano kapłanów, mogą wywodzić się z Ludów Morza przybyłych z Grecji na Bliski Wschód w XII wieku p.n.e. To oni mieliby przenieść dziedzictwo kultury mykeńskiej do świata, z jakiego wyszli późniejsi autorzy *Biblii hebrajskiej*. Hipoteza, mimo że dotyczy tożsamości wirtualnej Żydów, którzy żyli kilkadziesiąt wieków temu, nie tylko dla religijnych przedstawicieli tej wspólnoty okazała się szokująca. Jeden z rodów Izraela z racji funkcji, jaka została mu powierzona w *Torze*, wydawał się *par excellence* żydowski, jednak korzeniami sięga on greckich wysp!

Wyjątkowość ustaleń zawartych na ponad pięciuset stronach monografii *Dziedzictwo Goliata* przyczyniła się do tego, że wyłoniono ją do recenzji z dziesiątek publikacji ukazujących się corocznie w tej dziedzinie. Autor książki jest jednak wstrzemięźliwy w ocenie jej znaczenia: wiele tez, mimo że są skrupulatnie uzasadnione, nie tyle wywołało dyskusję, ile zaszokowało. Postawione dzięki użyciu narzędzi historycznych, więc dalekie od biblijnego *mainstreamu*, wciąż uchodzą za kontrowersyjne.

Działania prekursorskie nigdy nie są bezkosztowe, czego autor monografii doświadczył m.in.

po przygotowaniu książki *Mityczne początki miejsc świętych w Starym Testamencie*. Jej ukazanie się przeszło właściwie niezauważone. Naukowy czyściec skończył się mniej więcej po dekadzie, kiedy odwołania do książki pojawiły się w przypisach i bibliografiach innych prac, natomiast badania koleżanek i kolegów po fachu Niesiołowskiego -Spanò zaczęły podążać w kierunku obranym przez niego 15 lat wcześniej. Rozumowanie historyków – opierające się m.in. na krytycznej analizie tekstu biblijnego, którą jako pierwszy zaproponował prof. Giovanni Garbini z Uniwersytetu „La Sapienza” w Rzymie – okazało się, nie pierwszy zresztą raz, właściwe, ale w bada-

niach nad *Biblią* wciąż nie jest uznawane za coś oczywistego. Z tego powodu hipoteza o lewitach pochodzących z Grecji, którą autor *Dziedzictwa Goliata* uważa za jedno z ważniejszych swoich ustaleń, choć spójna zarówno z historycznego, jak i językoznawczego punktu widzenia, nie jest dyskutowana w takim stopniu, jak na to zasługuje. Jej czas najpewniej dopiero nadejdzie, jak w przypadku wielu hipotez – nie tylko na temat dziejów starożytnego Bliskiego Wschodu – które choć w momencie narodzin uznawano za nieprawdopodobne, kolejne badania uwiarygodniły na tyle, że stały się przyjmowaną bez namysłu oczywistością.



Przekraczając granice dyscyplin

Patrycja Dołowy



**Czy poszukiwanie nowych
narzędzi i perspektyw
może być podstawą
metody badawczej?
Jakie korzyści naukowe
i społeczne przynosi
łączenie aktywności
akademickiej z aktywizmem
w ramach humanistyki
zaangażowanej?**

Justyna Olko ukończyła Międzywydziałowe Interdyscyplinarne Studia Humanistyczne na Uniwersytecie Warszawskim. Pierwsze lata pracy naukowej poświęciła badaniu kultury Majów w Gwatemali oraz Azteków (Nahua) w środkowym Meksyku. Uświadomiła sobie wówczas, że by odpowiedzieć na nurtujące ją pytania badawcze, musi sięgnąć po narzędzia wykraczające poza jedną dyscyplinę. Już po doktoracie z pomocą przyszedł jej grant z programu FOCUS FNP. To on wyznaczył ramy jej dalszego rozwoju naukowego.

Jeszcze prowadząc badania w Gwatemali i Meksyku, prof. Olko zdała sobie sprawę z tego, że konwencje przyjęte w ramach dyscypliny bardzo mocno ograniczały jej badania. Powodowały, że umykał bardziej złożony i szerszy pod względem chronologicznym i terytorialnym obraz, uwzględniający istotne zagadnienia, których analiza mogłaby wiele wnieść do rekonstrukcji i lepszego zrozumienia procesów historycznych, także w bardziej uniwersalnym kontekście. Badania nad antropologią stroju i ikonografią władzy elit Nahua przed konkwistą i po niej, zakończone doktoratem, obudziły w naukowczyni zainteresowanie wielowiekową interakcją kultur indiańskich i europejskiej, a także doprowadziły ją do wniosku, że w studiach

nad cywilizacjami dawnej Ameryki powszechnie respektowany podział tematyczny „przed i po konkwisie” jest cezurą sztuczną i ograniczającą możliwości badawcze.

Dzięki grantowi FNP FOCUS Justyna Olko dostała szansę, by rozbudować współpracę międzynarodową i stworzyć pierwszy zespół badawczy. Interesowały ją mechanizmy i skutki kontaktu międzykulturowego, w tym językowego, w Nowej Hiszpanii. Wychodząc od studiów skupionych na epoce kolonialnej, zdała sobie sprawę, że pełniejsze zrozumienie procesu zmiany językowo-kulturowej będzie możliwe tylko przy uwzględnieniu współczesnych efektów wielowiekowego procesu historycznego. W ramach projektu zaczęła budować pierwsze formy współpracy z rdzennymi użytkownikami języka *nahuatl* i rdzennymi badaczami. Wyniki tych badań stworzyły solidne podstawy do napisania wniosku i uzyskania przez nią w 2012 roku pierwszego grantu ERC na badania humanistyczne w Polsce. W tym i w kolejnych badaniach zespołowych Justyna Olko świadomie przekraczała granice między historią, archeologią, antropologią, filologią, lingwistyką, a w ostatnim czasie także i psychologią społeczną, czerpiąc z ich teoretycznego i metodologicznego dorobku. Najważniejsze w pracy naukowej jest dla niej rozwiązanie złożo-

”

Olko uważa, że dobry projekt badawczy powinien nie tylko przynieść odpowiedzi na pytania, które były jego punktem wyjścia, ale też generować zupełnie nowe pytania i pomysły, wyznaczające dalsze kierunki poszukiwań.

138

nych problemów przy wykorzystaniu wzajemnie wzbogacających się i komplementarnych metod wypracowanych przez różne dyscypliny oraz poszukiwanie adekwatnych narzędzi i perspektyw pozwalających na mierzenie się z powstającymi w trakcie pracy pytaniami badawczymi. Olko uważa, że dobry projekt badawczy powinien nie tylko przynieść odpowiedzi na pytania, które były jego punktem wyjścia, ale też generować zupełnie nowe pytania i pomysły, wyznaczające dalsze kierunki poszukiwań.

Jednym z najważniejszych rezultatów projektu ERC było stworzenie korpusu danych historycznych i współczesnych oraz ich klasyfikacji. Objęły one transkrypcje i tłumaczenia dokumentów źródłowych, analizę morfologiczną, leksykalną i semantyczną oraz klasyfikację zjawisk kontaktu językowego. Analiza tego korpusu pozwoliła na rekonstrukcję mechanizmów, trajektorii i rezultatów pięciowiekowego kontaktu między językiem *nahuatl* a językiem hiszpańskim z uwzględnieniem kontekstu historycznego oraz przemian społecznych, kulturowych, politycznych i ekonomicznych w różnych regionach Meksyku, zwłaszcza na obszarach, gdzie język rdzenny przetrwał do dziś mimo długotrwałej hispanizacji presji asymilacyjnej.

W trakcie tych badań Justyna Olko uświadomiła sobie, że od lat studiuje język i kulturę potomków Azteków, które dzięki wielowiekowemu oporowi przeciw kolonizacji i różnym formom opresji przetrwały po dziś dzień, jednak mogą przestać istnieć w ciągu obecnego stulecia. By ocalały, potrzebne są istotne zmiany w kwestii polityki językowej i edukacyjnej, ale przede wszystkim postaw ludzi, tak członków społeczności, jak i szerszego społeczeństwa. W procesie tym również badacze mogą odegrać pewną rolę, posługując się zagrożonymi językami, promując je oraz pomagając lokalnym aktywistom w budowaniu pozytywnych praktyk i działaniach związanych z zachowaniem dziedzictwa językowo-kulturowego. Dlatego swoją pracę akademicką Olko świadomie łączy z działaniami pozaakademickimi w ramach humanistyki zaangażowanej, mając przekonanie, że zarówno wielodyscyplinarność, jak i przekraczanie murów akademii jest istotną szansą na rozwój nowatorskich badań humanistycznych oraz ich oddziaływania na społeczeństwo.

Wśród ważnych elementów innowacji w badaniach Polki nad kulturą Nahuatl należy wymienić wypracowanie partnerskich form współpracy między „zachodnimi” a rdzennymi badaczami oraz rozwój dekolonizacyjnych i rdzennych meto-

dologii badawczych. Zawiera się w tym chociażby całkowita rezygnacja ze stosowania (także na poziomie praktyki) pojęcia *informatora* na rzecz włączania rdzennych badaczy oraz członków lokalnych społeczności jako pełnoprawnych uczestników procesu badawczego i eksperckich członków zespołu badawczego. W przekonaniu Justyny Olko aktywizacja rdzennych użytkowników jest pod wieloma względami fundamentalna dla kulturowego przetrwania i autonomii epistemologicznej ich społeczności.

Doświadczenia zdobyte w ramach grantu ERC oraz kolejne potrzeby, które te badania ujawniły, doprowadziły Olko do uruchomienia projektu „Zaangażowana humanistyka w Europie” (ENGHUM) dzięki grantowi Komisji Europejskiej w ramach programu Twinning (Horyzont 2020) realizowanego wspólnie ze School of Oriental and African Studies Uniwersytetu Londyńskiego oraz Uniwersytetem w Leidzie. Celem ENGHUM było m.in. wypracowanie lepszych metod rewitalizacji języków zagrożonych wymarciem oraz dekolonizacyjnych modeli współpracy z lokalnymi społecznościami. Udało się włączyć w proces szkolenia i *networking* członków społeczności mniejszościowych z kilku kontynentów i wesprzeć liczne inicjatywy oddolne oraz stworzyć wraz z kilkoma instytucjami zagranicznymi

międzynarodowe Centrum Zaangażowanych Badań nad Ciągłością Kulturową na Uniwersytecie Warszawskim. Efektem projektu jest również napisany wspólnie przez badaczy oraz członków lokalnych społeczności kompleksowy i przystępny podręcznik do rewitalizacji języków zagrożonych wymarciem wydany w kwietniu 2021 roku w wolnym dostępie przez Cambridge University Press. To pierwsza tego typu publikacja przełamująca konwencjonalne bariery akademickie. W uznaniu za działalność zaangażowaną społecznie w listopadzie 2020 roku prof. Olko została nagrodzona w konkursie Falling Walls 2020 w kategorii nauk humanistycznych i społecznych za „burzenie murów między akademią i lokalnymi społecznościami na rzecz różnorodności językowej”.

Projekt ENGHUM zarysował nowe wyzwania badawcze, w tym pytania związane z korzyściami z zachowania lokalnych języków dla ich użytkowników i szerszego społeczeństwa. Wtedy zrodził się pomysł projektu „Językowe antidotum: żywotność językowa jako sposób budowy psychicznego dobrostanu, zdrowia i zrównoważonego rozwoju” napisany wspólnie z drem hab. Michałem Bilewiczem w ramach programu TEAM FNP. Został on rozszerzony o badania

”
Zarówno wiedzodyscyplinarność, jak i przekraczanie murów akademii jest istotną szansą na rozwój nowatorskich badań humanistycznych oraz ich oddziaływanie na społeczeństwo.

dotyczące sytuacji mniejszości etnicznych i migrantów w dobie pandemii. W badaniach biorą udział przedstawiciele mniejszości i migrantów w Polsce, a także Kalabrii oraz grupy rdzenne w Meksyku.

Badacze próbują odpowiedzieć na pytanie, czy zachowanie języków mniejszościowych wbrew naciskom asymilacyjnemu wpływa na zdrowie i dobrostan ich użytkowników oraz jakie są skutki dyskryminacji i stygmatyzacji, także w czasie pandemii. Połączenie badań socjolingwistycznych i antropologicznych nad postawami i praktykami językowymi z analizami z zakresu psychologii społecznej okazało się bardzo miarodajne. W ramach programu nawiązano również współpracę z zespołem badawczym prof. Grażyny Jasieńskiej z Collegium Medicum na Uniwersytecie Jagiellońskim, który zajmuje się zdrowiem publicznym, oraz z nowymi partnerami lokalnymi. Wyniki badań pokazały m.in. że osoby mówiące rdzennym językiem mniejszościowym i przeżywające pozytywne emocje związane z tym procesem mają wyższy poziom dobrostanu oraz lepiej radzą sobie ze skutkami traumy historycznej. Prace zespołu ujawniły też, że trwająca dyskryminacja etniczna, która jest często negowana i w Polsce, i w Meksyku, długofalowo wpływa negatywnie na zdrowie

i funkcjonowanie mniejszości. Pandemia nasiliła i uwypukliła niekorzystne procesy. Badacze byli w stanie pokazać, że stygmatyzacja związana z COVID-19, np. w przypadku Ślązaków czy Nahuja, znacząco wpływa na ich poziom lęku uogólnionego, ale w procesie tym pośredniczą uaktywnione doświadczenia traumy historycznej. W przypadku grup rdzennych w Meksyku wpływ na to zjawisko ma także podobieństwo pandemii z epidemiami, które zdziesiątkowały ludność w okresie kolonialnym. Badacze ustalili, że społeczności mniejszościowe zachowują się w czasie pandemii bardziej racjonalnie niż grupy większościowe – bardziej się chronią i wykazują mniejszą skłonność do wiary w teorie spiskowe związane z COVID-19. Efektem tych prac jest też wielojęzyczny „pakiet antystygmatyzacyjny” dotyczący mniejszości etnicznych w Polsce, napisany wspólnie z ich przedstawicielami i zawierający szereg praktycznych rekomendacji dla instytucji państwowych, edukacyjnych, samorządowych oraz organizacji lokalnych.

Projekt potrwa do wiosny 2022 roku, a wtedy przed Justyną Olko i członkami jej zespołu stanie kolejne wyzwanie: pięcioletni projekt “Multilingual Worlds – Neglected Histories. Uncovering Their Emergence, Continuity and Loss in Past and Present Societies”. Na jego realizację badaczka –

jako pierwsza w Polsce kobieta i przedstawicielka nauk humanistycznych – uzyskała drugi grant ERC, tym razem Consolidator. Celem badań realizowanych w partnerstwie z Instytutem Maxa Plancka w Lipsku oraz Uniwersytetem w Stellenbosch w RPA będzie dostarczenie nowej wiedzy na temat tego, jak powstawała, rozwijała się i była kontynuowana lokalna wielojęzyczność, a zarazem dlaczego w niektórych przypadkach uległa ona zanikowi. Na podstawie uzyskanych rezultatów naukowcy zrekonstruują przyczynowo-skutkowe modele oraz przebieg ewolucji historycznej i współczesnej wielojęzyczności na

wybranych obszarach czterech kontynentów: Europy, Ameryki, Afryki i Oceanii. W projekcie wykorzystane zostaną narzędzia z różnych dziedzin i dyscyplin: historii, lingwistyki, antropologii społecznej i kulturowej, ekonomii behawioralnej, modelowania matematycznego i mapowania GIS. Co ważne, zgodnie z wizją Justyny Olko i jej naukowych partnerów powstaną zalecenia i narzędzia do kształtowania polityk językowych, które będą w bardziej skuteczny sposób wspierać zachowanie różnorodności językowo-kulturowej oraz prawa językowe grup mniejszościowych.



Zmierzony Wszechświat

Patrycja Dołowy



**Jak udoskonalić metody
pomiaru odległości
kosmicznych, by pozwoliły
odpowiedzieć na kluczowe
pytania o Wszechświat?
Jak skalibrować metodę
obliczania rozmiaru
kątownego na podstawie
zależności jasność
powierzchniowa-kolor? Czy
dokładniejszy pomiar może
oznaczać koniec dzisiejszej
fizyki?**

Przed tymi pytaniami stanęli autorzy artykułu¹ „A Distance to the Large Magellanic Cloud That Is Precise to One Per Cent”, który w 2019 roku ukazał się w *Nature*. W porównaniu do wcześniejszej publikacji – “An Eclipsing-Binary Distance to the Large Magellanic Cloud Accurate to Two Per Cent” tego samego zespołu, również opublikowanej na łamach *Nature* (2013) – w tej nowej udało się udokładnić metodę i zmniejszyć błąd pomiaru do zaledwie 1%.

