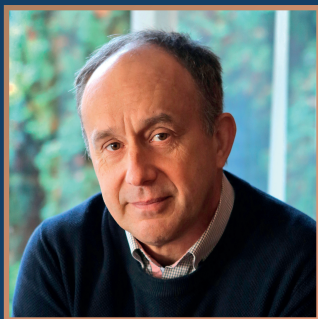




2021

Laureaci Nagród
Fundacji na rzecz
Nauki Polskiej



Fundacja na rzecz
Nauki Polskiej

2021

Laureaci Nagród

Fundacji na rzecz
Nauki Polskiej

*Wspierać najlepszych,
aby stali się jeszcze lepsi*

Warszawa 2021

Nagrodę FNP mogą otrzymać: uczeni, których odkrycia zostały dokonane w Polsce, naukowcy pracujący poza granicami Polski pod warunkiem, że ich osiągnięcie zostało potwierdzone publikacjami afiliowanymi w polskiej jednostce, oraz uczeni, których odkrycie dotyczyło problematyki polskiej.

Nagrody są przyznawane w czterech obszarach: nauk o życiu i o Ziemi, nauk chemicznych i o materiałach, nauk matematyczno-fizycznych i inżynierskich oraz nauk humanistycznych i społecznych. Przyznaje je Rada FNP. Wysokość nagrody dla jednego laureata wynosi 200 tys. zł.

W roku 2021 Nagrody FNP zostały przyznane po raz trzydziesty.

Grono laureatów, łącznie z tegorocznymi nagrodzonymi, liczy obecnie 110 osób.

Dzięki towarzyszącemu Nagrodom Fundacji zainteresowaniu środowiska naukowego i mediów osiągnięcia laureatów Nagród FNP zyskują społeczne uznanie, przyczyniając się tym samym do promocji i budowania prestiżu polskiej nauki.

Chcielibyśmy, aby laureaci, ich zaangażowanie w pracę badawczą i konsekwencja w realizowaniu powołania uczonego stanowiły wzór oraz inspirację dla wszystkich pokoleń naukowców.

**L A U R E A C I
N A G R Ó D
F N P
2 0 2 1**

W OBSZARZE NAUK O ŻYCIU I O ZIEMI:

Prof. Bożena Kamińska-Kaczmarek

z Instytutu Biologii Doświadczalnej im. M. Nenckiego PAN

za odkrycie mechanizmów, które powodują, że glejaki złośliwe tak przeprogramowują komórki odpornościowe, aby wspierały rozwój tych nowotworów mózgu

W OBSZARZE NAUK CHEMICZNYCH I O MATERIAŁACH:

Prof. Jacek Jemielity

z Centrum Nowych Technologii Uniwersytetu Warszawskiego

za opracowanie chemicznych modyfikacji mRNA jako narzędzi do zastosowań terapeutycznych i badań procesów komórkowych

W OBSZARZE NAUK MATEMATYCZNO-FIZYCZNYCH I INŻYNIERSKICH:

Prof. Grzegorz Pietrzyński

z Centrum Astronomicznego im. M. Kopernika PAN w Warszawie

za precyzyjne wyznaczenie odległości do Wielkiego Obłoku Magellana

W OBSZARZE NAUK HUMANISTYCZNYCH I SPOŁECZNYCH:

Prof. Cezary Cieśliński

z Wydziału Filozofii Uniwersytetu Warszawskiego

za rozwiązanie kluczowych problemów deflacionistycznej teorii prawdy



Prof. Bożena Kamińska-Kaczmarek

Laureatka Nagrody FNP 2021
w obszarze nauk o życiu i o Ziemi
za odkrycie mechanizmów,
które powodują, że glejaki złośliwe
tak przeprogramowują komórki
odpornościowe, aby wspierały
rozwój tych nowotworów mózgu

Urodziła się w 1961 roku w Bielsku Podlaskim. Studia na Wydziale Biologii Uniwersytetu Warszawskiego ukończyła w 1985 roku, po czym rozpoczęła doktorat w dziedzinie biochemii w Instytucie Biologii Doświadczalnej im. M. Nenckiego PAN. Obroniła go w 1991 roku. W 1997 roku w tejże placówce uzyskała stopień doktora habilitowanego. Tytuł profesora nauk biologicznych uzyskała w 2003 roku. Jest pionierką badań nad oddziaływaniem guzów mózgu na lokalny układ odpornościowy.

Prof. Bożena Kamińska-Kaczmarek specjalizuje się w biologii molekularnej i neurobiologii. Obecnie pracuje w Instytucie Biologii Doświadczalnej im. M. Nenckiego PAN w Warszawie. Jest kierownikiem nowego Laboratorium Neurobiologii Molekularnej w Centrum Neurobiologii tegoż Instytutu i dyrektorem Studium Medycyny Molekularnej Warszawskiego Uniwersytetu Medycznego oraz członkinią korespondentką Polskiej Akademii Nauk.

Była związana z wieloma zagranicznymi ośrodkami naukowymi. Staż podoktorski odbywała w kanadyjskim McGill University, współpracowała m.in. z amerykańskim Brain Research Institute UCLA, była profesorem wizytującym na Uniwersytecie Medycznym w Guangzhou.