Zespół, który tego dokonał, został stworzony przez prof. Grzegorza Pietrzyńskiego z Centrum Astronomicznego im. Mikołaja Kopernika PAN po jego powrocie do Polski ze stażu podoktorskiego dzięki programowi FOCUS FNP. Kolejne granty pozwoliły nawiązać międzynarodową współpracę w ramach Projektu Araucaria, którego prof. Pietrzyński jest kierownikiem.

Od ponad 100 lat było wiadomo, że zaćmieniowe układy podwójne gwiazd orbitujących wokół wspólnego środka masy potencjalnie najlepiej

nadawały się do pomiaru odległości kosmicznych. Jednak co innego wiedzieć, a co innego umieć wykorzystać je do pomiarów, w dodatku na tyle precyzyjnych i prostych, by można było ich wyniki zastosować do wyznaczania odległości z dużą dokładnością.

Wszystko zaczęło się ponad 20 lat temu, gdy Grzegorz Pietrzyński wyjechał na staż podyktorski do Chile. To właśnie wtedy zaczął wyznaczać odległości do pobliskich galaktyk, które są doskonałymi laboratoriami kosmicznymi do testowania i porównywania różnych metod wyznaczania odległości oraz porównywania ich pod kątem jakości i dokładności. Najlepsze takie laboratorium stanowi Wielki Obłok Magellana, ponieważ znajduje się stosunkowo blisko naszej Drogi Mlecznej, charakteryzuje się też wielką różnorodnością obecnych w nim gwiazd. Najlepsze metody wyznaczania odległości do Wielkiego Obłoku Magellana, znane i stosowane w tamtym czasie, obarczone były błędem około 10%. Trudno wtedy było osiągnąć większą dokładność, używając metody układów zaćmieniowych, ponieważ brakowało odpowiednich obiektów.

Pierwszym krokiem do ulepszenia tej metody okazało się dokładne przeszukanie przepastnej bazy danych projektu OGLE (The Optical Gravitational Lensing Experiment) prowadzonego w Las

¹ W badaniach, które doprowadziły do publikacji, obok prof. Pietrzyńskiego, uczestniczyli wspierani przez FNP w różny sposób polscy astronomowie: Dariusz Graczyk, Bogumił Pilecki, Andrzej Udalski, Igor Soszyński, Szymon Kozłowski, Piotr Konorski, Ksenia Suchomska, Radosław Smolec, Marcin Kubiak, Michał K. Szymański, Radek Poleski, Łukasz Wyrzykowski, Krzysztof Ulaczyk, Paweł Pietrukowicz, Marek Górski, Paulina Karczmarek.

”
Precyzja w wyznaczeniu odległości jest podstawą wiedzy astrofizyków, a zwiększenie dokładności metod pozwala odkrywać rzeczy zupełnie nowe – poznawać odpowiedzi na zagadki Wszechświata.

Campanas Observatory w Chile od 1992 roku przez naukowców z Obserwatorium Astronomicznego Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem prof. Andrzeja Udalskiego, laureata Nagrody FNP z 2002 roku. Z ponad 30 mln gwiazd zespół Pietrzyńskiego wyselekcjonował początkowo zaledwie osiem (a do drugiej publikacji w 2019 roku łącznie 20) odpowiednich układów gwiazd podwójnych z Wielkiego Obłoku Magellana spełniających wyśrubowane kryteria.

Następny krok – wykonanie obserwacji fotometrycznych i spektroskopowych na największych teleskopach świata – był ogromnym wysiłkiem obserwacyjnym całego zespołu.

– Myślę, że na obserwacjach spędziliśmy w sumie ponad 200 nocy – to wszystko zajęło nam 20 lat – opowiada profesor Pietrzyński.

– To jest tak rozciągnięte w czasie, bo ogranicza nas fizyka układów podwójnych – dodaje dr Paulina Karczmarek, która w ramach projektu Araucaria pracuje obecnie w Departamento de Astronomia Universidad de Concepcion w Chile. – Mamy dwie gwiazdy, które orbitują wokół wspólnego środka masy i co jakiś czas się zaćmiewają. My musimy je zaobserwować w dokładnie określonych momentach. Czasami na

kolejne obserwacje czekamy pół roku, czasami rok, a rekord to około 1700 dni, czyli pięć lat.

Metoda układów zaćmieniowych pozwala zmierzyć najbardziej dokładną, bo geometryczną odległość do Wielkiego Obłoku Magellana. Geometryczną dlatego, że taka odległość wyznaczana jest za pomocą szkolnej geometrii trójkąta prostokątnego ze stosunku rozmiaru liniowego i kąтового gwiazdy. Jeśli wiemy, jakie są rozmiary liniowe i kątowe, dzielimy jedno przez drugie i dostajemy odległość natychmiast. To dlatego ta metoda jest tak prosta i dokładna.

Co więc zajęło naukowcom tyle lat od opracowania metody do jej udoskonalenia, by dawała ona wyniki z błędem w granicach zaledwie 1%? Z analizy układów zaćmieniowych badacze potrafią bardzo dokładnie wyznaczać rozmiary liniowe, natomiast rozmiary kątowe okazały się „wąskim gardłem” tej metody. Dlatego osobnym zadaniem było udoskonalenie wyznaczania rozmiarów kątowych z zależności pomiędzy jasnością powierzchniową a kolorem gwiazdy. Udało się to dzięki obserwacjom najbliższych nam gwiazd w Drodze Mlecznej metodami interferometrycznymi (wyznaczeniu rozmiarów kątowych przy pomocy kilku zestawionych teleskopów) oraz fotometrycznymi (wyznaczeniu barwy gwiazd dzięki obserwacjom w zakresie

światła widzialnego i podczerwonego). Udoskonalona kalibracja zależności jasność powierzchniowa–kolor pozwoliła wyznaczyć rozmiary katowe znacznie odleglejszych gwiazd w Wielkim Obłoku Magellana na podstawie już tylko ich barwy.

Precyzja w wyznaczaniu odległości jest podstawą wiedzy astrofizyków, a zwiększenie dokładności metod pozwala odkrywać rzeczy zupełnie nowe – poznawać odpowiedzi na zagadki Wszechświata. Do mierzenia odległości we Wszechświecie wykorzystywane są liczne metody. Jedne z nich sprawdzają się na bliskich odległościach (wewnątrz naszej Drogi Mlecznej), ale zawodzą na dalszych – w innych galaktykach – i na odwrót. Kiedy zakres stosowności jednej metody się kończy, wykorzystywana jest kolejna, a kiedy zakres tej kolejnej się kończy, używa się następnej. W ten sposób budujemy tzw. kosmiczną drabinę odległości, która rozciąga się od najbliższych nam gwiazd aż do najdalszych zakamarków Wszechświata. Każda metoda – jak każdy szczebel drabiny – pozwala sięgnąć dalej w wyznaczaniu kosmicznych odległości. Na szczycie drabiny jest stała Hubble’a – jedna liczba, która pozwala określić wiek, rozmiar oraz przyszły los Wszechświata. Stała Hubble’a to najważniejszy kosmiczny parametr, Święty Graal

astronomów. Im bardziej niepewna jest wartość stałej Hubble’a, tym bardziej niepewna jest nasza wiedza o Wszechświecie. Niepewność wyznaczenia stałej Hubble’a bierze swój początek na pierwszych szczeblach wspomnianej drabiny, ponieważ metody wyznaczania odległości zależą jedna od drugiej – błąd popełniony na niższym szczeblu będzie się propagował w górę drabiny odległości i wpływał na wyniki wyznaczeń odległości z każdej kolejnej metody.

– Można to porównać do zabawy w głuchy telefon – im mniej obciążony błędem będzie pierwszy przekaz, tym większa szansa na to, że informacja dotrze do końca zmieniona tylko w niewielkim stopniu – mówi dr Paulina Karczmarek.

Wyznaczenie odległości do Wielkiego Obłoku Magellana metodą zaćmieniowych układów podwójnych, właśnie ze względu na niewielki błąd (1%), stanowi pierwszy i solidny szczebel kosmicznej drabiny odległości. Dzięki niej udało się wyznaczyć stałą Hubble’a całkowicie empirycznie. Jednak wartość ta znacząco różni się od wartości stałej Hubble’a otrzymanej za pomocą innych metod na innych etapach ewolucji Wszechświata. Nasz model kosmologiczny

”
Każda metoda – jak każdy szczebel drabiny – pozwala sięgnąć dalej w wyznaczaniu kosmicznych odległości. Na szczycie drabiny jest stała Hubble’a – jedna liczba, która pozwala określić wiek, rozmiar oraz przyszły los Wszechświata.

nie jest w stanie wytłumaczyć tej rozbieżności, więc być może potrzebna będzie korekta współczesnej fizyki.

Pietrzyński, G. i in. (2013). An Eclipsing-Binary Distance to the Large Magellanic Cloud Accurate to Two Per Cent. *Nature*, 495, 76–79.



Wilcze geny

Patrycja Dołowy



**Jak przebiegał proces
udomowienia psa? Czy
porównując genomy
psów i wilków, możemy
wskazać, od której populacji
wilka wywodzi się pies?
Jaką rolę w ewolucji psa
odegrała hybrydyzacja? Czy
genomika może znaleźć
zastosowania w badaniach
ewolucji dzikich zwierząt?**

Drogę do odpowiedzi na te pytania otworzyła praca “Genome-Wide SNP and Haplotype Reveal a Rich History Underlying Dog Domestication” opublikowana w 2010 roku na łamach *Nature*. Dla jej współautorki dr Małgorzaty Pilot, laureatki programów FNP START (2007) i KO-LUMB (2007), wszystko zaczęło się od wyboru tematu doktoratu, który broniła w Muzeum i Instytucie Zoologii PAN. Temat wymyśliła sama. Dotyczył genetyki populacji wilków w Europie Środkowo-Wschodniej. Wtedy w Polsce nikt się tym zagadnieniem nie zajmował. Szukając współpracowników, doświadczonych osób, które mogłyby jej pomóc, poznała badaczy z Polski, specjalistów w dziedzinie ekologii ssaków drapieżnych – profesorów Bogumiłę i Włodzimierza Jędrzejewskich – jak również genetyków z różnych krajów zajmujących się zarówno wilkami, jak i psami (te zainteresowania badawcze często się ze sobą łączą). Do badań genetycznych wilków zwykle wykorzystuje się metodykę, która zostaje wcześniej opracowana dla psów, gdyż psy są jednym z gatunków modelowych w genetyce. W ten sposób dr Pilot poznała grupę badawczą ze Stanów zaangażowaną w pracę nad metodą genotypowania DNA psów w skali całego genomu. W tym czasie genom psa był już zsekwencjonowany jako jeden z pierwszych

genomów ssaków – jeszcze moźolną metodą Fredericka Sangera. Ta pionierska metoda, za którą jej autor otrzymał w 1980 roku Nagrodę Nobla, była bez porównania bardziej czasochłonna od stosowanych obecnie. Dziś zsekwencjonowanie całego genomu zajmuje kilka dni, wtedy trwało ponad rok. Był to więc duży wysiłek badawczy, który dał możliwość prowadzenia wielu nowych eksploracji na poziomie całego genomu nie tylko psów, lecz także ich dzikich krewnych. Amerykański zespół, kierowany przez prof. Roberta Wayne’a z University of California, Los Angeles i dr Elaine Ostrander z National Institutes of Health, interesował się analizą procesu udomowienia psa. Dysponował bardzo wieloma próbkami pobranymi od psów rasowych, ale potrzebna była analiza porównawcza z przodkami psa z różnych regionów świata, by podjąć się wskazania populacji wilka, od której pochodzi pies. Dr Pilot, która zajmowała się europejskimi wilkami, została zaproszona do włączenia się w międzynarodowe badania, w których wykorzystano nowo opracowaną metodę analizy polimorfizmów genetycznych – fragmentów DNA wykazujących zmienność. Technicznie była ona oparta na analogicznej metodzie genotypowania pojedynczych nukleotydów, tzw. SNP, stworzonej wcześniej dla genomu człowieka. Praca zespołu

”
Praca zespołu badaczy po raz pierwszy wykorzystała metody oparte na zmiennościach na poziomie całego genomu w badaniach nad udomowieniem psa.

152

badaczy po raz pierwszy wykorzystała metody oparte na zmiennościach na poziomie całego genomu w badaniach nad udomowieniem psa. Przedtem badane były tylko niewielkie fragmenty genomów, a to ograniczało zarówno rodzaj pytań badawczych, jakie można było zadawać, jak i liczbę możliwych odpowiedzi na te pytania.

Genotypowaniu poddano 912 psów należących do 85 ras, 225 wilków reprezentujących populacje z Eurazji i Ameryki Północnej oraz 60 kojotów reprezentujących większość populacji północnoamerykańskich. Uzyskano dane dotyczące zmienności w ponad 48 tys. loci. Praca przyczyniła się do rozwoju zastosowań genomiki w badaniach nad ewolucją dzikich zwierząt – była pierwszym tego typu opracowaniem dotyczącym dużych ssaków drapieżnych i zapoczątkowała badania w skali całego genomu nad wieloma innymi niemodelowymi gatunkami ssaków, niebadanych standardowo w genetyce porównawczej.

Publikacja w *Nature* okazała się przełomowa w swojej dziedzinie. Niemal wszystkie późniejsze doniesienia dotyczące udomowienia psów odnoszą się do niej. Badacze pokazali, że odtworzenie historii ewolucyjnej psów nie jest łatwym zadaniem, wskazując na czynniki, które zacierają

ślady wczesnych etapów procesu udomowienia. Jednym z takich czynników jest hybrydyzacja – krzyżowanie się wilków i psów, do którego dochodziło i nadal dochodzi na różnych etapach i w różnych miejscach świata. Do tej pory wśród uczonych nie ma jednej teorii odpowiadającej na pytanie, w jakim regionie nastąpiło udomowienia psa. Niedawno ukazała się praca wskazująca, że mogło się to stać niezależnie w dwóch różnych regionach Eurazji, ale jest ona szeroko dyskutowana. Obecnie głównym zainteresowaniem badawczym dr Pilot jest właśnie hybrydyzacja. Badaczka przygląda się, jak ten proces wygląda i jakie są jego konsekwencje zarówno dla populacji wilków, jak i dla wolno żyjących psów.

Wpływ tamtej pracy na rozwój wiedzy o udomowieniu psa widać dobrze z perspektywy 10 lat. Z jednej strony dotyczy on np. diagnostyki różnych chorób psów rasowych o podłożu genetycznym, z drugiej – badań środowiskowych i ewolucyjnych, w tym kwestii genetyki wolno żyjących psów, która jest jednym z tematów dalszych naukowych poszukiwań dr Pilot. Zapoczątkowane wtedy badania relacji genetycznych między rasami psów na poziomie genomów przyniosły ogromny rozwój wiedzy na temat sposobu formowania się grup funkcjonalnych psów i późniejszego powstawania z nich ras.

Ślady różnicowania morfologicznego psów sięgają dużo dalej niż różnicowanie się ras. Gdy patrzymy na fenotypy psów ze starożytnego Egiptu i Mezopotamii, które możemy odtworzyć na podstawie dzieł sztuki, widzimy różnicowanie się wtedy jeszcze nie ras, ale różnych typów w wyniku selekcji psów do określonych funkcji – niektóre psy musiały być duże, inne małe, jedne agresywne, drugie łagodne. Proces różnicowania się ras psów ze względu na selekcję przez człowieka jest jednak stosunkowo niedawny i nie mówi nam nic o wczesnej historii ewolucyjnej tych zwierząt. Większość ras psów powstała dopiero w XVIII i XIX wieku. Przyjrzenie się psom wolno żyjącym może pozwolić na lepsze zrozumienie nie tylko procesu udomowienia, ale i relacji ewolucyjnej psów wolno żyjących z psami rasowymi.

Badania dr Pilot i grupy naukowców kierowanej przez prof. Wiesława Bogdanowicza potwierdziły, że populacja wolno żyjących psów stanowi grupę odrębną i dużo starszą ewolucyjnie od psów rasowych. Wolno żyjące psy, które są mieszańką ras, to niewielka część populacji wolno żyjących psów w Eurazji. Poszczególne rasy pochodzą od udomowionych wolno żyjących psów następnie poddanych selekcji ze strony człowieka w celu uzyskania konkretnych

cech fenotypowych. Wszystkie współczesne wolno żyjące psy w Europie wywodzą się ze wschodniej Azji. Potwierdziły to wcześniej-
sze doniesienia oparte na analizie mitochondrialnego DNA, a praca zespołu, w którym pracuje dr Pilot, wykazała, że ekspansja psów do Europy przez Azję Centralną była prawdopodobnie związana z neolityczną ekspansją ludzi. Jednak samo udomowienie psów miało miejsce wcześniej niż omawiana ekspansja.