Realizowała ponad 44 krajowe i międzynarodowe granty badawcze. Wśród nich granty Narodowego Centrum Nauki (Maestro, Harmonia, Symfonia, OPUS), Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (Strategmed 1, 2, 3), Fundacji na rzecz Nauki Polskiej (Mistrz, Team-Tech Core Facility), a także międzynarodowe: grant NATO, subsydia Unii Europejskiej w dwóch Programach Ramowych i granty ERANET. Wypromowała 27 doktorów, 3 doktorów habilitowanych i 10 magistrów.

Ma w dorobku 134 publikacje naukowe (m.in. w "Nature Communications" i "Cell"), 10 rozdziałów w książkach naukowych, ponad 6 tys. cytowań i indeks Hirscha sięgający 42.

Za pracę naukową została uhonorowana licznymi nagrodami, m.in.: Nagrodą Prezesa Rady Ministrów za wybitną habilitację, Srebrnym Krzyżem Zasługi, Złotym Krzyżem Zasługi, Krzyżem

Kawalerskim Orderu Odrodzenia Polski, Krzyżem Oficerskim Orderu Odrodzenia Polski, Medalem Komisji Edukacji Narodowej.

Prof. Bożena Kamińska-Kaczmarek otrzymała Nagrodę Fundacji na rzecz Nauki Polskiej za odkrycie mechanizmów, za pomocą których komórki układu odpornościowego, zarówno te rezydujące w mózgu (mikroglej), jak i migrujące z krwi, zamiast niszczyć glejaka (nowotwór mózgu), wspierają jego rozwój.

Złośliwy glejak to najczęstszy nowotwór mózgu, który ze względu na szybkie rozprzestrzenianie się w mózgu jest trudny do usunięcia chirurgicznego i bardzo odporny na standardową terapię, zwłaszcza w przypadku starszych pacjentów.

Mikroglej z kolei to komórki odpornościowe stale obecne w ośrodkowym układzie nerwowym, które wspierają jego prawidłowe działanie i uczestniczą w procesach ochrony przed patogenami, inicjując odpowiedź odpornościową organizmu. Ich udział we wspieraniu rozwoju glejaka nie był wcześniej poznany.

Profesor Kamińska-Kaczmarek zajmuje się zróżnicowaniem środowiska guzów mózgu oraz wpływem mikrogleju i innych komórek układu odpornościowego (makrofagów) nagromadzających się w guzie na progresję nowotworu. To nowatorskie podejście, bo wcześniej naukowcy powszechnie uważali, że mikroglej gromadzi się w guzie, aby zwalczać nowotwór.

Prace polskiej badaczki wykazały, że nowotwór produkuje sygnały, które zmieniają właściwości mikrogleju i powodują, że komórki te, zamiast zwalczać nowotwory, wspierają rozwój guza, blokując też odpowiedź przeciwnowotworową. To odkrycie otworzyło nową drogę w dziedzinie badań nad guzami mózgu, a wiele laboratoriów na całym świecie rozpoczęło prace nad biologią mikrogleju w guzach mózgu i przerzutach do mózgu.

Prof. Kamińska-Kaczmarek szczegółowo opisała proces aktywacji mikrogleju przez komórki glejaka. Okazało się, że podczas gdy patogeny wywołują odpowiedź zapalną mobilizującą

układ odpornościowy, w przypadku glejaka tak się nie dzieje. Głojak przeprogramowuje działanie mikrogleju i zmienia funkcje komórek odporności. Aktywowany jest inny zestaw genów i czynników zaangażowanych w migrację i różnicowanie komórek układu odpornościowego w taki sposób, że układ ten zaczyna działać wadliwie.

Kolejne badania kierowane przez prof. Kamińską-Kaczmarek pokazały, że jednym z zadań zmienionego mikrogleju w glejaku jest wydzielanie enzymów, które rozcinając macierz pozakomórkową, ułatwiają migrację komórek nowotworowych. Dlatego guz stale się rozprzestrzenia i trudno go zoperować. Badania pokazały również, że w środku guza gromadzą się też inne komórki: makrofagi powstałe z monocytów z krwi obwodowej. One również blokują prawidłową odpowiedź odpornościową.

Dokonania laureatki Nagrody FNP już przyczyniły się do opracowania zaawansowanych terapii w leczeniu glejaka i mogą dać początek kolejnym. Celując w różne populacje makrofagów, można będzie w przyszłości zahamować rozwój guza lub odpowiednio zmobilizować układ odpornościowy chorego do walki, by mógł pokonać nowotwór. W tym celu prof. Kamińska-Kaczmarek pracuje m.in. nad specjalistyczną platformą do kompleksowej diagnostyki i spersonalizowanej terapii w neuroonkologii.

Odkrycia prof. Bożeny Kamińskiej-Kaczmarek mają znaczenie nie tylko w leczeniu glejaków, wadliwe działanie mikrogleju występuje również w chorobie Alzheimera. Mogą więc zostać wykorzystane w badaniach nad różnorodnymi zaburzeniami neurologicznymi i neurodegeneracyjnymi.

Z prof. Bożeną Kamińską- -Kaczmarek rozmawia Patrycja Dołowy

PATRYCJA DOŁOWY: Jest Pani pionierką badań nad oddziaływaniem guzów mózgu na komórki odpornościowe. Jaka była Pani droga do nagrodzonego odkrycia?