Większość badaczy opierających swoje teorie na badaniach genetycznych, paleobiologicznych i archeologicznych jest zgodna, że do udomowienia psów doszło w okresie między 40 a 25 tys. lat temu. Prawdopodobnie w tym okresie, gdy psy z Azji (przodkowie dzisiejszych psów) przybyły do Europy, w Europie były już inne, odrębne genetycznie psy, ale zostały one częściowo lub całkowicie wyparte przez przybyszów. Być może te azjatyckie psy miały cechy, dzięki którym były dla człowieka bardziej przydatne niż europejskie. Ślady europejskich psów przedneolitycznych można znaleźć w genomach współczesnych zwierząt tego gatunku, ale to już wyniki badań innych zespołów, oparte na analizie archeologicznej i antycznego DNA (*ancient DNA*). Nie są to proste badania, ze względu na degradację

”
Przyjrzenie się psom wolno żyjącym może pozwolić na lepsze zrozumienie nie tylko procesu udomowienia, ale i relacji ewolucyjnej psów wolno żyjących z psami rasowymi.

”
Na podstawie analizy zmienności genetycznej w obrębie genomu można zidentyfikować konkretne geny odpowiedzialne za chorobę czy wadę genetyczną.

antycznego DNA, i często nie dają jednoznacznych odpowiedzi. Jednak przynajmniej jedna praca potwierdza, że w Europie doszło do wymiany linii ewolucyjnych psów. Ludzie są zainteresowani historią psa, gdyż sami mają psy albo przynajmniej widują je na co dzień. To jedyne duże ssaki drapieżne żyjące tak blisko człowieka i wchodzące z nim w obustronne, codzienne interakcje. Natomiast praktyczny aspekt badań, który rozwinął się w wyniku opracowania metody pozwalającej na analizę zmienności w obrębie całego genomu, dotyczy diagnostyki chorób genetycznych psów domowych. Dzięki ogromnej różnorodności ras psów oraz występowaniu chorób genetycznych typowych dla poszczególnych ras badania asocjacyjne genomu stały się bardzo efektywnym sposobem identyfikacji genów wpływających na różne cechy morfologiczne i dziedziczenie chorób. Schemat jest prosty – porównuje się zbiór prób od osob-

ników dotkniętych jakąś chorobą genetyczną z drugą grupą zdrową (kontrolną). Na podstawie analizy zmienności genetycznej w obrębie genomu można zidentyfikować konkretne geny odpowiedzialne za chorobę czy wadę genetyczną. Dzięki temu zostało poznane podłoże genetyczne różnych chorób występujących u psów. Wiele z tych chorób występuje analogicznie do ludzkich. U psów rasowych choroby o podłożu genetycznym zdarzają się dużo częściej niż u psów nierasowych. Jest to następstwo krzyżowania osobników tylko w obrębie rasy, a więc podobnych do siebie genetycznie. Wydaje się, że ze względu na dobrostan zwierząt, ale i ludzi im towarzyszących, praktyki związane z hodowlą ras powinny zostać zmienione.

Pilot, M. i in. (2010). Genome-Wide SNP and Haplotype Analyses Reveal a Rich History Underlying Dog Domestication. *Nature*, 464, 898–902.



Cyfrowe laboratorium bezpieczeństwa nanomateriałów

Karolina Głowacka



**Jak efektywnie
i bezpiecznie projektować
nanomateriały? W jaki
sposób opracować metodę,
która pozwoli na analizę
miliardów wariantów
nanocząstek, a jednocześnie
znacząco obniży koszty,
skróci czas pracy i zredukuje
liczbę wykorzystywanych
zwierząt laboratoryjnych?**

Młody Tomasz Puzyn, dziś profesor pracujący na Wydziale Chemii Uniwersytetu Gdańskiego, byłby szczerze zdziwiony, gdyby ktoś mu powiedział, że to właśnie on odpowie na te pytania. Jako toksykolog komputerowy nie interesował się nanocząstkami. Ścieżki drogi naukowej doprowadziły go jednak do dokonania zmiany jakościowej w dziedzinie nanotechnologii. Tą zmianą było stworzenie metod komputerowych QSAR (Quantitative Structure-Activity Relationships) umożliwiających ocenę toksyczności i właściwości nowych nanomateriałów. Dzięki prof. Puzynowi przed przemysłem chemicznym otworzyła się droga do niebagatelnej oszczędności czasu i pieniędzy, a także możliwość weryfikowania znacząco większej liczby nanocząstek – kandydatek do przeróżnych rozwiązań w przemyśle i medycynie.

QSAR to metoda modelowania ilościowych zależności pomiędzy strukturą chemiczną a aktywnością biologiczną. Od lat 60. XX wieku jest stosowana do oceny właściwości klasycznych związków chemicznych. Dzięki niej odpowiedzi na wiele pytań dotyczących zarówno cech fizykochemicznych, jak i aktywności biologicznej substancji można uzyskać na poziomie obliczeń komputerowych, a do testów laboratoryjnych kierować substancje już po gruntownej selekcji. Jak wyjaśnia to sam uczony, „QSAR umożliwia

zastępowanie myszy laboratoryjnych myszami komputerowymi”.

Metoda ta znalazła się w centrum zainteresowania Tomasza Puzyna już na etapie pracy magisterskiej i doktoratu. Badania kontynuował podczas stażu podoktorskiego. Wtedy, dwie dekady temu, nie był to w Polsce temat popularny. Jak dziś opowiada naukowiec, otrzymanie w tamtym czasie stypendium START FNP i kilka lat później grantu HOMING, w ramach którego mógł sfinansować badania związane właśnie z rozwojem QSAR, utwierdziło go w przekonaniu, że warto kontynuować tę ścieżkę.

Nanocząstkom zaczął przyglądać się w czasie stażu podoktorskiego w Stanach Zjednoczonych u prof. Jerzego Leszczyńskiego, wybitnego specjalisty w zakresie zastosowań chemii teoretycznej do badania materiałów. To właśnie spotkanie tych dwóch chemików komputerowych, o innych, ale komplementarnych obszarach zainteresowań, zaowocowało koncepcją próby dostosowania i wprowadzenia metod QSAR do specyficznego świata nanomateriałów.

Przypomnijmy: nanotechnologia to stosunkowo młoda, prężnie rozwijająca się dziedzina. Zajmuje się cząstkami materii o rozmiarach od 1 do 100 nm (10^{-9} m). Nanocząstki są więc niewiele większe od niedużego białka i niewiele mniejsze

„
Przed przemysłem chemicznym otworzyła się droga do niebagatelnej oszczędności czasu i pieniędzy, a także możliwość weryfikowania znacząco większej liczby nanocząstek – kandydatek do przeróżnych rozwiązań w przemyśle i medycynie.

od średniej wielkości wirusa. I choć są to cząstki maleńkie, mają wielkie znaczenie w życiu codziennym. Znajdziemy je coraz częściej w farbach, sprzęcie sportowym, kosmetykach, środkach ochrony osobistej, odzieży odpornej na poplamienie, fotokatalizatorach, sprzęcie elektronicznym, mają także zastosowanie w medycynie (np. jako nośniki leków w chemioterapii czy elementy szczepionek genetycznych przeciw COVID-19). Korzystanie z ich możliwości wymaga jednak szczególnego przygotowania. Nanocząstki są bardzo wrażliwe na wpływ środowiska, w tym środowiska, jakim jest organizm człowieka. Pod wpływem zmiennych warunków (pH, siła jonowa) nanomateriały mogą zmieniać swoje właściwości. Dlatego kluczowa jest możliwość przewidywania, jak dany materiał zachowa się w zróżnicowanych warunkach.

Dzięki badaniom przeprowadzonym przy kolejnym wsparciu FNP w ramach grantu w programie FOCUS prof. Puzynowi udało się opracować podstawy koncepcji wykorzystywania metod QSAR do przewidywania toksyczności nanomateriałów. Prof. Leszczyński namówił badacza do wysłania artykułów do pism o wysokim wskaźniku cytowań – najpierw do *Small*¹ w 2009 roku, a dwa lata

później do *Nature Nanotechnology*². Publikacja szczególnie w tym drugim piśmie była dla Puzyna wyraźnym sygnałem, że trafił na rozwiązanie, które może przynieść realną zmianę.

W kolejnych latach prof. Puzyn wraz z zespołem rozwijał metodę nano-QSAR. Najważniejszym wyzwaniem było opracowanie deskryptorów specyficznych dla nanostruktur, tak by uwzględniały nie tylko skład chemiczny, ale także cechy strukturalne różnych nanopostaci (rozmiar, kształt, porowatość). W tym celu badacze zastosowali najnowsze osiągnięcia chemii teoretycznej oraz metody komputerowe oparte na sztucznej inteligencji i uczeniu maszynowym.

W rozwoju nano-QSAR pomogły kolejne granty badawcze: grant Narodowego Centrum Nauki w konkursie HARMONIA oraz dwa granty 7. Programu Ramowego UE: NanoBRIDGES i NanoPUZZLES. Te ostatnie stały się podstawą do stworzenia koordynowanego przez prof. Puzynę międzynarodowego konsorcjum wiodących grup naukowych, m.in. z USA, Włoch, Japonii czy Indii. Prace pozwoliły na opracowanie ponad 50 modeli, które umożliwiają przewidywanie nie tylko wybranych właściwości fizykochemicz-

¹ Puzyn, T. i in. (2009). Toward the Development of “Nano-QSARs”: Advances and Challenges. *Small* 5 (22), 2494–2509.

² Puzyn, T. i in. (2011). Using Nano-QSAR to Predict the Cytotoxicity of Metal Oxide Nanoparticles. *Nature Nanotechnology*, 6 (3), 175–178.

nych, ale również różnych rodzajów odpowiedzi toksycznej nanomateriałów.

Wyniki kolejnych badań były publikowane w wiodących czasopismach nanotechnologicznych. Prace te są często cytowane, a o rozpoznawalności autora świadczą zaproszenia do wygłoszenia wykładów na ponad 20 najbardziej prestiżowych konferencjach nanotechnologicznych i toksykologicznych na świecie. Prof. Puzyn wraz z zespołem został również zaproszony do kolejnych siedmiu projektów naukowych realizowanych w ramach Programu Ramowego HORYZONT 2020 oraz do udziału w pracach grup eksperckich na poziomie Komisji Europejskiej i OECD. Doczekał się też naśladowców rozwijających jego metodę.

Osiągnięcia badawcze prof. Puzyna i jego zespołu wpisują się w priorytetowe potrzeby przemysłu chemicznego. Ustalenia naukowca uwzględniają kwestie prawne (m.in. praw zwierząt), ekonomiczne, technologiczne, ekologiczne, a także zdrowia publicznego w skali globalnej. Są szczególnie istotne w obliczu już obowiązujących oraz nowych unijnych uregulowań prawnych. Komisja Europejska zmierza do egzekwowania procedur wymagających od producenta substancji chemicznej (już nie tylko leku) oszacowania jej potencjalnie negatywnego wpływu na

zdrowie człowieka i środowisko przyrodnicze przed wprowadzeniem tej substancji na rynek.

Nano-QSAR redukuje koszty i czas badań, a w samych laboratoriach ogranicza użycie zwierząt laboratoryjnych. Substancje ewidentnie niespełniające oczekiwań oraz toksyczne są odsiewane na poziomie tzw. *screeningu* komputerowego. Jednocześnie producenci na etapie projektowania są w stanie zbadać właściwości kilkukrotnie większej liczby potencjalnie interesujących ich nanostruktur. Mowa tutaj o możliwości rozważania miliardów rozwiązań. Metody zwiększają także szanse producentów na wprowadzenie do praktyki założeń Europejskiego Zielonego Ładu (European Green Deal), co w przyszłości wpłynie na poprawę stanu zdrowia całych społeczeństw poprzez ograniczenie chorób cywilizacyjnych o podłożu środowiskowym.

Wreszcie metoda nano-QSAR może mieć bezpośrednie zastosowanie w medycynie do szybkiego projektowania i wstępnej weryfikacji (na etapie badań przedklinicznych) bezpieczeństwa nanocząstek wykorzystywanych jako np. nośniki leków czy materiału genetycznego (np. RNA). To szczególnie istotne w przypadku chorób neurodegeneracyjnych (nanocząstki mogą przekraczać

”
Nano-QSAR
redukuje koszty i czas
badań, a w samych labo-
ratoriach ogranicza użycie
zwierząt laboratoryjnych.
Substancje ewidentnie
niespełniające oczeki-
wań oraz toksyczne są
odsiewane na poziomie
tzw. *screeningu* kom-
puterowego.

barierę krew–mózg) oraz w chemioterapii nowotworów (umożliwiają bardzo precyzyjną dostawę leków, ograniczając tym samym skutki uboczne).

Obecnie prof. Puzyn wraz z zespołem kontuuje prace naukowe nad nano-QSAR m.in. pod kątem możliwości badania „naturalnych nanocząstek” wytwarzanych przez organizm ludzki. Ich rezultaty zdążyły już wyjść poza mury laboratorium i są komercjalizowane: naukowiec został założycielem i pierwszym prezesem QSAR Lab, spółki *spin-off* powstałej przy Uniwersytecie Gdańskim. Firma zajmuje się usługami komputerowego przewidywania właściwości fizycznych i toksyczności nanomateriałów, a także doradza przedsiębiorcom na etapie projektowania materiałów. Klientami QSAR Lab były m.in. japońskie National Institute for Environmental Studies oraz Ministerstwo Środowiska. W roku 2020 spółka po raz pierwszy wypłaciła właścicielom dywidendę. W tym samym roku została laureatem Nagrody Pomorskiej „Gryf Gospodarczy” w kategorii „Najlepszy *start-up*” przyznawanej przez marszałka województwa pomorskiego. Polski naukowiec wraz z zespołem współpracuje również m.in. z Chińską Akademią Nauk nad projektowaniem nanokapsułek do terapii medycznych.

Prof. Puzyn nad metodą QSAR umożliwiającą przewidywanie właściwości nanomateriałów

pracuje już ponad 20 lat. Przez ten czas w jego zespole rozwinęło się kolejne pokolenie badaczy i badaczek. Tu na szczególne wyróżnienie zasługują dostrzegane w Polsce i za granicą: dr Agnieszka Gajewicz-Skrętna (laureatka ogólnoświatowej edycji L’Oreal-UNESCO for Women in Science International Rising Talents Award), dr Natalia Syzochenko (zdoływczyni amerykańskiej nagrody The LUSH PRIZE for Supporting Animal-Free Testing) oraz dr Alicja Mikołajczyk (stypendystka FNP START z roku 2019).

Wszystkie wyróżnienia współpracowniczek cieszą prof. Puzyna, a ostatnie wymienione, stypendium START, ma dla niego szczególne znaczenie. Właśnie to stypendium otrzymał jako młody badacz i to ono po raz pierwszy pozwoliło mu uwierzyć we własne siły. Jak mówi, bacznie pilnuje się, aby nie podcinać skrzydeł swoim uczniom, a przeciwnie – ośmielać i zachęcać do stawiania sobie wysoko poprzeczki, tak jak przed laty jego ośmielił prof. Leszczyński.

Pozostaje czekać na kolejne dobre rozwiązania dla nauki i społeczeństwa, które przyniesie taka międzypokoleniowa współpraca.

Puzyn, T. i in. (2011). Using Nano-QSAR to Predict the Cytotoxicity of Metal Oxide Nanoparticles. *Nature Nanotechnology*, 6 (3), 175–178.



Człowiek z temperamentem

Patrycja Dołowy



**W jakim stopniu
cechy temperamentu
są uwarunkowane
genetycznie? Jak
temperament wpływa
na kształtowanie
się osobowości?
Jakie ma znaczenie
w powstawaniu zaburzeń
potraumatycznych?**

Drogę do odpowiedzi na te pytania prof. Jan Strelau rozpoczął jeszcze w czasie studiów magisterskich na Wydziale Psychologii Uniwersytetu Warszawskiego. W latach 50. na odradzającej się uczelni brakowało pracowników naukowych, dlatego zdolniejszym studentom ostatnich lat, do których należał młody Strelau, powierzano zarówno odpowiedzialne zadania badawcze, jak i prowadzenie zajęć dla innych studentów. Wtedy zetknął się po raz pierwszy z teorią biologicznych podstaw osobowości, uczestnicząc w seminarium wybitnego psychologa prof. Mieczysława Kreutza (który później został promotorem jego pracy doktorskiej). Profesor nie znał rosyjskiego, a literatura anglojęzyczna była w tamtym czasie niedostępna. Swoim studentom zlecał jednak zapoznanie się z artykułami w oryginale. Strelau, któremu przypadł trudny i długi tekst Borysa Tiepłowa, znakomitego badacza psychofizjologii różnic indywidualnych, zaproponował – też nie znał rosyjskiego. „Niech się pan nie przejmuj” – odpowiedział mu profesor. – „Daję na to panu aż trzy miesiące!”. Tak więc przyszły psycholog osobowości nie miał wyjścia. Nie tylko nauczył się języka, ale i dogłębnie zainteresował się poruszaną tematyką. Obie te rzeczy zaważyły na jego dalszej karierze naukowej. W tamtych latach kontakty z nauką zachodnią były znacznie

utrudnione, Jan Strelau skoncentrował się na wyjazdach badawczych na Wschód. Po doktoracie otrzymał półroczne stypendium do Moskwy, gdzie trafił do środowiska badaczy odwołujących się do typologii układu nerwowego Pawłowa. Nawiązał tam naukowe kontakty i przyjaźnie zarówno z badaczami radzieckimi, jak i zachodnimi, poznanymi na konferencji w Leningradzie. Na sympozjum przyjechali m.in. Hans Eysenck i Jeffrey Gray z Wielkiej Brytanii, z którymi Strelau potem przez lata blisko współpracował. Do Stanów Zjednoczonych wyjechał dopiero na początku lat 70. Był po habilitacji. Tam nawiązał współpracę właściwie ze wszystkimi najważniejszymi badaczami w swojej dziedzinie. Tworzył już wtedy podwaliny pod swoją Regulacyjną Teorię Temperamentu, zaczął być międzynarodowo uznanym i poważanym badaczem psychologii różnic indywidualnych w zakresie psychologii temperamentu, określanym mianem twórcy „szkoły warszawskiej”. Jego teorie łączyły myśl wschodnich i zachodnich badaczy oraz wniosły do tej dziedziny nowe narzędzia i modele.

Chociaż nie ma jednej definicji temperamentu, badacze są zgodni co do tego, że cechy temperamentu są w znacznym stopniu genetycznie uwarunkowane. Prof. Strelau podjął próbę opracowania podstawowej koncepcji, która

”
Prof. Strelau podjął próbę opracowania podstawowej koncepcji, która wyjaśniałaby zachowanie człowieka niezależnie od warunków kulturowych.

wyjaśniałoby zachowanie człowieka niezależnie od warunków kulturowych. Według profesora temperament stanowi biologiczną podstawę kształtowania się osobowości. U jego podstawy leżą mechanizmy neurofizjologiczne i biochemiczne regulujące charakterystyczny dla danej osoby poziom pobudzenia. W zaproponowanej przez Strelaua definicji Regulacyjnej Teorii Temperamentu, będącej w pewnym stopniu kontynuacją myśli Pawłowa, temperament odnosi się do formalnych cech zachowania, takich jak siła i intensywność reakcji, poziom energetyczny oraz charakterystyka czasowa zachowania i reakcji. Do ich mierzenia wraz ze swoim najpierw studentem, a potem bliskim współpracownikiem (byli współautorami kilkudziesięciu prac) prof. Bogdanem Zawadzkim stworzyli inwentarz *Formalna Charakterystyka Zachowania – Kwestionariusz Temperamentu*, który – podobnie jak *Kwestionariusz Temperamentu* rozpowszechniony za granicą jako *Strelau Temperament Inventory* (STI) – doczekał się bez mała 30 adaptacji językowych.

W 1998 roku prof. Strelau otrzymał subsydlum MISTRZ FNP. Zbiegło się ono w czasie z opublikowaniem jego podstawowej – dla międzynarodowych badań w dziedzinie biolo-

gicznych wymiarów osobowości – monografii *Temperament: A Psychological Perspective* (Nowy Jork: Plenum Press) wydanej w tym samym roku w języku polskim pod tytułem *Psychologia temperamentu* przez Wydawnictwo Naukowe PWN.

Dzięki subsydlum profesor zaplanował dalsze badania weryfikujące autorską koncepcję temperamentu. Z prof. Aloisem Angleitnerem z Uniwersytetu w Bielefeld przygotowali nową adaptację kwestionariusza pod nazwą *Kwestionariusz PTS* znaną na świecie jako *Pavlovian Temperament Survey* (PTS) i przystosowaną do kilkunastu wersji językowych.

Badania skupiały się na trzech głównych obszarach: diagnostyki i analiz funkcjonalnego znaczenia cech temperamentu u dzieci, analiz genetycznych podstaw temperamentu w ramach paradygmatu genetyki zachowania (badania bliźniąt, studia rodzinne: rodzice–dzieci) oraz analiz roli temperamentu przy zaburzeniach potraumatycznych (PTSD, od ang. *post-traumatic stress disorder*). Badania w pierwszym obszarze doprowadziły do opracowania specyficznej metody diagnostycznej temperamentu (*Kwestionariusz Temperamentu dla Dzieci – KTD* – autorstwa Włodzimierza Oniszczenki i Anny Radomskiej) na podstawie szacowania cech przez rodziców. Narzędzie było później szeroko

stosowane w rodzimych badaniach dotyczących uwarunkowań genetycznych temperamentu oraz studiach rodzinnych, w tym analizach wewnątrzrodzinnych uwarunkowań objawów zaburzeń potraumatycznych. Choć sam inwentarz KTD nie został zaadaptowany do innych warunków kulturowych, prace powstałe w tym nurcie odbiły się szerokim międzynarodowym echem i były przytaczane w licznych publikacjach, w tym w pracy zbiorowej *People Under Extreme Stress* (wydanej w 2006 roku przez Nova Science Publishers w Nowym Jorku).

Badania w ramach drugiego nurtu dotyczyły analiz genetycznych temperamentu i w swej zasadniczej warstwie zostały zrealizowane z zastosowaniem klasycznej metody bliźniąt mono- i dyzygotycznych wychowywanych razem. Wyniki tych analiz nie tylko pogłębiły rezultaty badań uzyskane w latach 90., ale też przyniosły nowe ustalenia. Psychologowie wykazali znaczący wkład czynnika genetycznego w związek cech temperamentu z niektórymi stresorami środowiskowymi (zaklasyfikowanymi jako „wyzwania”) oraz stylami radzenia sobie ze stresem. Efektem tych analiz było opracowanie przez prof. Strelaua modelu stresorów środowiskowych niezależnych i zależnych od jednostki oraz relacyjnego modelu stresu ujmującego główne wyznaczniki

reakcji na stresory, a więc temperament, sposoby radzenia sobie ze stresem oraz konsekwencje stresu w postaci zaburzeń potraumatycznych.

W 2000 roku prof. Strelau otrzymał Nagrodę FNP za stworzenie oryginalnej psychologicznej Regulacyjnej Teorii Temperamentu, a szczególnie za dzieło *Temperament. A Psychological Perspective* (1998).

Trzeci nurt badań dotyczył uwarunkowań reakcji na traumatyczny stres. Początkowo obejmowały one osoby dotknięte przez powódź i wykazały, że temperament jest jednym z głównych czynników warunkujących objawy zaburzeń potraumatycznych. Badania te kontynuowano w kolejnych latach w innych grupach podwyższonego ryzyka powstania zaburzeń potraumatycznych (osób dotkniętych pożarami, chorobami somatycznymi, wypadkami drogowymi czy narażonych na traumatyzację zawodową) zarówno w formie badań indywidualnych (dorosli, młodzież, dzieci), jak i studiów rodzinnych. Ich pokłosiem była wydana w 2004 roku praca zbiorowa pod redakcją Strelaua – *Osobowość a ekstremalny stres*, w przygotowaniu której uczestniczyli autorzy krajowi i zagraniczni. Natomiast synteza uzyskanych wyników badawczych zosta-

”
Efektem tych analiz było opracowanie przez prof. Strelaua modelu stresorów środowiskowych niezależnych i zależnych od jednostki [...].

ła opublikowana dwa lata później – w 2006 roku w autorskiej monografii *Temperament jako regulator zachowania* (Gdańskie Towarzystwo Psychologiczne), a w języku angielskim w 2008 roku pod tytułem *Temperament as a Regulator of Behavior: After Fifty Years of Research* (Clinton Corners, Nowy Jork: Eliot Werner Publications). Książka ta przyczyniła się bardzo znacząco do międzynarodowej popularyzacji Regulacyjnej Teorii Temperamentu. Chociaż prof. Strelau zmarł w 2020 roku, opisane w książce rezultaty do dziś są istotnym źródłem dla badaczy na całym świecie, choćby w ramach aktualnie realizowanego projektu międzynarodowego dotyczącego m.in. uwarunkowań zaburzeń emocjonalnych związanych z temperamentem, wywołanych przez stres pandemii COVID-19.

Prof. Strelau znany był ze swojej ogromnej wiedzy, niezwykle pracowitości i świetnej organizacji pracy.

– Profesor jeszcze w czasie swoich studiów rozwinął strategię przygotowywania się do pracy badawczej – opowiada Bogdan Zawadzki. – Zawsze bardzo staranie analizował źródła. Dbał o literaturę. Znał prace pisane po angielsku, rosyjsku i niemiecku. Najważniejsze z tych prac właściwie na pamięć. Gdy rozmawiało się z nim na temat procedur diagnostycz-

nych, przytaczał szczegóły, jakby dopiero co przerwał lekturę.

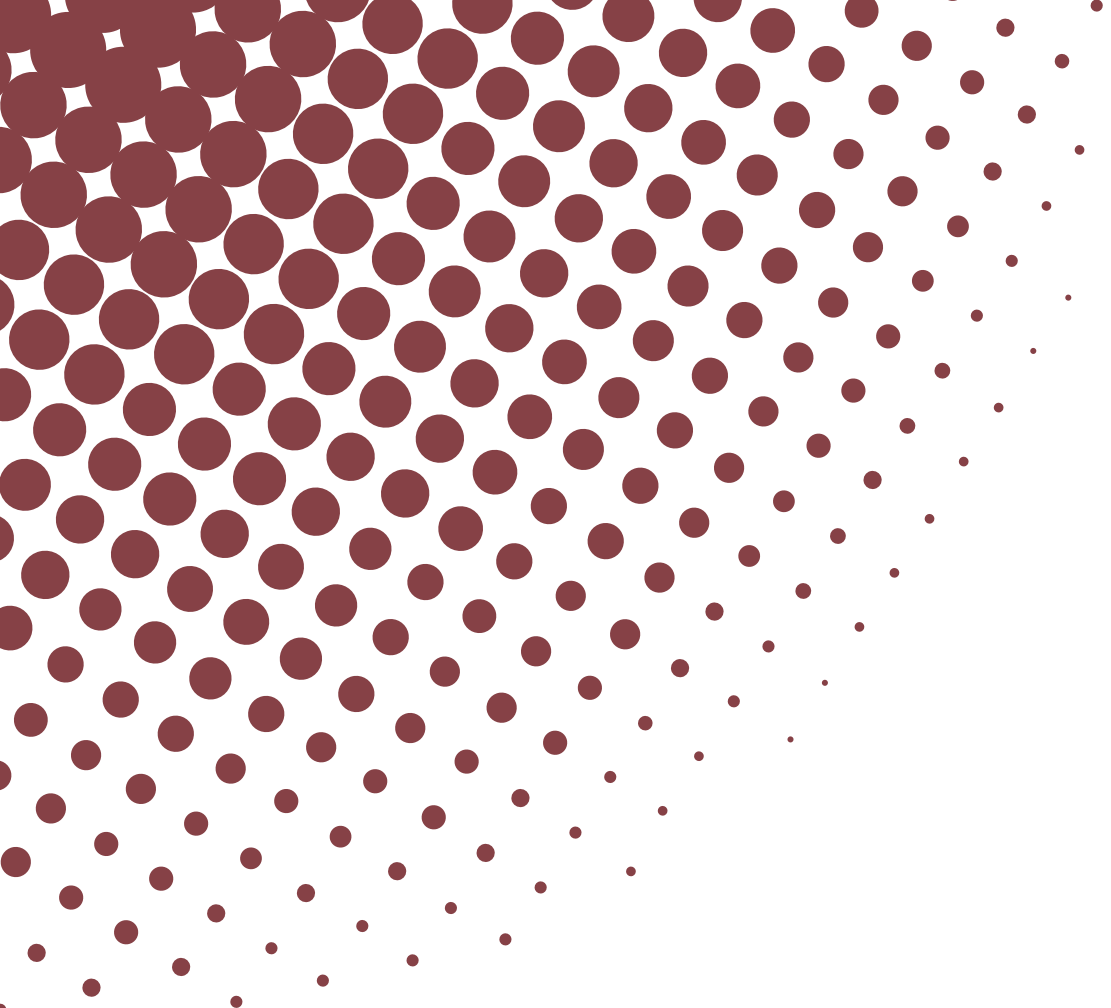
Dla profesora praca była niezwykle ważna, ale równie istotny był dobry odpoczynek. Powtarzał zawsze: kto dobrze pracuje, ten dobrze odpoczywa. Urlop wykorzystywał na wspólne z żoną podróże i sport (w zimie uwielbiał narty). Ta równowaga w jego życiu, nieczęsta dla człowieka o takich osiągnięciach naukowych, wynikała z tego, że był bardzo dobrze zorganizowany. I on sam, i jego rodzina – wszyscy funkcjonowali jak w zegarku, role były wyznaczone. Wszystko mieli poukładane. Czas profesor liczył perfekcyjnie, co budziło ogólny podziw jego współpracowników.

– Miał kiedyś do oddania publikację, a że był to czas pełnienia przez niego licznych funkcji na uczelni, w PAN-ie, w towarzystwach naukowych, wydawało się, że *deadline* jest niemożliwy do osiągnięcia – wspomina Zawadzki. – Tymczasem profesor wyliczył sobie, że gdy wstaje o 6:00 i pracuje do 9:00 (zawsze tak pracował), a następnie rusza do innych obowiązków, którym poświęca cały dzień, musi zabraknąć mu czasu. Jednak gdy doda do tego pół godziny dziennie, czyli pobudka o 5:30 rano i praca do 9:00, wtedy przez tyle i tyle miesięcy nabiera tyle i tyle godzin pracy, i to już powinno mu wystarczyć. I rzeczywiście zdążył – idealnie na czas.



Trzecia rewolucja

Patrycja Dołowy



**Czasami najbardziej
oczywiste rozwiązania
okazują się najbardziej
przełomowe. Jednak by
po nie sięgnąć, potrzeba
nie tyle odwagi, a by
o nie zawalczyć – wiele
wytrwałości i ciężkiej pracy.**

W 2020 roku kolejna, trzecia już modyfikacja wynalazku naukowców z Gdańskiego Uniwersytetu Medycznego – opracowanie metody hodowli limfocytów T regulatorowych (Treg) – została objęta ochroną patentową. Zespół prof. Piotra Trzonkowskiego otrzymuje preparaty komórkowe o bardzo wysokiej czystości. Limfocyty Treg są skutecznie wykorzystywane w terapii komórkowej pacjentów z cukrzycą typu 1 (DM1), stwardnieniem rozsianym, a także GvHD, czyli groźną dla życia chorobą przeszczep przeciwko gospodarzowi, która może wystąpić po przeszczepie szpiku.

W 2009 roku Piotr Trzonkowski wraz z Natalią Marek-Trzonkowską oraz Marią Bieniaszewską, Jolantą Juścińską, Anitą Dobyszek, Adamem Krzystyniakiem, Jolantą Myśliwską i Andrzejem Hellmannem opublikowali w *Clinical Immunology* artykuł „First-In-Man Clinical Results of the Treatment of Patients with Graft Versus Host Disease With Human Ex Vivo Expanded CD4+CD25+CD127-T Regulatory Cells”. Ta praca jest szczególnie z wielu powodów. Po pierwsze, stanowiła pierwszy dowód na skuteczność komórek Treg w terapii chorób, w których dochodzi do nadmiernej aktywacji układu immunologicznego. Po drugie, przedstawione w niej wyniki przekonały jej autorów

do dalszych poszukiwań możliwości leczenia innych chorób o podobnym tle. W ciągu kilku kolejnych lat badaczom udało się udowodnić skuteczność opisanej metody w leczeniu cukrzycy typu 1 oraz stwardnienia rozsianego. Praca okazała się przełomowa – doprowadziła do rozwinięcia terapii komórkowej osłabiającej niepożądane działania układu odpornościowego w chorobach autoimmunologicznych z wykorzystaniem właśnie limfocytów Treg. Zespół Trzonkowskich był więc pierwszym na świecie, który zastosował sztucznie namnożone komórki regulatorowe w terapii człowieka.

Na czym polega wyjątkowość tej pionierskiej metody? Przede wszystkim na tym, że oparta jest na badaniach, które przeszły całą drogę – od eksperymentu do zastosowania. Sami badacze mówią:

– Nie stworzyliśmy nic nowego, wykorzystaliśmy mechanizm istniejący w naszym układzie immunologicznym. Limfocyty Treg występują naturalnie w organizmie człowieka i odpowiadają za tolerancję immunologiczną. Natomiast po raz pierwszy owoc kilkunastu lat naszej i nie tylko naszej pracy został przekuty na zastosowanie w leczeniu człowieka i okazało się, że jest to skuteczne.

”
Zespół Trzonkowskich był więc pierwszym na świecie, który zastosował sztucznie namnożone komórki regulatorowe w terapii człowieka.

”
Limfocyty Treg można porównać do żandarmów, którzy pilnują, aby komórki układu odpornościowego skutecznie walczyły z drobnoustrojami, a jednocześnie nie atakowały własnych komórek i narządów.