BOŻENA KAMIŃSKA-KACZMAREK: Były dwa główne powody, dla których zajęłam się tym zagadnieniem. Początkowo interesowałam się mechanizmem śmierci komórek. Chodziło między innymi o to, żeby znaleźć związki chemiczne, które mogą uśmiercić komórki glejaka wyizolowane z organizmu i hodowane w laboratorium. Próbowalam zrozumieć, jak można uśmiercić glejaka. Z drugiej strony prowadziłam badania nad mikroglejem, czyli komórkami odpornościowymi w mózgu, odpowiedzialnymi za rozpoznawanie i zwalczanie infekcji, naprawianie uszkodzeń po urazach i wspieranie działania neuronów. Mikroglej produkuje toksyczne cząsteczki, aby zwalczyć zagrożenie i przyciąga komórki układu odpornościowego z organizmu po to, żeby naprawiały uszkodzenie. Aktywuje się nadmiernie po udarze, uszkodzeniu mechanicznym, w chorobie Alzheimer'a i wywołuje stan długotrwałego zapalenia, działając szkodliwie.

Kiedy zaczęliśmy badać mikroglej w guzach mózgu, okazało się, że guzy, zwłaszcza złośliwe, są pełne komórek aktywowanego mikrogleju. W tym okresie pojawiały się pierwsze prace mówiące, że w glejakach układ odpornościowy nie działa prawidłowo. Czyli nagromadzanie się mikrogleju w guzie nie było częścią odpowiedzi układu odpornościowego przeciwko

nowotworowi. Zadaliśmy sobie pytanie, co w takim razie te komórki w guzie robią. Dzięki pierwszemu polsko-niemieckiemu projektowi finansowanemu przez Komitet Badań Naukowych, który realizowaliśmy z profesorem Helmutem Kettenmannem z Max Delbrück Center w Berlinie, zbadaliśmy, jak te komórki się zachowują. Żeby to zrobić, musieliśmy wymyślić nowe systemy doświadczalne. Jako pierwsi pokazaliśmy, że jeżeli hodujemy komórki glejaka w obecności mikrogleju, to choć są one oddzielone od siebie barierą i bez kontaktu bezpośredniego, to inwazyjność komórek glejaka wzrasta dwukrotnie. Wykorzystując modele zwierzęce, wykazaliśmy, że jeżeli usuniemy mikroglej, guz przestaje rosnąć.

Już to było przetomowym odkryciem!

Później inni badacze potwierdzili nasze wyniki w bardziej wyrafinowany sposób, stosując metody genetyczne. W dalszych badaniach odkryliśmy, co produkuje glejak, aby przyciągać i przeprogramować mikroglej i jak te komórki wspierają wzrost glejaka w warunkach hodowli laboratoryjnej oraz w mózgu zwierząt z glejakiem. Środowisko, w którym rozwija się glejak, okazało się jeszcze bardziej skomplikowane. Gdy zaczęliśmy izolować mikroglej z glejaków i sprawdzać, co się w nich dzieje, okazało się, że w guzie znajduje się nie tylko mikroglej, ale też inne komórki odpornościowe, które z całego organizmu wędrują do guza i na miejscu są przekształcane w komórki wspierające nowotwór.

Niestychane!

Nawet nie wiedzieliśmy, jak nazwać to zjawisko. Nikt tego wcześniej nie opisał. Używaliśmy określenia przeprogramowanie, bo komórki odpornościowe, takie jak mikroglej i makrofagi, mają za zadanie wspierać i utrzymywać prawidłowe funkcje organizmu. A my pokazaliśmy, że glejak nie tylko je do siebie przyciąga, ale też całkowicie zmienia ich funkcjonowanie. Wtedy wprowadziliśmy w naszej pracowni metody, które pozwalały

badać tysiące genów naraz i pokazaliśmy, że to jest kompletnie inny program niż ten, który jest aktywowany w komórkach mikrogleju infekcją bakterii czy udarem mózgu. Zdaliśmy sobie sprawę, że mamy do czynienia z nowym programem. Musieliśmy wytłumaczyć, na czym on polega i jak jest uruchamiany. Zaczęliśmy więc szukać białek wywołujących takie zachowanie komórek odpornościowych.

Białek produkowanych przez glejaka?

Okazało się, że glejak produkuje takie białka, które normalnie służą w organizmie jako sygnał do mobilizacji układu odpornościowego do naprawy. Tego typu białek w guzie w ogóle nie powinno być, bo naturalnie nie występują one w mózgu. Natomiast glejak zaczyna je produkować w dużej ilości, zmieniając jednocześnie ich właściwości. Produkowane przez glejaka cząsteczki mobilizują komórki odpornościowe, ale nie indukują odpowiedzi zapalnej. Czyli glejak wykorzystuje sygnał używany w organizmie do mobilizacji komórek układu odpornościowego, lecz na swój sposób. Wydobywa z nich tylko aktywność niesienia pomocy – sobie. Mówi się, że nowotwór jest „niegojącą się raną”. Zwykle, gdy w organizmie jest rana, komórki otaczające starają się uszkodzenie naprawić i jednocześnie, jeśli to jest nieduże uszkodzenie, wysyłają sygnał do organizmu, że nie dzieje się nic złego, że komórki sobie poradzą i nie trzeba mobilizować całej obrony odpornościowej. Taką sytuację „wykorzystuje” glejak.

„Pomysłowe” rozwiązanie...