170

Naukowcy przyjrzeni się, jak działa układ odpornościowy. Mechanizmy immunologiczne ewoluowały przez miliardy lat, są świetnie „dopracowane”. Badacze sięgnęli po to i zastosowali w leczeniu – we właściwych proporcjach, ilościach, w określonym momencie i w odpowiedni sposób. Limfocyty Treg można porównać do żandarmów, którzy pilnują, aby komórki układu odpornościowego skutecznie walczyły z drobnoustrojami, a jednocześnie nie atakowały własnych komórek i narządów. Jeśli limfocytów Treg jest za mało, białe krwinki zaczynają atakować własne narządy, np. tarczycę, trzustkę, mózg. Tak powstają cukrzyca typu 1, choroba Hashimoto czy stwardnienie rozsiane. To zjawisko immunologiczne ma także kluczowe znaczenie w przyjmowaniu przez organizm biorcy przeszczepionych narządów.

U osób, których układ immunologiczny atakuje własne tkanki i narządy, potrzeba całej „armii żandarmów”, by ten proces zahamować. Piotr Trzonkowski postanowił pobrać krew chorego, namnożyć limfocyty T regulatorowe, a potem przeszczepić je z powrotem do organizmu pacjenta.

– 2009 rok to był bardzo ciekawy moment – opowiada prof. Trzonkowski. – Wiele zespołów na całym świecie zastanawiało się wtedy nad

użyciem terapii komórkowej. Trzy lata wcześniej miało miejsce sławne badanie TeGenero, gdzie podawano przeciwciała, które prowadziły do wzrostu liczby komórek T regulatorowych. Kilkoro pacjentów trafiło wówczas na oddział intensywnej terapii. To było tylko kilka przypadków, ale wybuchł ten typ paniki, który możemy obserwować i dziś wobec jednej ze szczepionek przeciw SARS-CoV-2. Tamto badanie zostało jednak oparte na odmiennych mechanizmach. My opracowaliśmy technikę, która była bezpieczna dla pacjentów i świetnie działała.

Praca z 2009 roku otworzyła drzwi również innym zespołom naukowców z całego świata. Zaraz po publikacji zaczęto się na nią powoływać. Obecnie doczekała się ponad pół tysiąca cytowań. Terapia komórkowa zaczęła się rozwijać w logarytmicznym tempie.

Z limfocytami T regulatorowymi Piotr Trzonkowski zetknął się po raz pierwszy przy okazji pracy doktorskiej, gdy nie potrafił zinterpretować, dlaczego starsi ludzie z wysokim poziomem limfocytów T CD4+CD25+ (obowiązuje wtedy fenotyp limfocytów Tregs) nie odpowiadają na szczepienia przeciw grypie. Ekspresja receptora dla stymulującego układu odpornościowy interleukiny 2 sugerowała, że powinni odpowiadać lepiej niż inni. Był przełom roku 1999/2000, a wiedza

na temat tych komórek – bardzo uboga. Same limfocyty Tregs zostały opisane zaledwie pięć lat wcześniej. Olsnienie przyszło w 2001 roku na Kongresie Immunologii w Sztokholmie. Trzonkowski pojechał tam dzięki stypendium FNP. Mała sesja poświęcona tym komórkom zebrała garstkę naukowców, którzy z różnych powodów zetknęli się z nimi i zrozumieli, że to właśnie one decydują o tolerancji immunologicznej. Podczas następnego Kongresu Immunologii w Montrealu w 2004 roku wykłady o komórkach T regulatorowych odbywały się już w salach na kilka tysięcy miejsc.

Najbardziej istotna część badań Piotra Trzonkowskiego w tamtym czasie dotyczyła sposobów interakcji między limfocytami Tregs a innymi komórkami. Młody badacz zwrócił uwagę na to, że duża ilość limfocytów Tregs w materiale przeszczepowym chroni biorcę szpiku przed rozwojem choroby przeszczep przeciw gospodarzowi (GvHD) będącej przyczyną około 30% zgonów po przeszczepie szpiku. To w czasie tych badań pojawił się pomysł, żeby dostarczać limfocyty Tregs pacjentom, którzy mieli GvHD. Ale do realnego podawania Tregs chorym było jeszcze bardzo daleko. Badania te okazały się na tyle interesujące, że Trzonkowski otrzymał pracę jako *postdoc* w jednym z najlepszych labo-

ratoriów zajmujących się tolerancją po przeszczepach – u prof. Kathryn Wood w Oksfordzie. Po powrocie do Polski m.in. dzięki programowi POWROTY FNP Piotr Trzonkowski, już ze swoją przyszłą żoną Natalią Marek, zaczęli praktyczne przygotowania do przeprowadzenia terapii. Trafili na dobry czas, ale praca, której się podjęli, niewątpliwie wymagała dużej odwagi. Ryzyko było ogromne. W 2007 roku pierwsze iniekcje Trzonkowski wykonał na samym sobie, aby przekonać się, czy metoda jest bezpieczna. Największe ryzyko zawsze ponoszą pacjenci. Oni muszą się zgodzić na eksperyment. Restrykcje dotyczące badań klinicznych właśnie dlatego są tak duże. Po nowym gruncie stąpa się ostrożnym krokiem.

Natalia i Piotr Trzonkowsky z zespołem zaczęli od skromnego akademickiego laboratorium, w którym mogli wyprodukować jeden preparat miesięcznie. Było to laboratorium o wysokiej czystości. Po kilkanaście godzin dziennie pracowali w specjalnych skafandrach.

– Byliśmy w tym wszystkim sami – wspominają. – Najpierw razem hodowaliśmy komórki, potem zaczęliśmy to robić na zmianę. Z technik Anitą Dobyszek wielokrotnie rozpoczynaliśmy dzień od mycia podłogi i ścian, a po całym dniu i nocy pracy z komórkami kończyliśmy następ-

nego dnia rano, myjąc zużyty sprzęt, żeby był gotowy do następnych eksperymentów.

Choć przeszli bardzo trudną drogę, na której niejednokrotnie spotykali się z ludzką zawiścią, mieli wokół siebie również wiele życzliwych osób, np. prof. Jacka Bigdę i prof. Andrzeja Myśliwskiego. To oni pomogli zorganizować pierwszą produkcję preparatu Tregs. Za pieniądze z grantu FNP POWROTY zakupili dobry mikroskop, a dzięki wygranemu konkursowi w Ministerstwie Nauki i Szkolnictwa Wyższego ustawili pierwszy profesjonalny sorter do terapii komórkowych. Procedur pracy z krwią uczyli się od Centrum Krwiodawstwa, dzięki dr Jolancie Juścińskiej, która zajmowała się dawcami dla pacjentów. Badania prowadzili z Kliniką Hematologii.

Z dr Marią Bieniaszewską uczyli się, czym praktycznie jest GvHD. A gdy pewnego dnia zabrakło pieniędzy na dalsze badania, prof. Andrzej Hellmann oddał im swoje fundusze statutowe. Wszyscy ci ludzie i wielu innych robili to, rozumiejąc, że wspólnym celem jest pomoc pacjentom.

Dzisiaj w stworzonej przez siebie spółce Trzonkowscy, we współpracy z Europejską Agencją Leków, budują nowoczesną wytwórnię, która będzie obsługiwała badania kliniczne rejestracyjne trzeciej fazy realizowane

w całej Europie i w której produkowanych będzie nawet kilkaset preparatów komórkowych miesięcznie. Wyniki ich badań są publikowane w cenionych pismach naukowych. Natalia Marek-Trzonkowska zajęła się naukowo drugą stroną tego samego medalu – chorobami nowotworowymi. Wiedza dotycząca chorób autoimmunologicznych bardzo jej się przydaje. Rozumie mechanizmy i patrzy na nie z innej perspektywy – zna wroga, który był wcześniej jej przyjacielem. Drogi naukowe Natalii i Piotra Trzonkowskich rozeszły się na chwilę, by wkrótce znów się połączyć – próbują zidentyfikować, co dokładnie rozpoznają komórki autoreaktywne, by w dalszej kolejności móc zahamować tę odpowiedź.

Co dają nam wszystkim badania, którymi zajmuje się para naukowców? Terapie komórkowe i genowe to trzecia wielka rewolucja w medycynie. Pierwszą ponad 100 lat temu były leki drobno-cząsteczkowe – to one zawojowały cały XX wiek. Około 30 lat temu nastąpiła druga rewolucja – zaczęto produkować białka i przeciwciała. Już dziś 20–30% prezentacji na zjazdach naukowych dotyczy właśnie terapii komórkowych. Za 10 lat prawdopodobnie staną się one dla medycyny tym, czym dziś są przeciwciała – odpowiedzią na nierozwiązane problemy medyczne. Wszędzie

tam, gdzie wciąż nie mamy skutecznego leczenia, mogą okazać się rozwiązaniem.

Trzonkowski, P., Bieniaszewska, M., Juścińska, J., Dobyszek, A., Krzystyniak, A., Marek, N., My-

śliwska, J., Hellmann, A. (2009). First-In-Man Clinical Results of the Treatment of Patients with Graft Versus Host Disease With Human Ex Vivo Expanded CD4+CD25+CD127-T Regulatory Cells. *Clinical Immunology*, 133 (1), 22–26.



Tajemnice greckiej uczty

Anna Mateja



**Jaką rolę pełniła
arystokracja w archaicznej
Grecji? Czy to właśnie za
jej sprawą cywilizacja
powstała na wyspach
Morza Egejskiego,
która od VIII wieku
p.n.e. funkcjonowała
w społeczeństwach
zamieszkujących tereny od
wybrzeży Morza Czarnego
po Sycylię, pozostała
spójna mimo podziałów
politycznych i nierówności
społecznych?**

Dr hab. Marek Węcowski z Uniwersytetu Warszawskiego – laureat pogramów FNP KWERENDA (2004) oraz TRANSLACJE (2012, 2019) – stawiania pytań istotnych naukowo nauczył się w szkole intelektualnej polskich starożytników, którą w Instytucie Historycznym jego macierzystej uczelni przez wiele lat współtworzyli prof. Ewa Wipszycka-Bravo i prof. Benedetto Bravo. To oni przekonali młodego historyka, kiedy na początku lat 90. szukał tematu pracy magisterskiej, że realizując pomysły przyczynkarskie albo naukowo poboczne, nigdy nie powie w nauce niczego odkrywczego. Czas musi przeznaczać przede wszystkim na tematy najważniejsze – takie, które w badaniach nad starożytną Grecją są obecne od dawna i zajmowali się nimi najlepsi naukowcy. To po pierwsze. A po drugie, jak twierdzili doświadczeni badacze, młody Węcowski powinien wyjechać na studia za granicą, by jak najwcześniej poznać specyfikę funkcjonowania środowiska naukowego na którejs z najlepszych uczelni.

Ani z pierwszej, ani z drugiej rady nie było łatwo skorzystać w Polsce pierwszych lat transformacji, ale prawdopodobnie bez podjętego wówczas ryzyka – wyjazdu na niełatwy teren obcej uczelni, by zajmować się tematami, którym poświęcili życie najwięksi w jego dziedzi-

nie – Węcowski nigdy nie podjąłby polemiki z prof. Oswynem Murrayem z Uniwersytetu Oksfordzkiego. To najważniejszy badacz Grecji archaicznej i sympozjonu, czyli biesiady arystokratów – ucztę połączonej z rozmowami o polityce, filozofii czy nauce, aranżowanej wyłącznie w męskim gronie. Polski naukowiec poznał Murraya w 1995 roku, kiedy – kończąc studia w École des Hautes Études en Sciences Sociales w Paryżu – został stypendystą rządu francuskiego i wyjechał do Oksfordu. Relacja nauczyciel–uczeń z czasem przerodziła się w koleżeństwo, ale ich kontakty od początku naznaczała polemika, także w postaci artykułów naukowych.

Własne ustalenia na temat natury i genezy sympozjonu Węcowski zebrał w pracy habilitacyjnej opublikowanej w 2011 roku pod wiele mówiącym tytułem *Sympozjon, czyli wspólne picie. Początki greckiej biesiady arystokratycznej (IX–VII wiek p.n.e.)*. Historyk, opierając się na nowych źródłach (które pozwoliły też inaczej popatrzeć na dotychczasowe), zmienił paradygmat myślenia o sympozjonie. Przekonywał, że uczta arystokratyczna to klucz do zrozumienia elit Grecji archaicznej. Jego zdaniem sympozjon nie był tylko sposobem na miłe spędzenie czasu

w nieprzypadkowo dobranym gronie znakomych obywateli *polis*. Zaproszenie do udziału w nim było potwierdzeniem pozycji towarzyskiej osiągniętej dzięki sukcesom naukowym bądź politycznym, wyczynom sportowym czy zgromadzonemu majątkowi (albo dzięki wszystkim tym czynnikom razem wziętym). *De facto* oznaczało formalne potwierdzenie przynależności do elity społecznej, czyli do arystokracji, która jako (bardzo skądinąd otwarta) grupa społeczna od VIII wieku dominowała w *polis*.

Zdaniem Węcowskiego uformowanie się zarówno elity wczesnych dziejów Grecji, jak i środków jej kulturalnego wyrazu (w tym najważniejszego – sympozjonu) było procesem autonomicznym, wynikającym ze specyfiki społeczności miast-państw. Z kolei Murray czy inni badacze tematu uważali te zjawiska za mutacje historyczne powstałe w Grecji archaicznej za sprawą wpływów orientalnych, przede wszystkim z Azji Mniejszej i Lewantu. Węcowski nie podważał tych wpływów, ale jego zdaniem pojawiły się one 100–150 lat później niż zakładał Murray, z czego wynikało m.in. to, że sympozjon stał się biesiadą „leżącą” (była to wyróżniająca cecha tego rodzaju spotkań) dopiero po jakimś czasie. Natomiast sam sympozjon był w greckich *polis* pomysłem oryginalnym i o wiele wcześniejszym.

Autor książki o sympozjonie przekonywał również – już w zgodzie z Murrayem, ale wbrew opinii innych znakomych starożytników – że arystokracja, czyli elita czasów Grecji archaicznej, nie jest zbiorem niepowiązanych ze sobą jednostek lub rodzin skupionych na pokonywaniu indywidualnych ścieżek awansu społecznego. Arystokracja miałaby być samoistnie funkcjonującą grupą społeczną, wartą przez to odrębnych badań i opisu w kategoriach historyczno-społecznych.

Zaistnienie nowych tez dotyczących życia greckiej *polis* od IX do VII wieku p.n.e. w międzynarodowym obiegu naukowym było możliwe nie tylko dlatego, że w 2014 roku książka o sympozjonie ukazała się w przekładzie autora oraz Doroty Dzierzbickiej na język angielski (dofinansowana przez FNP w programie TRANS-LACJE). Tłumaczenie publikacji na język naukowej debaty, którym od kilku dekad, także w humanistyce, pozostaje przede wszystkim angielski, to oczywisty krok, jeśli autorowi zależy, by jego tezy były dyskutowane poza użytkownikami jego języka narodowego. Jednak nowe tezy mają szansę na szybkie wejście do naukowego krwioobiegu, o ile zostaną opublikowane przez wydawnictwo o niekwestionowanej renomie. Tak stało się z książką Marka Węcowskiego, której angielski przekład ukazał się w oficynie

Oxford University Press pt. *The Rise of the Greek Aristocratic Banquet*. O tym, jak okazała się istotna, świadczy kilkanaście recenzji autorstwa liczących się w tej tematyce starożytników oraz miejsce w finale Nagrody im. Sir Stevena Runcimana przyznawanej za najważniejsze prace na temat dziejów i kultury greckiej opublikowane w języku angielskim.

Książka kończy się hipotezami, które nie pozostały jedynie na papierze. Zdaniem ich autora arystokracja, w największym stopniu współtworząca dzieje Grecji archaicznej, pozostawiła po sobie ten kształt jej kultury, który dzisiaj nazywany jest klasycznym. To jej zasługą ma być również spójność historyczna i kulturowa greckiej cywilizacji, jaka powstała w społecz-

nościach równych sobie – przynajmniej z założenia – obywateli mimo tysięcy kilometrów dzielących państwa-miasta i różnorodności bytów politycznych. Szukaniem argumentów na potwierdzenie tak zasadniczo postawionych tez dr Węcowski zajmuje się z gronem starożytników z różnych, także zagranicznych ośrodków badawczych, realizując grant Narodowego Centrum Nauki. Tezy te zalicza do najważniejszych w dotychczasowej pracy. Są dokładnie takie, jakie powinny pojawiać się w nauce: odważne, może nawet brawurowe, ale jedynie one mają szansę powiedzieć coś nowego o zjawiskach badanych od dekad, które tylko pozornie nie skrywają już żadnych tajemnic.

”

Arystokracja, w największym stopniu współtworząca dzieje Grecji archaicznej, pozostawiła po sobie ten kształt jej kultury, który dzisiaj nazywany jest klasycznym.