Guz wykorzystuje programy, które mu służą – wspierają jego rozrost, powodując często całkowitą blokadę układu odpornościowego i odpowiedzi przeciwnowotworowej. Guz rozrasta się w mózgu kosztem neuronów, więc powinno to być uszkodzenie zauważone przez organizm, a jednak nie wywołuje ono odpowiedzi układu odpornościowego. Limfocyty (czyli komórki wyspecjalizowane w działaniu przeciwnowotworo-

wym) praktycznie nie migrują do złośliwych glejaków – tak silne są lokalne sygnały hamujące ich napływ.

Mając tę wiedzę, można opracować skuteczną terapię?

Dzięki wynikom naszych badań i rozumieniu mechanizmów działających w mikrośrodowisku glejaków wiemy, że jeśli zablokujemy oddziaływanie glejaka z mikroglejem, wzrost guza zostaje zahamowany. Jeżeli zablokujemy produkcję tych cząsteczek, które wywołują przeprogramowanie, całkowicie hamujemy wzrost guza u zwierząt. Taki wynik osiągamy w mysich modelach glejaka. Za pomocą jednej mikrocząsteczki blokujemy „komunikację” glejak–środowisko i nagle środowisko się budzi, układ odpornościowy się aktywuje i glejak zostaje pokonany.

To bardzo obiecujące!

Tak, tylko że terapii genetycznej u ludzi nie da się łatwo zastosować, bo trudno wyłączyć gen w nowotworze. Szukamy więc środków farmakologicznych, które mogłyby zablokować działanie tych cząsteczek. Niektóre z nich same nie hamują wzrostu guza, ale np. wystarczają do zmiany środowiska guza na tyle, żeby mogła zadziałać immunoterapia. Takiego nowotworu jak glejak nie da się zahamować klasycznymi terapiami – genom i funkcjonowanie jego komórek są tak zmienione, że zdolność tych komórek do śmierci jest zahamowana i praktycznie żadna terapia nie działa skutecznie. Natomiast komórki w środowisku guza są zmienione funkcjonalnie, ale nie mają trwałych defektów. Sądzimy, że zablokowanie przeprogramowania komórek odpornościowych w glejaku może przywrócić prawidłowe działanie układu odpornościowego. Komórki nowotworowe pojawiają się dość często, ale nasz organizm potrafi je zwykle rozpoznawać i eliminować. Nowotwór nie może się rozrastać, bo układ odpornościowy utrzymuje go w ryzach. Gdy się pomoże organizmowi i wytnie większość guza, układ odpornościowy potrafi go wyeliminować. Obserwujemy to w niezłośliwych glejakach. W złośliwych takiej mobilizacji układu odpornościowego po prostu nie ma.

Zastosowanie takiego podejścia w terapii mogłoby bardzo dużo zmienić.

Dobranie optymalnej terapii dla pacjenta jest bardzo trudne, bo każdy guz jest inny i nawet w jednym guzie mogą być komórki nowotworowe z różnymi zaburzeniami. Dlatego tak trudno się pozbyć nowotworu, stosując jednakową terapię dla wszystkich. Obecnie realizujemy projekt, w którym badamy środowisko komórek glejaków z konkretnymi zmianami genetycznymi, dokładnie takimi, jakie są wykrywane u pacjentów. Otrzymaliśmy je od naszych współpracowników z różnych ośrodków na świecie. Sprawdzamy, jakie komórki gromadzą się w środowisku takich glejaków, czy występuje odpowiedź przeciwnowotworowa przy określonej konstelacji zmian genetycznych. Potem sprawdzimy, w jaki sposób konkretne glejaki zareagują na immunoterapię. Z badań klinicznych wiemy, że pacjenci z glejakami nie odpowiadają na terapię, bo zmiany środowiska w guzie są tak znaczące, że uniemożliwiają odpowiedź przeciwnowotworowych limfocytów. Wykorzystując mysie glejaki ze zmianami podobnymi do występujących u ludzi, planujemy zbadać, jak na immunoterapię zareagują zwierzęta z guzami z określonym genomem. Sądzimy, że na podstawie tych wyników będziemy mogli przewidzieć, jak konkretni pacjenci zareagują na immunoterapię. W guzach mózgu zdarzają się zmiany genetyczne podobne do zmian w innych nowotworach, jednakże każdy pacjent ma specyficzny genom i jego układ odpornościowy reaguje na obecność guza nieco inaczej. Trzeba zebrać wiele informacji na temat guza i stanu zdrowia pacjenta, żeby precyzyjnie dobrać terapię. W polskich klinikach nie myśli się w ten sposób. Jest jedna, standardowa terapia na wszystkie glejaki, mało skuteczna. Złośliwe glejaki nawracają kilka miesięcy po usunięciu guza. Gdybyśmy wiedzieli więcej o zmianach w genomie konkretnego pacjenta, dużo lepiej dobralibyśmy terapię. Bo obecnie jest dostępnych dość dużo inhibitorów, czyli cząsteczek, które hamują działanie enzymów w nowotworach.

Współpracujecie z klinikami?