Trafne i nietrafne pytania

Patrycja Dołowy



**Czy pytania to tylko środki
służące pozyskiwaniu
informacji? Czy można
znaleźć ich wzorce
nadające się do analizy
z wykorzystaniem logiki
formalnej? Czym są dowody
sokratyczne opracowane
przez laureata Nagrody FNP
z 2019 roku?**

Inferencyjna logika pytań opracowana i rozwijana przez prof. Andrzeja Wiśniewskiego z Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu i jego uczniów jest uznawana za jeden z trzech zasadniczych współczesnych paradygmatów w obszarze logiki pytań, obok Interrogative Model of Inquiry Jaakko Hintikka oraz tzw. semantyki inkwizytywnej. Powstawanie pytań, analiza ich struktury i to, jak problemy filozoficzne są ze sobą logicznie powiązane, zaczęło ciekawić naukowca na początku lat 80. XX wieku. Okazało się, że podobną problematyką interesują się największe umysły w jego dyscyplinie. Wybitny logik Jaakko Hintikka swój model, oparty na zupełnie innej aparaturze pojęciowej, tworzył mniej więcej w tym samym czasie. Polak zaczął publikować po angielsku w międzynarodowych czasopismach, nawiązał bezpośrednie korespondencje z badaczami ze świata. Liczył na spotkanie z Hintikką na kongresie w Moskwie w 1987 roku, ale... spóźnił się autobus i nic wtedy z tego nie wyszło.

Udało się kilka lat później, gdy Wiśniewski przebywał w USA na stypendium Fulbrighta. W 1994 roku organizatorzy prestiżowych Boston Colloquia for the Philosophy of Science zaprosili Hintikkę i Wiśniewskiego do przedstawienia swoich koncepcji na jednym ze spotkań. Dyskusja wprawdzie nie doprowadziła

do ujednolicenia poglądów, a jednak to właśnie Hintikka w 1995 roku był wydawcą pierwszej książki Wiśniewskiego – *The Posing of Questions: Logical Foundations of Erotetic Inferences*.

Logikę pytań czasami nazywa się logiką erotetyczną, od greckiego *erotema*, czyli pytanie. Inferencyjna – czyli dotycząca wnioskowań. Są to wnioskowania prowadzące od zdań oznajmujących do pytań, jak również od pytań i zdań oznajmujących do kolejnego pytania. W trzecim rodzaju wnioskowań zarówno przesłanka, jak i wniosek są pytaniami. Logika nie zajmuje się wszelkimi wnioskowaniami, lecz tylko takimi, które są, z jej punktu widzenia, poprawne. Na czym polega ta poprawność? W przypadku pytań – odpowiedź jest trudna. Gdy chodzi o wnioskowania prowadzące od zdań oznajmujących do zdań oznajmujących, intuicja jest jasna: hipotetyczna prawdziwość wszystkich przesłanek gwarantuje prawdziwość wniosku. Jednak pytania nie są ani prawdziwe, ani fałszywe. Możemy natomiast założyć, że są trafne lub nietrafne. Na przykład pytanie: „Która liczba naturalna jest mniejsza od zera?” jest pytaniem nietrafnym, gdyż takiej liczby naturalnej nie ma. A więc każda bezpośrednia odpowiedź na to pytanie będzie fałszywa.

183

”

Pytania nie są ani prawdziwe, ani fałszywe. Możemy natomiast założyć, że są trafne lub nietrafne.

Rok 2001 okazał się szczególnym momentem w karierze naukowej Andrzeja Wiśniewskiego. Badacz miał już za sobą kilka znaczących stypendiów oraz pobytów zagranicznych, a po przekształceniu Wyższej Szkoły Pedagogicznej w Zielonej Górze, której od 1999 roku był rektorem, w Uniwersytet Zielonogórski wycofał się z wszelkich funkcji zarządczych. Otrzymał propozycję złożenia wniosku o subsydium profesorskie w programie FNP MISTRZ. Napisał wniosek „Inferencyjna logika pytań a scenariusze rozwiązywania problemów badawczych”. Pojęcie *scenariusza poszukiwań* było już wtedy znane, chodziło o zajęcie się kwestiami szczegółowymi w ramach inferencyjnej logiki pytań. Fundacja zezwoliła na połączenie subsydium ze stypendium Królewskiej Flamandzkiej Akademii Belgijskiej Nauki i Sztuki. Wiśniewski miał więc, jak mówi, dużo czasu i wymyślił wtedy metodę dowodów sokratycznych.

Pierwsza publikacja w 2004 roku dotyczyła poziomu klasycznego rachunku zdań. Kolejnym krokiem było rozszerzenie metody na całą logikę klasyczną. Przy opracowywaniu tego drugiego zagadnienia współpracował z Wasyliem Shanginem z Moskwy. Oba pobyty rosyjskiego logika w Polsce sfinansowała FNP. W efekcie powstały dwie kolejne publikacje, w tym “Socratic Pro-

ofs for Quantifiers” w *Journal of Philosophical Logic* w 2006 roku. Obecna profesor – Dorota Leszczyńska-Jasion, naukowa wychowanka Wiśniewskiego – podjęła się z kolei opracowania kwestii, jak tę metodę stosować do tzw. logik modalnych, co było podstawą jej pracy doktorskiej. Czym są dowody sokratyczne? Gdy mamy jakiś problem formalny, często stawiamy sobie pytanie, a następnie przekształcamy to pytanie w pytanie, które jest prostsze. Trwa to, dopóki nie dojdziemy do takiego pytania, że właściwie wszystkie jego składowe będą w jakimś sensie oczywiste, np. wniosek: „Czy z A wynika A?”. Dowód sokratyczny jest ciągiem pytań kończącym się tego rodzaju „sukcesem”. Dopuszczalne przekształcenia pytań są wyznaczone przez reguły. Te natomiast są tak dobrane, że z jednej strony każdy krok dowodowy jest poprawnym wnioskowaniem w świetle inferencyjnej logiki pytań, z drugiej natomiast uzyskanie zakończonego sukcesem przekształcenia pytania wyjściowego jest równoznaczne z uzasadnieniem pozytywnej odpowiedzi na to pytanie. Od dowodu sokratycznego można stosunkowo łatwo przejść do dowodu w innym formacie – stąd znaczenie metody dla tzw. *proofsearch* – jednakże nie jest to niezbędne, albowiem sam dowód sokratyczny gwarantuje prawidłowe rozwiązanie problemu.

Inna metoda dowodowa wywodząca się z inferencyjnej logiki pytań – metoda tabel syntetycznych – została zaproponowana w rozprawie doktorskiej przez obecnego profesora – Mariusza Urbańskiego, także wychowanka Andrzeja Wiśniewskiego. Tabele syntetyczne mają bliski związek z jednym z centralnych pojęć inferencyjnej logiki pytań, którym jest tzw. erotetyczny scenariusz poszukiwań. Mówiąc najogólniej, scenariusz taki charakteryzuje rozkład pytania głównego na pytania pomocnicze oraz wskazuje, jakie kolejne pytania pomocnicze należy stawiać wobec uzyskania takich, a nie innych odpowiedzi na wcześniejsze pytania pomocnicze. Scenariusze erotetyczne nie są zestawami reguł heurystycznych, lecz obiektami formalnymi mającymi postać drzew, w których węzły będące pytaniami pozostają w relacji semantycznej leżącej u podstaw logicznie poprawnego wnioskowania prowadzącego od pytania do pytania. Pytania pomocnicze są więc generowane przez inferencyjną logikę pytań, co odróżnia scenariusze erotetyczne od zwykłych drzew decyzyjnych. Każda ścieżka scenariusza kończy się odpowiedzią bezpośrednią na pytanie główne. Pytanie główne, podobnie jak pytania pomocnicze, ma jednak zwykle wiele możliwych odpowiedzi. W efekcie scenariusz stanowi coś

na kształt mapy możliwości, a jego ścieżki pokazują, jakie informacje – jakie odpowiedzi na pytania pomocnicze – powinniśmy uzyskać, aby dojść do poszczególnych alternatywnych rozwiązań problemu wyrażanego przez pytanie główne. Realizując scenariusz, aktywujemy te jego ścieżki, które są wyznaczone przez uzyskiwane odpowiedzi na kolejne pytania pomocnicze, z pominięciem ścieżek zależnych od pozostałych możliwych odpowiedzi. Interesującą własnością scenariuszy erotetycznych jest posiadanie tzw. złotej ścieżki: jeśli pytanie główne jest trafne, tj. posiada prawdziwą odpowiedź bezpośrednią, a wszystkie przesłanki użyte w scenariuszu są prawdziwe, to co najmniej jedna jego ścieżka zawiera wyłącznie trafne pytania pomocnicze oraz prawdziwe odpowiedzi bezpośrednie na zalecane zapytania (*queries*) i w efekcie prowadzi do prawdziwej odpowiedzi bezpośredniej na pytanie główne.

Scenariusze erotetyczne znalazły zastosowania w wielu dziedzinach. Przykładowo: okazały się pomocne w modelowaniu tzw. kooperatywnego stawiania pytań. Wyobraźmy sobie sytuację, że klient przychodzi do biura podróży i chce wykupić wczasy. Nie ma jeszcze jasności, z kim chce jechać ani gdzie. Dobrze by było, żeby agent powiedział,

185

”

Scenariusze erotetyczne znalazły zastosowania w wielu dziedzinach. Przykładowo: okazały się pomocne w modelowaniu tzw. kooperatywnego stawiania pytań.

jakie są opcje. Ale nadal to będzie za mało. Może powiedzieć, jakie te opcje mają zalety i wady. Tylko że klient nie chce być zasypany wszystkimi wadami i zaletami. Agent powinien zapytać o preferencje, o możliwości cenowe itd., a rozmowa powinna się skończyć tym, że klient dostanie konkretne rekomendacje. System komputerowy też może to zrobić, jeśli wie, na czym polegają konkretne przejścia – kiedy pytanie jest pomocne, kooperatywne itd. Każde pytanie, które się tu pojawi, powinno mieć prawdziwą i zarazem użyteczną odpowiedź. To jest kooperatywne odpowiadanie – rodzaj dialogu. Problematykę tę rozwija obecnie uczeń Wiśniewskiego, prof. Paweł Łupkowski.

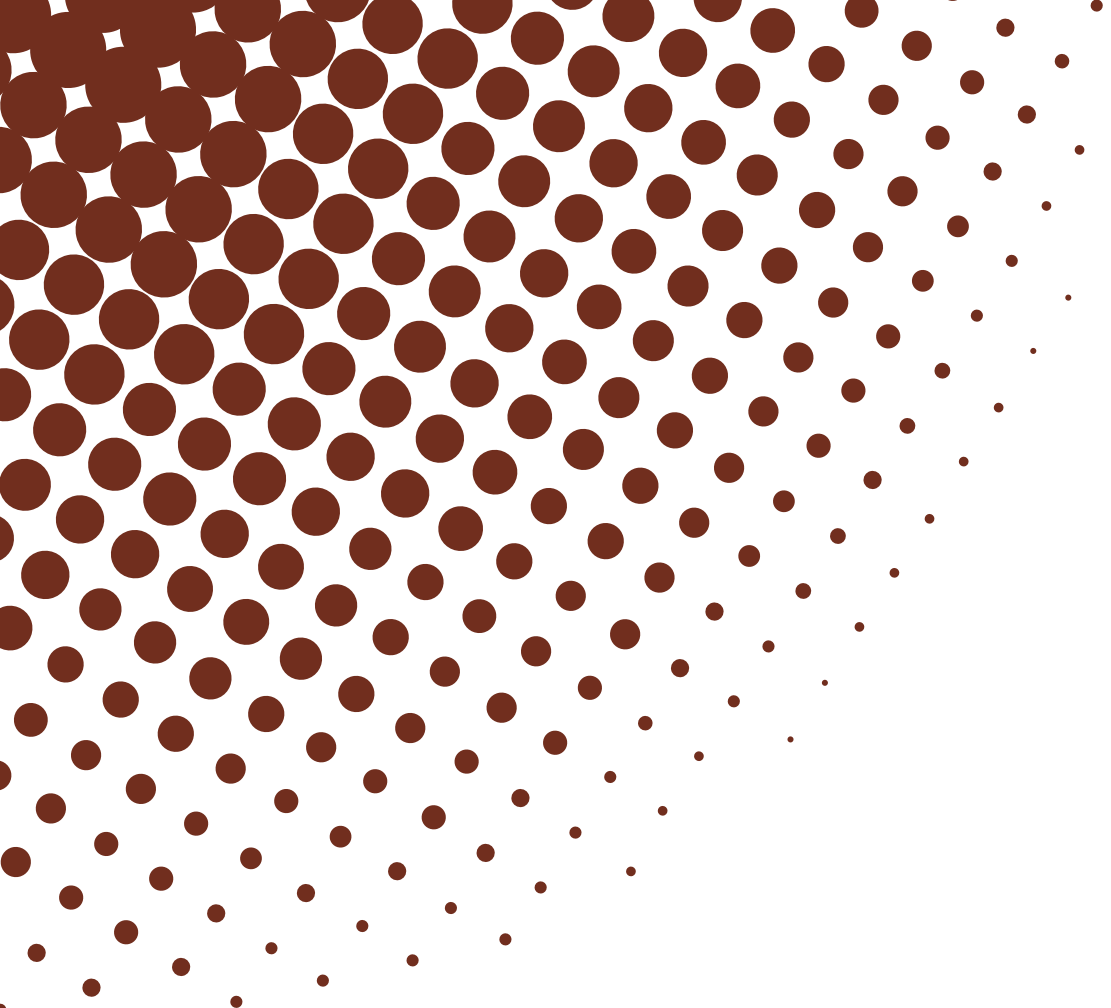
Wyniki prof. Andrzeja Wiśniewskiego i jego zespołu znajdują bardzo różne zastosowania, w tym w informatyce, lingwistyce, metodolo-

gii nauki, ale też w zupełnie nieoczekiwanych dziedzinach, takich jak teoria narracji filmowej, studia nad argumentacją czy nawet antropologia kulturowa. Najważniejsze prace Wiśniewskiego zostały opublikowane w czołowych międzynarodowych czasopismach z zakresu logiki i filozofii analitycznej. Badacz, zapraszany przez organizatorów, prezentował swoje koncepcje na konferencjach i sympozjach w takich ośrodkach jak Amsterdam, Boston, Bruksela, Gandawa, Helsinki, Londyn, Oksford, Paryż czy Rio de Janeiro. Jego osiągnięcia omawiane są w monografiach, podręcznikach i encyklopediach współczesnej logiki filozoficznej, a także epistemologii i metodologii nauk. W 2019 roku za opracowanie koncepcji inferencyjnej logiki pytań prof. Wiśniewski otrzymał Nagrodę FNP.



Klasyk psychologii moralności

Karolina Głowacka



**Co i w jaki sposób wpływa
na oceny moralne siebie
i innych? Czy stosujemy
różne kryteria i czy zdajemy
sobie z tego sprawę? I czy,
wiedząc to wszystko, można
łagodzić spory społeczne?**

Temat był w psychologii intuicyjnie wyczuwany, ale wcześniej nie został opracowany w wiarygodny, naukowy sposób. Prof. Bogdan Wojciszke sięgnął po zagadnienie, przeprowadził wiele badań i sformułował wnioski, które wywinęły go do pozycji klasyka swojej dziedziny. Mowa o modelu dwuwymiarowego ludzkiego poznania społecznego, za którego opracowanie i zweryfikowanie otrzymał w 2016 roku Nagrodę Fundacji na rzecz Nauki Polskiej. Badania nad tą tematyką, prowadzone wspólnie z Andreą Abele, przyniosły mu również Medal Moscoviviego (2017), najwyższe wyróżnienie przyznawane przez European Association of Social Psychology. Było to uhonorowanie ponad dziesięcioletniej współpracy naukowców.

Zanim jednak doszło do sukcesów, musiały pojawić się pasja i determinacja. Bogdan Wojciszke badaczem chciał zostać od zawsze. Jedną z przyczyn była stosunkowo duża – jak na czasy PRL – swoboda pracy naukowców. Dość szybko zainteresował się tematem, który stał się później dominujący w jego pracach. Jeszcze w latach 70., kiedy nie było to wcale oczywiste, zorientował się, że aby uprawiać naukę na poważnie, trzeba czytać i publikować w języku angielskim. Nauczył się tego od prof. Marii Lewickiej i prof. Mirosława Kofty, swoich nieformalnych mentorów. W opi-

nii prof. Wojciszke polska psychologia w ciągu ostatnich dwóch dekad – stawiając właśnie na publikacje w *lingua franca* nauki – w pełni się umiędzynarodowiła i zyskała wpływ na całą dziedzinę. Sam uczony wniósł w ten proces niemały wkład.