Część naszych badań prowadzimy na guzach lub komórkach wyizolowanych od pacjentów. Planujemy też doprowadzić nasze nowe strategie terapeutyczne do etapu badań klinicznych. Naszym celem jest zwiększenie szans przeżycia pacjentów z glejakami. Na świecie tego typu badania przedkliniczne i kliniczne prowadzi się w szpitalach i akademiach medycznych. Jako badacze z Polskiej Akademii Nauk nie mamy łatwego dostępu do pacjentów, a znalezienie lekarzy, którzy chcieliby współpracować i analizować materiał od pacjentów, nie jest łatwe. Bardzo pomógł nam profesor Cezary Szczylik, świetny onkolog. Zaprosił kilkunastu ordynatorów i chirurgów z klinik neurochirurgii w Warszawie i przekonał ich, że nasze badania są ważne, trzeba nas wspomóc i zbierać dla nas materiał. Dzięki temu wiele mechanizmów, które odkryliśmy w modelach zwierzęcych, możemy potwierdzić u pacjentów. Mamy bank próbek i wiele linii wyprowadzonych z guzów, włączyliśmy do współpracy ośrodki z Krakowa, Bydgoszczy, Katowic i współpracujemy z wieloma lekarzami, licząc na to, że pomogą nam w przyszłych badaniach klinicznych.

Co dzięki tej współpracy badacie?

Chcieliśmy na przykład zobaczyć, czy guz pierwotny jest taki sam genetycznie i pod względem środowiska i komórek odpornościowych, jak guz wtórny. W glejakach złośliwych po kilku miesiącach od wycięcia i zastosowania terapii guz odrasta. Jak się patrzy na obrazy glejaka z rezonansu magnetycznego, guz wygląda jak jednorodna kulka, ale tak naprawdę wiele komórek guza odrywa się od jego masy i wchodzi głęboko w parenchymę mózgu. Tych komórek nie widać, a nie da się wyciąć zbyt dużego marginesu pozornie zdrowej części mózgu. W normalnie wyglądającej tkance zostają komórki nowotworowe i one odrastają. Interesowało nas, czy tworzą guz podobny, czy inny od pierwotnego. Zbadaliśmy pary guzów – pierwotnych i wtórnych, które zebrali koledzy klinicyści. Porównaliśmy ich

genomy. Były zupełnie inne. Czyli odrastający guz ma już inne komórki – najczęściej dużo bardziej złośliwe. Udało nam się też zbadać środowisko tych guzów i ono też jest różne. We wtórnym guzie jest więcej komórek, które wspierają rozwój guza, nie ma tych, które mogłyby inicjować odpowiedź przeciwnowotworową.

Czyli na każdym etapie należałoby stosować inną terapię?

Jest jeszcze gorzej. Po raz pierwszy naukowcy dysponują metodami, które pozwalają pokazać, że glejak jest niejednorodny. Wiemy już, że w każdym nowotworze, w jego różnych miejscach znajdują się komórki, które mają inne zmiany genetyczne. Sądzimy, że komórka nowotworowa, która kiedyś powstała, migruje w nowe miejsce i przez lata nagromadzają się w niej odmienne zmiany genetyczne, każda z nich ewoluuje na swój sposób. Jak robi się biopsję z różnych miejsc nowotworów, to badanie genomu pokazuje, że mamy do czynienia z różnymi guzami, które trzeba inaczej leczyć. Walka z nowotworem jest niezwykle skomplikowana. Skupiliśmy się na mikrośrodowisku glejaka, bo jeśli dowiemy się, które komórki są bardziej potrzebne nowotworowi, możemy się starać je wyłączyć. Terapie stosowane obecnie, takie jak radio- czy chemoterapia, mają zabić komórki nowotworowe. Celowanie w mikrośrodowisko to zupełnie nowa koncepcja. Efekty pierwszych badań, naszych i innych badaczy, są obiecujące. Na naszych oczach dokonuje się zmiana paradygmatu i próbuje się wzmocnić odpowiedź przeciwnowotworową, stosując immunoterapię. Uważam, że nie da się zastosować skutecznie immunoterapii bez zmienienia mikrośrodowiska guza.

Trzymam kciuki, żeby jak najszybciej się to udało.

To już jest kwestia finansowania nauki, badań aplikacyjnych i klinicznych. Nasze badania są finansowane głównie jako badania podstawowe – wykrywamy mechanizm i logikę pro-

ceśców. Jeżeli chcemy iść w stronę terapii, musimy zrobić inny typ badań, przetestować wiele związków podanych w różny sposób do guza, doustnie albo dożylnie, w określonej kombinacji ze standardową terapią. Do niedawna nie było ścieżek finansowania badań aplikacyjnych i klinicznych. Próbowaliśmy współpracować z firmami, ale wtedy trzeba było skupić się na konkretnej cząsteczce i najpierw ją opatentować. Znaleźliśmy kilka ciekawych cząsteczek, które musiały być opatentowane, bo taki był wymóg współpracy. Nie wszystkie wyniki możemy ujawnić.

Ale może Pani coś zdradzić?

Glejak produkuje cząsteczkę, która na zasadzie „klucz i zamek” jest rozpoznawana przez inną cząsteczkę na mikrogleju. Ich połączenie przeprogramowuje mikroglej i włącza program pomocy glejakowi. My zaprojektowaliśmy małe cząsteczki (peptydy), które potrafią wejść między cząsteczkę wysyłąną przez glejaka a tę odbierającą sygnał w mikrogleju. To tak, jakby gumę do żucia włożyć do zamka, klucz już nie może tam wejść. Niestety po podaniu do mózgu cząsteczka rozprzestrzenia się tylko na mały dystans. Cząsteczki podane do krwiobiegu zwierząt odnajdujemy głównie w wątrobie czy w nerkach, bardzo niewiele dociera do guza. Musimy też popracować nad właściwościami chemicznymi, żeby zwiększyć stabilność cząsteczek, by działały dłużej we krwi czy w mózgu i mogły docierać głębiej w mózgu. W tej chwili dwa współpracujące laboratoria przygotowują dla nas nanonośniki, w których możemy zamknąć nasze cząsteczki. W nanonośnikach, którymi są liposomy (pęcherzyki zbudowane z tłuszczu) i dendrymery (pęcherzyki zbudowane z celulozy), zamykamy nasze peptydy i dostarczamy je do guza. Nanonośniki działają już nieźle w modelach zwierzęcych i są przygotowane do użycia w terapii pacjentów. Dodatkowo, żeby ułatwić im przechodzenie przez barierę krew-mózg, dokładamy im cząsteczkę celującą w mózg lub w określony typ komórek odpornościowych. Chcemy to dopracować w ciągu 2–3 lat.

Jesteście bardzo blisko.

W tej chwili mamy problem, bo lokalna komisja etyczna odrzuciła nasze wnioski dotyczące pracy na mysim modelu glejaka z różnymi zmianami genetycznymi, takimi jak u pacjentów. Nie przyjęto wyjaśnienia, że jeśli bada się środowisko guza i jego komunikację z układem odpornościowym, to nie ma alternatywy – trzeba to badać na zwierzętach. Stosujemy wszystkie ogólnie obowiązujące zasady dotyczące badań na zwierzętach – anestezję, podawanie leków przeciwbólowych, myszy przebywają w klimatyzowanych klatkach.

Więc dlaczego?

Nie rozumiem tego. Poprzednie protokoły z tą samą procedurą na myszach wcześniej zostały zaaprobowane. A pacjenci z glejakiem piszą do nas, pytając o postęp badań. Dałabym komisji do przeczytania te listy, żeby jej członkowie zrozumieli celowość i istotność naszych badań.

Na jakich modelach pracujecie?

Najpierw wykorzystujemy system współhodowli komórek glejaka i mikrogleju, co pozwala bardzo precyzyjnie badać komunikację między nimi. Mając jasny obraz tego, co się dzieje, przechodzimy do bardziej skomplikowanych modeli: wszczepiamy do mózgu mysie komórki wyznakowane białkiem czerwonej fluorescencji. Guz rośnie i możemy go łatwo zobaczyć za pomocą urządzenia obrazującego fluorescencję. Gdy potniemy mózg z glejakiem na plasterki i wybarwimy komórki odpornościowe i komórki nowotworu – jedne na czerwono, a drugie na zielono, widzimy, jak te pierwsze napływają do guza. Drugi model to ludzkie komórki glejaka, które wszczepiamy do mózgu myszy z osłabionym układem odpornościowym. W takim modelu możemy badać odpowiedź pewnych komórek odpornościowych i testować ich komunikację z nowotworem. Ostatnio testowaliśmy nowy inhibitor z firmy Oncoarendi i okazało

się, że hamuje on zmiany wywołane przez glejaka i uwrażliwia myszy z glejakiem na immunoterapię. Jednak przejście od badań na zwierzętach do badań klinicznych jest bardziej skomplikowane. Potrzebna jest cała seria analiz, żeby pokazać, że dana substancja nie jest toksyczna u zwierząt, potem, że nie jest toksyczna u ludzi, a dopiero później można sprawdzać, czy działa na pacjentów. Cały proces jest skomplikowany logistycznie, kosztowny i nietatwy do przeprowadzenia.

W Pani zespole już robicie wiele złożonych badań nad glejakami. Laboratorium, w którym jesteście, jest imponujące!

Laboratorium istnieje od 2013 roku. Zaczynaliśmy kompletnie od zera, bo tę część budynku oddano wtedy do użytku. Mój zespół liczy teraz 20 osób, ale poza mną tylko 4 osoby są zatrudnione na stałe w Instytucie. Pozostałych badaczy zatrudniam w projektach, na które musimy pozyskać finansowanie. Moje laboratorium jest duże i działa skutecznie głównie dzięki obecnemu systemowi grantowemu, co zawsze podkreślam. Nasze pierwsze duże finansowanie pochodziło z Komitetu Badań Naukowych, z dwóch grantów polsko-niemieckich. W tej chwili zdobywamy dofinansowanie głównie z Narodowego Centrum Badań. Zrealizowaliśmy duży projekt dzięki Fundacji na rzecz Nauki Polskiej, którego celem było opracowanie diagnostyki guzów mózgu opartej na sekwencjonowaniu DNA. Znaleźliśmy wtedy na przykład dwie nowe mutacje, które pojawiły się tylko w polskiej populacji.

Obecnie w zespole pracują dwie duże grupy badaczy. Jedna zajmuje się guzem, mikrośrodowiskiem i jego oddziaływaniem z układem odpornościowym, a druga tym, co się dzieje w DNA – wykrywamy mutacje i ich wpływ na funkcjonowanie komórek, a następnie staramy się zrozumieć, jak na poziomie genetycznym zróżnicowany jest guz. Aby prowadzić tak złożone badania, wykorzystujemy wiele metod i nowoczesnych urządzeń, od sekwencjonowania DNA, przez mikroskopy do obrazowania procesów i komórek, po urządzenia do wstrzy-

kiwania glejaka do organizmów myszy i sprawdzania, co się w nich dzieje. Do tego wytwarzamy ogromną ilość danych z sekwencjonowania. Dane z jednego genomu mogą „ważyć” pół terabajta. Pracujemy nad ich analizą z wieloma bioinformatykami, których zresztą jest za mało. Byłoby wspaniale, gdyby dało się „zatrudnić” sztuczną inteligencję do szukania zależności między genomem raka, cechami środowiska guza, jego obrazem i odpowiedzią na leki.