Bogdana Wojciszke od początku pracy naukowej interesował problem wieloznaczności świata społecznego, ludzi i ich postępowania. Patrząc na to samo, widzimy (interpretujemy) coś zupełnie innego. Na przykład wychodząc na londyńską Oxford Street, jedni dostrzegają tam zagrożenie, bo niemal każdy przechodzień ma odmienny odcień skóry niż pozostali, co wywołuje w nich niepokój, inni czują ekscytację różnorodnością z dokładnie tego samego powodu. Właśnie ta wieloznaczność stała się centrum naukowej działalności prof. Wojciszke. Badał ją jeszcze w czasie pracy nad doktoratem. W 1990 roku wyjechał na dwuletnie stypendium Fundacji im. Aleksandra von Humboldta na Uniwersytet w Bielefeld. Fundacja, swoim zwyczajem, po 15 latach zaproponowała ponowny wyjazd – tym razem na Uniwersytet w Erlangen-Norymberdze. To tam rozpoczęła się niezwykle owocna współpraca z prof. Andreą Abele.

Tam też dojrzały naukowe idee składające się na model dwuwymiarowego spostrzegania

”
To on pierwszy oryginalnie ustalił, że cudze zachowania osądzamy w kategoriach wspólnotowości (treść celów, po co ktoś coś robi) – oceniając, czy możemy na nich zyskać, czy stracić.

społecznego. Jak opowiada prof. Wojciszke, temat funkcjonował w psychologii jako intuicja.

Wcześniej nie pokazano jednak w badaniach, w jaki sposób ludzie dokonują sądów moralnych. To on pierwszy oryginalnie ustalił, że cudze zachowania osądzamy w kategoriach wspólnotowości (treść celów, po co ktoś coś robi) – oceniając, czy możemy na nich zyskać, czy stracić.

Wobec tego, patrząc na innych, interesujemy się tym, czy ktoś jest dobry, czy zły w sensie zarówno moralnym, jak i społecznym (życzliwy, uczynny bądź przeciwnie). Jesteśmy biorcami skutków czyjegoś zachowania.

Z zaskoczeniem – i pewnym ociąganiem – przyjęto drugą tezę: w postrzeganiu samych siebie kryteria są inne. Siebie oceniamy z perspektywy sprawcy realizującego cele – dlatego własne zachowania osądzamy pod względem sprawczości (skuteczności), rzadko kiedy monitorując, czy są dobre, czy złe. Wszak nieczęsto robimy coś szkodliwego dla nas samych. Ten drugi sposób myślenia rozszerzamy również na naszych bliskich, z którymi się utożsamiamy.

Podkreślić trzeba, że dokonania prof. Wojciszke w omawianym temacie uczyniły zeń osobę współtworzącą nowy paradygmat w psychologii. Prace jego i współpracowników ukazały się

w wielu prestiżowych czasopismach, takich jak: *Journal of Personality and Social Psychology*, *Personality and Social Psychology Bulletin*, *European Review of Social Psychology*, *European Journal of Social Psychology*, *Social Cognition*, *Social Psychological and Personality Science*. W roku 2010 prof. Wojciszke opublikował swoje badania nad dwumiarowością poznania społecznego w obszernej monografii *Sprawczość i wspólnotowość* oraz we wspólnym z Andreą Abele artykule “Communal and Agentic Content in Social Cognition: A Dual Perspective Model” w *Advances in Experimental Social Psychology* (2014). Prace prof. Wojciszke były cytowane łącznie ponad 9 tys. razy (lipiec 2021). Uczony skromnie ocenia, że miał nieco szczęścia, bo jego badania ukazały się tuż przed pojawieniem się fali zainteresowania ocenami moralnymi w psychologii społecznej.

Co ciekawe, sformułowany przez prof. Wojciszke model dwuwymiarowego spostrzegania sprawdził się nie tylko w odniesieniu do oceny pojedynczych osób, ale także w postrzeganiu grup społecznych, organizacji, a nawet marek handlowych. Na przykład firmy *non-profit* są uważane za bardziej wspólnotowe niż efektywne, dlatego powinny one podkreślać sprawczość swoich usług/produktów, gdyż ludzie podejrzewają, że mogą one takie nie być. Efekt widać

również w ocenie przywódców organizacyjnych czy politycznych.

Obecnie naukowiec kontynuuje badania inspirowane opisanym modelem, zajmując się m.in. egocentrycznymi zniekształceniami ocen moralnych. Rzecz w tym, że wierzymy w słuszność i obiektywizm własnych ocen moralnych, traktując je niczym twierdzenia naukowe, co nie może być prawdą, zważywszy, że różne osoby inaczej oceniają te same zachowania. Efekt wynika z faktu, że to, co subiektywnie uważamy za oczywistą prawdę moralną, w istocie jest konstatacją powstającą na mocy dwóch procesów: automatycznych, intuicyjnych, opartych na emocjach i skojarzeniach oraz kontrolowanych, czyli opartych na regułach i przetwarzaniu informacji. Te drugie wymagają wysiłku i namysłu, który rzadko pojawia się w ocenie naszych własnych zachowań.

Co ważne, to jak ocenimy uczynek innej osoby, zależy od tego, czy przynosi nam on zysk. Oszust oszukujący tylko dla siebie jest oceniany negatywnie. Ten sam naciągacz, pozwalający i nam czerpać z czegoś korzyść, zyskuje naszą sympatię i pozytywną, a przynajmniej neutralną ocenę. Badania prof. Wojciszke i współpracowników pokazały, że wystarczy raptem 10 zł zysku, abyśmy zmienili zdanie na czyjś temat.

W dodatku, zwykle nie zdajemy sobie sprawy z rzeczywistych kryteriów naszej oceny.

Przy tym, co wykazały liczne badania profesora, ważniejsze są dla nas emocje niż interesy. Wystarczy, że ktoś wykonuje podobne do nas gesty, staje się w naszych oczach sympatyczniejszy, przez co wykazujemy większą pobłażliwość w ocenach jego zachowania. Kiedy jednak poprosi się o uzasadnienie oceny, konieczność analizy „naprostowuje” osądy zniekształcone emocjami. To ważny fakt, który powinien być brany pod uwagę np. w łagodzeniu konfliktów społecznych. Oparte są one na ostrych ocenach moralnych powodowanych przez emocje. Konieczność uzasadnienia temperowałaby nastroje i umożliwiała zbliżanie stanowisk.

Wszystkie te ustalenia, zmieniające światową psychologię, są oparte na badaniach, które mogły zostać przeprowadzone m.in. dzięki wsparciu FNP. Związki prof. Bogdana Wojciszke z Fundacją są zresztą liczne. W latach 2012–2014 Fundacja wspierała go w ramach subsydium MISTRZ, co pozwoliło na powiększenie zespołu naukowego. W 2016 roku otrzymał wspomniane już najbardziej prestiżowe wyróżnienie: Nagrodę FNP. Rok później, dzięki stypendium wyjazdowemu, spędził półroczny *sabbatical* na

”
Wierzymy
w słuszność i obiektywizm
własnych ocen moralnych,
traktując je niczym twierdzenia
naukowe, co nie może być
prawdą, zważywszy, że różne
osoby inaczej oceniają te same
zachowania.

Uniwersytecie Cambridge. Prof. Wojciszke podkreśla, że tak różnorodne wsparcie było jednym z ważnych czynników, które pozwoliły mu na dokonanie odkryć.

Jak zaznacza badacz, do jego sukcesów naukowych przyczyniło się wiele osób: wspomniana już prof. Andrea Abele, a także dr Wiesław Baryła, dr

Róża Bazińska, dr Olga Białobrzeska, dr Konrad Bocian, prof. Hanna Brycz, prof. Aleksandra Ciślak, dr Natalia Frankowska, prof. Michał Parzuchowski i prof. Aleksandra Szymków-Sudziarska. W większości są to pracownicy Uniwersytetu Humanistycznospołecznego (SWPS), z którym od lat związany jest prof. Wojciszke.



Przypadek rządzi światem

Anna Mateja



**Jak to jest prowadzić
badania nad rozumieniem
praw mechaniki kwantowej
ze świadomością, że
powiedziano na ten temat
już bardzo dużo? I mimo
to zaproponować coś
oryginalnego?**

Prof. Marek Żukowski – fizyk teoretyczny z Uniwersytetu Gdańskiego, laureat wielu programów Fundacji na rzecz Nauki Polskiej, w 2013 roku uhonorowany jej nagrodą – w 1990 roku podczas konferencji w Joensuu we wschodniej Finlandii przeżył moment przełomowy. Wykład Antona Zeilingera, w którym ten zaprezentował wywód – przeprowadzony z Danielem Greenbergerem i Michaeliem Horne’em – na temat konsekwencji wprowadzenia w stan splątania trzech lub więcej cząstek, był dla polskiego fizyka szokiem i nie pozwolił mu zmrużyć oka przez najbliższą noc. Polski badacz odtwarzał więc z pamięci usłyszane rewelacje, rozgryzając szczegóły paradoksu GHZ, jak od tamtej pory nazywano przedstawiony przez trzech uczonych szczególnie stan splątania kwantowego. Rano już wiedział, że w wielofotonowej interferometrii kwantowej jest moc nowych paradoksalnych własności do pokazania. Trzeba tylko znaleźć sposób na splątanie trzech lub więcej fotonów.

Rok później niespełna czterdziestoletni Marek Żukowski, jeszcze przed habilitacją, a już po nawiązaniu współpracy z prof. Zeilingerm, rozpoczął roczny pobyt jako profesor na uniwersytecie w Innsbrucku i postanowił „zapracować się na śmierć”. Przypuszczał, że jeśli ma coś do

powiedzenia w nauce, powinien to zrobić teraz, bo znalazł temat i potrafi podołać związanym z nim trudnościami. Każdego dnia pracował od rana do 17.00, z przerwą na szybki obiad. Ośmiokilometrowa przebieżka wokół pobliskiego lotniska odświeżała umysł, po czym zasiadał ponownie nad kartką papieru z obliczeniami. Nowa dziedzina była jak przzerwana tama, zza której wydobywały się kolejne rezultaty.

Na efekty pracy nie trzeba było długo czekać. W grudniowym numerze *Physical Review Letters* z 1993 roku ukazał się artykuł “Event-Ready Detectors. Bell Experiment Via Entanglement Swapping”¹ autorstwa Żukowskiego, Zeilingera, Horne’a i Artura Ekerta. Publikacja wprowadziła pojęcie *wymiany splątania kwantowego*. Do kwietnia 2021 roku była cytowana niemal 1200 razy. Dzięki niej wykonano wiele eksperymentów, w tym jeden z najważniejszych w dziedzinie teorii informacji kwantowej, czyli teleportację, która – wykorzystując stan splątany cząstek – pozwala na przeniesienie stanu kwantowego na dowolną odległość. Po raz pierwszy wykonał ją Zeilinger. Natomiast Marka Żukowskiego publikacja utwierdziła w przekonaniu, że droga wybrana

¹ Żukowski, M., Zeilinger, A., Horne, M. A., Ekert, A. K. (1993). Event-Ready Detectors. Bell Experiment Via Entanglement Swapping. *Physical Review Letters*, 71, 4287.

”
Fizyk z Gdańska
podążał drogą, na
której pierwsze kroki
postawili uczeni z końca
XIX wieku, obserw-
jący obiekty o małych
masach i rozmiarach,
m.in. atomy.

w 1987 roku, kiedy za namową przyjaciela, Jarosława Pykacza, zajął się splątaniem kwantowym, choć przypadkowa, jest właściwa.

Fizyk z Gdańska podążał drogą, na której pierwsze kroki postawili uczeni z końca XIX wieku, obserwujący obiekty o małych masach i rozmiarach, m.in. atomy. Trudna do wyobrażenia sytuacja, że istnieje świat rządzący się innymi regułami, niż podpowiada używana w makroświecie intuicja czy zdrowy rozsądek, znalazła potwierdzenie w 1925 roku, gdy Werner Heisenberg i Erwin Schrödinger niezależnie od siebie sformułowali teorię mechaniki kwantowej. Wcześniej pionierskie prace teoretyczne na ten temat ogłosili m.in. Albert Einstein czy Niels Bohr.

Dla Marka Żukowskiego kluczowe znaczenie miały te cechy fizyki kwantowej, które pozwalały mu projektować eksperymenty dla sprawdzenia zasad rządzących relacjami między obserwatorem a aktem obserwacji. Zbyteczne byłoby dodawać, że są to zasady fundamentalne. W fizyce kwantowej – inaczej niż w fizyce klasycznej, w której zjawiska istnieją „same z siebie” i niezależnie od samej obserwacji – pomiar nieodwracalnie zmienia informację o badanym obiekcie. Wynik dostarcza więc informacji o nim po wykonaniu

pomiaru, ale nie ze stanu wcześniejszego. By odwołać się do konkretnego przykładu: badacz, który mierzy polaryzację pary maksymalnie splątanych fotonów, np. analizatorami rozdzielającymi polaryzację pionową i poziomą, uzyskuje dla każdego fotonu wynik przypadkowy, więc nieprzewidywalny. Na pewno jednak wynik pomiaru polaryzacji pierwszego fotonu z pary będzie przeciwny do wyniku pomiaru polaryzacji drugiego, gdy mierzymy te same składowe polaryzacji.

Przypadkowe i zawsze wobec siebie przeciwne wyniki to prawidłowość, która nie mogłaby się przydarzyć w świecie zasad elektrodynamiki opisanych przez Jamesa Maxwella w latach 70. XIX wieku. Nie przewidują jej również klasyczny rachunek prawdopodobieństwa ani zasada przyczynowości Einsteina (fizyk ujął ją zdaniem: „Jednoczesne odległe zdarzenia nie mogą bezpośrednio na siebie wpływać”). W jaki sposób przewidywania mechaniki kwantowej różnią się od klasycznego rozumienia realizmu czy intuicji, pokazała praca opublikowana w 1964 roku przez Johna Stewarta Bella, w której pochodzący z Irlandii Północnej fizyk udowodnił, że „żadna lokalna teoria zmiennych ukrytych nie może opisać wszystkich zjawisk fizyki kwantowej”. Zgodnie z twierdzeniem Bella próby wprowadzenia klasycznie rozumianego realizmu do

mechaniki kwantowej są sprzeczne albo z jej prawami, albo z zasadą przyczynowości sformułowaną przez Einsteina.

Marek Żukowski i jego współpracownicy zajęli się tzw. nierównościami Bella, czyli korelacjami wyników pomiarów przeprowadzanych w ramach mechaniki kwantowej z udziałem dwóch cząstek. Wykład prezentujący osiągnięcia Greenbergera, Horne’a i Zeilingera „znokautował” intelektualnie Żukowskiego właśnie dlatego, że po raz pierwszy dokonano rozszerzenia twierdzenia Bella z dwóch cząstek na trzy. Uczeń pokazał też, że im większa liczba splątanych cząstek elementarnych, tym obserwowane zjawiska stają się bardziej nieklasyczne. Żukowski i jego koledzy naukowcy zajęli się więc projektowaniem eksperymentalnych kwantowo-optycznych testów nierówności Bella pozwalających na ukazanie magii korelacji GHZ.

Wyniki okazały się zgodne z fundamentalnymi zasadami teorii kwantowej. W 2009 roku badania doktorantów Żukowskiego, przede wszystkim Marcina Pawłowskiego, doprowadziły do sformułowania nowej zasady fizyki: przyczynowości informacyjnej. Jej oczywiste założenie – wiadomość nie może zapewniać dostępu do większej ilości mierzonej w bitach informacji, niż została w niej zawarta – pozwala na precyzyjne określenie

maksymalnej wartości korelacji kwantowych. To ustalenie ma szansę stać się jedną z prostych zasad fizyki, które prowadzą do rekonstrukcji teorii kwantowej z wykorzystaniem teorii informacji.

Rozwiązywanie zagadek związanych z nierównościami Bella zaowocowało serią artykułów (w tym wspomnianego z 1993 roku). Ich ukoronowaniem była praca „Multiphoton Interferometry and Entanglement” opublikowana w 2012 roku na łamach kwartalnika *Reviews of Modern Physics*. Licząca 71 stron publikacja powstawała pięć lat i miała autorów z dwóch kontynentów. Poza Markiem Żukowskim znaleźli się wśród nich: Jian-Wei Pan, Zeng-Bing Chen, Chao-Yang Lu, Harald Weinfurter i Anton Zeilinger. Najważniejszym wątkiem pracy jest opis wykorzystania wielu źródeł par splątanych fotonów – funkcjonujących niezależnie od siebie, choć synchronicznie – do konstrukcji stanów splątanych trzech i więcej fotonów. Praca istotnie przyczynia się do rozwoju interferometrii wielofotonowej, która stanowi podstawę eksperymentalnych realizacji kwantowych technologii informacyjnych (m.in. teleportacji i kryptografii).