Obecnie dysponujemy urządzeniem do izolowania materiału genetycznego od pacjentów. Działa automatycznie – maszynę się programuje i ona izoluje materiał z guza albo krwi pacjenta.

Co dalej z nim robicie?

Mamy inne urządzenia, które pozwalają poznać informację genetyczną (cały genom) albo wszystkie geny, które w danych momencie są aktywne w komórce. Jedno z najważniejszych urządzeń, nazywane przez nas pieśczętliwie tosterem (bo podobnie wygląda), kosztowało pół miliona złotych. Analizuje odczyt wszystkich genów (transkryptom) w każdej z pojedynczych komórek. Jako pierwsi w Polsce wprowadziliśmy tę metodę. Przy ogromnych kosztach jednego doświadczenia metoda ta pozwala na bardzo dokładne określenie, co robi każda z komórek odpornościowych w guzie. Pokazaliśmy na przykład, że komórki napływające do glejaka z krwi są nastawione bojowo i przeciwnowotworowo, ale tracą te właściwości w kontakcie z glejakiem. Kiedyś powiedziałam osobie, która w niefrasobliwy sposób zajmowała się tym pudełkiem i odczynnikami: „Proszę uważać, to kosztuje tyle, co Porsche!”.

A jak się zarządza tak wielkim zespołem i tak złożonym laboratorium?

Łatwo nie jest! Aczkolwiek ta samonapędzająca się maszyna działa sprawnie. Ja głównie piszę wnioski grantowe – po 5–6 rocznie, i prace naukowe – po kilkanaście rocznie; prowadzę

też doktoraty. Czasem po kilka rocznie; przy trzech jest już bardzo ciężko, po czterech jestem bliska poddania się. Ale to moja wina, bo kieruje mną nieopanowana ciekawość. Nie potrafię porzucić interesującego wyniku. Zaczynam wiele nowych projektów, prowadzę je jednocześnie i staram się doprowadzić do końca, nawet jeśli niektóre nie wychodzą tak dobrze, jak planowaliśmy. Do realizacji ambitnych projektów muszę mieć zespół ekspertów o różnych umiejętnościach. Staram się działać zadaniowo, budować zespół z kilku osób – jedna prowadzi badania na komórkach, druga na zwierzętach, trzecia analizuje dane z sekwencjonowania. Czasem doświadczenia wymagają wielu godzin pracy, której nie można przerwać. Ostatnio kolega pracował do trzeciej w nocy i nocował w instytucie, bo następnego dnia musiał zacząć o szóstej rano. Nie zawsze jest taki nawal pracy, ale trzeba przyznać, że są to bardzo wymagające i czasochłonne badania. Jeszcze parę lat temu badaliśmy 3–4 geny czy białka i próbowaliśmy wywnioskować, co się dzieje w komórkach. Teraz badamy kilkanaście tysięcy naraz i wiemy, co w nich naprawdę zachodzi. Zdobywam fundusze, wymyślam projekty, analizuję wyniki. Na szczęście pisanie grantów czy publikacji łatwo mi przychodzi, umiem wyrazić na piśmie swoje wizje i projekty. Dużo czytam i to się przekłada na łatwość pisania.

To właśnie ciekawość tak to napędza?

Bardzo motywuje. Ciągłe poszukujemy nowych narzędzi i metod. Wyobrażam sobie, że nasza praca polega na wydarciu naturze kawałka wiedzy i ułożenia go w odpowiednim miejscu wielkich puzzli. Ale ciekawość może też przeszkadzać. Nie potrafię się skupić na jednym zagadnieniu, co może byłoby bardziej efektywne, próbuję realizować kilka projektów naraz.

Jest Pani w tym skuteczna!

Lubię sobie tłumaczyć, że dzięki temu, że tyle różnych rzeczy robimy, mamy bardzo szeroki ogląd sytuacji i widzimy całą

złożoność zjawiska. Pocieszam się, że tak też można dojść do celu. Od zawsze lubiłam wprowadzać nowe metody i uważałam, że dzięki temu coraz więcej dostrzegamy. Myślę, że jest to bardzo ważne w nauce i pozwala ją uprawiać na światowym poziomie.

Pozbierała Pani to wszystko w jednym laboratorium.

Korzystam teraz z całej wiedzy, którą gromadziłam, gdy zajmowałam się osobno komórkami odpornościowymi, mikroglejem, glejakiem, procesami funkcjonowania mózgu, immunologią. Teraz połączyłam te obszary. Patrząc z boku, można pomyśleć, że skaczę od dziedziny do dziedziny, ale w mojej głowie to wszystko układa się w bardzo staranny i spójny scenariusz.

Od początku miała Pani tę ciekawość?