Fortuna imperatrix mundi – twierdzi prof. Żukowski, cytując tytuł pierwszej pieśni

”

Dla Marka Żukowskiego kluczowe znaczenie miały te cechy fizyki kwantowej, które pozwalały mu projektować eksperymenty dla sprawdzenia zasad rządzących relacjami między obserwatorem a aktem obserwacji.

z kantaty scenicznej Carla Orffa. *Carmina Burana* rozbrzmiewa czasami w jego gabinecie podczas przeprowadzania skomplikowanych rozmów z dziedziny mechaniki kwantowej. O wiele częściej króluje jednak *jazz*. Ale nawet gdy w tle słyszać Billa Evansa, tytułowa fortuna z dzieła Orffa pozostaje w mocy. Szczęśliwy traf liczy się bowiem w tej pracy tak samo jak skupienie.

Zwłaszcza że operacje myślowe dotyczą świata paradoksalnego.

Jian-Wei, P., Zeng-Bing, Ch., Chao-Yang, L., Weinfurter, H., Zeilinger, A., Żukowski, M. (2012). Multiphoton Entanglement and Interferometry. *Reviews of Modern Physics*, 84 (2), 777–838.



Kwantowe *sudoku*

współpraca redakcyjna –
Patrycja Dołowy



**Jakie problemy można
rozwiązać przy pomocy
układu baz wzajemnie
nieobciążonych? Jak
wykorzystać własności
symetrii do znalezienia
wyróżnionego pomiaru
kwantowego? Czym gry
kwantowe różnią się od gier
klasycznych?**

Zagadnienia te poruszone zostały przez prof. Karola Życzkowskiego i jego współpracowników w trzech pracach, których powstanie dzieli 10 lat. Wszystkie trzy prace dotyczące wyróżnionych konfiguracji stanów kwantowych prowadzono dzięki wsparciu Fundacji na rzecz Nauki Polskiej.

W teorii kwantowej do opisu układu fizycznego używamy pojęcia *stanu kwantowego*, czyli matematycznego narzędzia pozwalającego obliczać prawdopodobieństwo uzyskania wyniku danego pomiaru. W najprostszym przypadku jest to wektor o jednostkowej długości poruszający się po powierzchni sfery zwanej *sferą Blocha*. Układ klasyczny, zawierający jeden bit (*binary unit*) informacji, może przyjmować jedynie wartości 0 lub 1, którym odpowiadają bieguny sfery: północny N odpowiadający stanowi 0 oraz biegun południowy S ze stanem 1. W układzie klasycznym wektor wskazujący stan układu może znaleźć się tylko w położeniu „w górę” lub „w dół”, podobnie jak podrzucona moneta, która może upaść albo orłem, albo reszką do góry. Inny przykład układu z dwoma możliwymi stanami to przewodnik elektryczny: prąd w przewodniku płynie lub nie.

W teorii kwantowej dozwolone są wszystkie stany superpozycji – znany kot Schrödingera

może być trochę martwy, a trochę żywy. Stany układu dwupoziomowego, nazywanego kubitem (*quantum bit*), odpowiadają dowolnemu punktowi sfery. Dlatego wektor wodzący, opisujący stan kubitu, wyobrażany przez ołówek trzymany za jego koniec, przyjmuje dowolne położenie na sferze. Dwa stany kwantowe są rozróżnialne, gdy są ortogonalne, co odpowiada różnym stanom klasycznym, a więc dwóm ołówkom trzymanym w górę i w dół. Wymiar przestrzeni odpowiada liczbie rozróżnialnych wyników pomiaru i wynosi $n = 2$ dla rzutu monetą (dwie strony monety) oraz $n = 6$ dla rzutu kostką (sześć ścianek kostki).

Zbiór n wzajemnie rozróżnialnych stanów kwantowych tworzy bazę ortogonalną. Z punktu widzenia mechaniki kwantowej ciekawe są konstelacje stanów kwantowych, które definiują pomiary kwantowe o szczególnych własnościach symetrii. Do takiej klasy należą bazy wzajemnie nieobciążone (*mutually unbiased bases* – MUB) pozwalające na wykonanie kwantowego pomiaru z dużą dokładnością. Nietrudno wykazać, że w przestrzeni n -wymiarowej nie może istnieć więcej niż $n + 1$ takich baz. Układ MUB dla jednego kubitu ($n = 2$) składa się z trzech baz reprezentowanych przez trzy pary antypodalnych

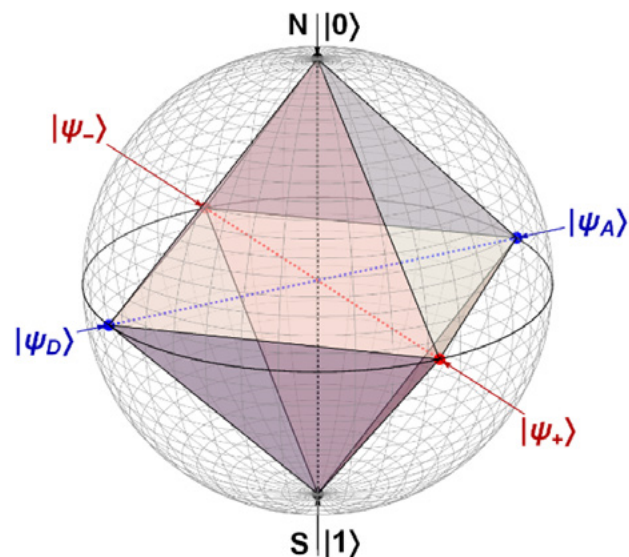
”

W teorii kwantowej dozwolone są wszystkie stany superpozycji – znany kot Schrödingera może być trochę martwy, a trochę żywy.

(na dwóch przeciwległych biegunach) punktów na sferze. W języku wektora wodzącego przedstawianego przez wirujący ołówek, jeśli weźmiemy $2 * 3 = 6$ ołówków, z których każde dwa różniące się zwrotem odpowiadają jednej bazie, to ich otoczka wypukła daje ośmiościan foremny rozpięty na sześciu wierzchołkach – patrz rys. 1. W geometrii taka figura znana jest od czasów Platona, a w ciągu ostatnich lat znalazła także zastosowanie w mechanice kwantowej.

W pracy “On Mutually Unbiased Bases”¹ opublikowanej w *International Journal of Quantum Information* w 2010 roku autorzy analizowali układy baz wzajemnie nieobciążonych dla wyższych wymiarów, przedstawiając ich klasyfikację dla przypadków $n = 3, 4, 5, 7$. Takie konstelacje stanów wyznaczają pomiar kwantowy o szczególnie korzystnych własnościach. W tej szeroko cytowanej publikacji autorzy omówili także najciekawszy przypadek, $n = 6$, dla którego znane są konfiguracje jedynie trzech baz MUB. Ponieważ w tym przypadku górne ograniczenie daje $6 + 1 = 7$ baz, to wyznaczenie maksymalnej liczby baz nieobciążonych w tym wymiarze pozostaje ważnym problemem otwartym.

¹ Durt, T., Englert, B.-G., Bengtsson, I., Życzkowski, K. (2010.) On Mutually Unbiased Bases. *International Journal of Quantum Information*, 8, 535–640.



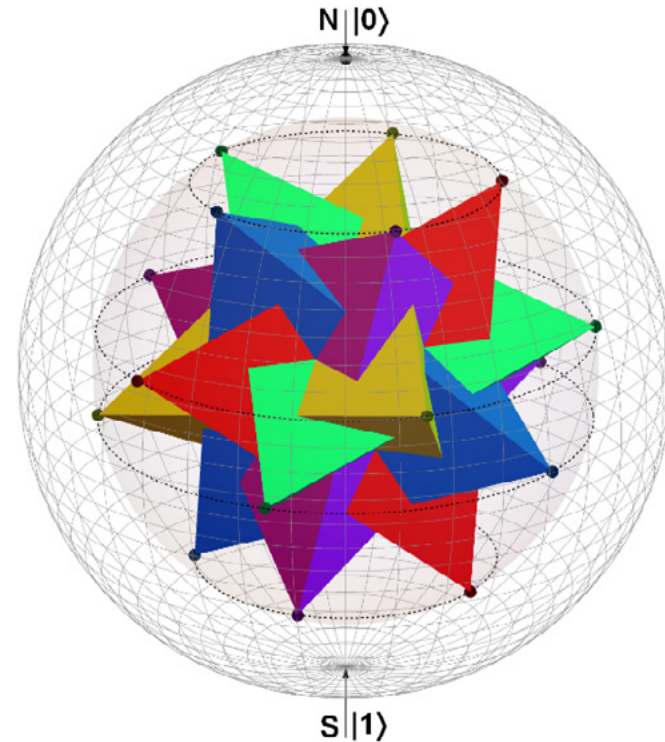
Rys. 1. Trzy bazy składające się z dwóch punktów antypodalnych na sferze tworzą układ MUB dla wymiaru $n = 2$.

Artykuł “Iso-Entangled Mutually Unbiased Bases, Symmetric Quantum Measurements and Mixed-State Designs”² (autorzy: Jakub Czartowski, Dardo Goyeneche, Markus Grassl, Karol Życzkowski) opublikowany w *Physical Review*

² Czartowski, J., Goyeneche, D., Grassl, M., Życzkowski, K. (2020). Isoentangled Mutually Unbiased Bases, Symmetric Quantum Measurements and Mixed-State Designs. *Physical Review Letters*, 124 (9).

Letters dotyczy zagadnienia baz nieobciążonych dla przypadku $n = 4$ traktowanego jako układ dwóch kubitów. W pracy znaleziono konfigurację 20 stanów w tym wymiarze o tym samym stopniu kwantowego splątania, które tworzą pełny zestaw pięciu baz nieobciążonych. Dzięki temu wszystkie stany mogą być utworzone z jednego stanu wzorcowego poprzez transformacje lokalne, co może ułatwić ich doświadczalną realizację. Cały układ można przedstawić przy pomocy innej figury Platona – dwunastościanu foremnego umieszczonego wewnątrz sfery Blocha. Wygodnie jest rozłożyć ją na pięć czworościanów foremnych. Każdy czworościan, przedstawiony na rys. 2 w innym kolorze, odpowiada jednej bazie w czterech wymiarach, która po zredukowaniu do dwóch daje cztery wierzchołki czworościanu równo oddalone od środka sfery.

Wzajemne nieobciążenie baz uwidacznia się w fakcie, że wszystkie pary czworościanów przenikają się symetrycznie. Każdy z $5 \cdot 4 = 20$ stanów określających cały układ pomiarowy udało się wyznaczyć analitycznie. Dzięki temu wykazano, że ten zbiór 20 stanów tworzy *deseń kwantowy* o szczególnej symetrii i specjalnych własnościach. Uzyskane wyniki są istotne zarówno z punktu widzenia podstaw mechaniki kwantowej, jak i teorii przetwarzania informacji kwantowej.



203

Rys. 2. Pięć baz nieobciążonych dla $n = 4$ o tym samym stopniu kwantowego splątania, po zredukowaniu do jednego podukładu, tworzy pięć przenikających się czworościanów foremnych wpisanych w sferę (rys. J. Czartowski).

– W historii nauki pojawiało się wiele płodnych idei, o zastosowaniu których w momencie ich powstawania nie można było wiele powiedzieć

”
W historii nauki
pojawiało się wiele
płodnych idei, o zasto-
sowaniu których w mo-
mentcie ich powstawania
nie można było wiele
powiedzieć – podkreśla
Karol Życzkowski.

– podkreśla Karol Życzkowski. Znaczny dział praktycznej matematyki dotyczący rachunku prawdopodobieństwa swe początki bierze z analizy wielokrotnych rzutów monetami oraz gry w kości. Problemy kluczowe dla francuskich oficerów grających w gry hazardowe były ciekawe także dla Pascala: „Jakie reguły gry są rozsądne i dają równe szanse na wygraną?”.

Wraz z rozwojem teorii kwantowej nasuwa się pytanie, jak zmieniają się szanse na wygraną, jeśli w grze zamiast zwykłych monet z dwoma stronami użyjemy *monet kwantowych*, które oprócz stanów $0 = \text{orzeł}$ i $1 = \text{reszka}$ mogą przyjmować stany superpozycji odpowiadające dowolnym punktom sfery Blocha. Na styku mechaniki kwantowej, rachunku prawdopodobieństwa i teorii gier pojawiła się niedawno dziedzina zwana *quantum games*. Jej celem jest zbadanie, jak zmieniają się warunki gry, jeśli gracze mogą stosować strategie kwantowe. Podobny status ma pokrewna dziedzina *quantum finances*, analizująca rynki finansowe przy (mało dziś realistycznym) założeniu, iż gracze giełdowi mogą także stosować strategie kwantowe, a w ich portfelu znajdują się superpozycje kupionych i sprzedanych akcji różnych spółek.

W niedawnej pracy “Genuinely Quantum SudoQ and Its Cardinality”³ Karol Życzkowski ze współpracownikami (Jerzym Paczosem, Marcinem Wierzbinińskim, Grzegorzem Rajchel-Mieldziociem i Adamem Burhardtem) opisują kwantowe desenie *sudoku*. W klasycznym *sudoku* każdy symbol w każdym wierszu, kolumnie i bloku kwadratu musi być inny. W kwantowej wersji gry, zwanej *SudoQ*, wykorzystuje się dowolne stany kwantowe przy założeniu, że wszystkie stany w każdym wierszu, kolumnie i bloku tworzą bazę ortogonalną – patrz rys 3. Przedstawiona klasyfikacja takich układów dla wymiaru $n = 4$ daje oryginalne schematy pomiarów kwantowych i może znaleźć zastosowania w rozwoju sztucznej inteligencji oraz kwantowego uczenia maszynowego.

Durt, T., Englert, B.-G., Bengtsson, I., Życzkowski, K. (2010). On Mutually Unbiased Bases. *International Journal of Quantum Information*, 8, 535–640.

³ Paczos, J., Wierzbiniński, M., Rajchel-Mieldzioć, G., Burhardt, A., Życzkowski, K. (2021). Genuinely Quantum SudoQ and Its Cardinality. *Physical Review A*, 104 (4).

a)

1	2	3	4
3	4	1	2
2	1	4	3
4	3	2	1

b)

$ 1\rangle$	$ 2\rangle$	$ 3\rangle + 4\rangle$	$ 3\rangle - 4\rangle$
$ 3\rangle$	$ 4\rangle$	$ 1\rangle - 2\rangle$	$ 1\rangle + 2\rangle$
$ 2\rangle + 4\rangle$	$ 1\rangle - 3\rangle$	$ 1\rangle + 2\rangle + 3\rangle - 4\rangle$	$ 1\rangle - 2\rangle + 3\rangle + 4\rangle$
$ 2\rangle - 4\rangle$	$ 1\rangle + 3\rangle$	$ 1\rangle + 2\rangle - 3\rangle + 4\rangle$	$ 1\rangle - 2\rangle - 3\rangle - 4\rangle$

Rys. 3. Przykłady małego sudoku w kwadracie o boku $n = 4$: a) rozwiązanie klasyczne na motywach konika szachowego; b) wersja kwantowa *SudoQ* z 16 różnymi stanami tworzącymi $4 * 3 = 12$ różnych baz ortogonalnych w wymiarze $n = 4$. Dla czytelności rysunku stanów kwantowych nie normalizowano.

O autorkach



fot. Piotr Komorowski

dr Patrycja Dołowy

popularyzatorka nauki i sztuki, dziennikarka naukowa, pisarka. Członkini Rady Upowszechniania Nauki przy Prezydium PAN, kierowniczka BioCentrum Edukacji Naukowej, wykładowczyni na Wydziale Artes Liberales UW. Laureatka kilku nagród, w tym Nagrody im. Karola Sabatha za najlepszy tekst popularnonaukowy w polskich mediach w 2011 roku. Z wykształcenia doktor nauk przyrodniczych.

207



fot. Mikołaj Starzyński

Karolina Głowacka

dziennikarka Radia TOK FM, autorka podcastu Radio Naukowe, współautorka książek popularnonaukowych. Członkini Komitetu Etyki w Nauce PAN. Wyróżniona w konkursie Popularyzator Nauki organizowanym przez PAP i MEiN w 2016 roku.



fot. Artur Strzelecki

Anna Mateja

dziennikarka, współpracowniczka miesięcznika „Znak”. Autorka książek: *Co zdążysz zrobić, to zostanie. Portret Jerzego Turowicza* (Znak, 2012), *Serce pasowało. Opowieść o polskiej transplantologii* (Czarne, 2016), *Recepta na adrenalinę. Napoleon Cybulski i krakowska szkoła fizjologów* (Czarne, 2019), *Poznawanie Kępińskiego. Biografia psychiatry* (Wydawnictwo Literackie, 2019). Opracowała trzytomową edycję *Pism wybranych Jerzego Turowicza* (Universitas, 2013). Mieszka w Krakowie. Laureatka m.in. nagrody dziennikarskiej Grand Press w kategorii wywiad (2007) i Nagrody im. Jana Jędrzejewicza za najlepszą książkę popularnonaukową (2020).