Całe lata szkoły podstawowej i liceum marzyłam, żeby zostać archeologiem. Dopiero miesiąc przed maturą zaczęłam mieć wątpliwości. Przeczytałam artykuł profesora Wiesława Wiktora Jędrzejczaka o interferonie i układzie odpornościowym. Stwierdziłam, że to jest to i chcę się zajmować się biologią nowotworów. Na szczęście miałam wymagającą nauczycielkę biologii i dzięki dobremu przygotowaniu zdałam maturę, a potem dostałam się na studia z biologii na Uniwersytecie Warszawskim. Zajmowałam się embriologią, bo był to wtedy najlepszy zakład na Wydziale Biologii.

U profesora Andrzeja Tarkowskiego?

Tak. Ale jednocześnie już wtedy studiowałam genetykę, bo uważałam, że połączenie genetyki i embriologii pomoże nam lepiej zrozumieć nowotwory. I po 30 latach okazało się, że miałam rację. Jest dużo podobieństw, a według współczesnych koncepcji nowotwór powstaje z komórek wielopotentjalnych, w których nagromadzają się zmiany genetyczne. Gdy przy-

szłam do Instytutu Nenckiego, najpierw trafiłam do pracowni, która badała metabolity leków przeciwnowotworowych. Z radością myłam 150 szklanych probówek potrzebnych do doświadczeń, ciesząc się, że mogę uczestniczyć w badaniu naukowym. A potem w Instytucie pojawił się dr Leszek Kaczmarek i wprowadził metody biologii molekularnej, co zainspirowało mnie do podjęcia nowej tematyki. W 1992 roku udało nam się zdobyć pierwszą w Polsce maszynę, która pozwalała namnażać materiał genetyczny i badać ekspresję genów. W zasadzie przez cały czas zajmowałam się biologią nowotworów, poza krótkim etapem stażu podoktorskiego na Uniwersytecie McGill w Montrealu. Tam zajmowałam się wprowadzie biologią molekularną, ale badałam układ wzrokowy matpy.

Coś zupełnie innego...

Jednak dzięki temu zapoznałam się bardzo dokładnie z najnowszymi technikami inżynierii genetycznej. Miałam je w małym palcu, co potem bardzo mi pomogło ustawić doświadczenia nad mechanizmami śmierci komórek nowotworowych. Po powrocie miałam już jasny program badawczy. Uważam się za „dziecko” wprowadzenia w Polsce systemu grantowego. Finansowanie zdobywane na projekty badawcze pozwoliły mi utrzymywać duży zespół i prowadzić ambitne badania. Złożonego problemu nie da się zgłębić inaczej, niż próbując „ugryźć” go z wielu stron. Pracując, myśląc liniowo i poruszając się w strefie komfortu, tego, co jest znajome, trudno dokonać przełomu. Gdy widać więcej elementów zjawiska, możemy sobie lepiej wyobrazić, jak są one połączone w całość. Należę do osób, które bardzo lubią swoją pracę.

To widać.

W nauce wiele osób wierzy, że robi coś superwartościowego. To nas mobilizuje na swój sposób. Weryfikacją jest to, co o naszych badaniach myślą inni. Przyjemnie jest wiedzieć, że ktoś dostrze-

ga to, co robimy, cytuje nasze odkrycia i przemyślenia, że są one dobrze odbierane przez światowe środowisko naukowe.

Pani badania są często cytowane, ma Pani wysoki współczynnik Hirscha.

Cieszę się z tego. Dzięki temu inni badacze chętniej z nami współpracują. Zawsze starałam się uzyskiwać wyniki szybko – jestem niecierpliwa, więc zamiast sama ustawiać jakąś czasochłonną metodę, podejmowałam raczej współpracę z osobami, które pasowały merytorycznie i wykorzystywały jakąś unikalną technikę, której my nie znaliśmy. Na przykład system do badania migracji komórek glejaka w skrawkach z mózgu opracowany przez prof. Kettenmanna z Max Delbrück Center. Drugą świetną współpracę mieliśmy z dr. Salemem Chouaibem z Instytutu Raka Gustave Roussy: mogliśmy skorzystać z metody hodowli komórek ludzkich w myszach z upośledzonym układem odpornościowym. Sami jednak też ustawiliśmy wiele nowych metod. Jako jedni z pierwszych nauczyliśmy się sortować komórki odpornościowe z mózgu do badania transkryptomu i tę metodykę udostępniliśmy innym badaczom. Ważne jest też to, że mam zespół młodych współpracowników. Co roku pracę rozpoczynają 3–4 nowe, pełne entuzjazmu osoby. Czasami zostają z nami na dłużej.

To model zachodni.

Naukowiec nie pracuje w próżni i ważne jest to, jakie ma wokół siebie środowisko. W moim otoczeniu byli m.in. Leszek Kaczmarek, Maciej Żylicz, Jacek Kuźnicki i inni naukowcy skupieni w Międzynarodowym Instytucie Biologii Molekularnej i Komórkowej w Warszawie, ceniący wysokie standardy w nauce. Byli dla mnie punktem odniesienia. Wydawało mi się zawsze, że to jest właściwa strategia, żeby się rozwijać jako naukowiec. Szybko zyskałam samodzielność naukową. Miałam małą, ale własną pracownię, swobodę w dobieraniu tematów badań.

Uważam, że robię ciekawe i ważne rzeczy. Mam świetną i ekscytującą pracę.

Rzadko się to słyszy.

Naukowcy w Polsce zwykle narzekają. A dla mnie szklanka jest zawsze bardziej pełna niż pusta. Mnie też zdarza się nie dostać grantu. Czasem okazuje się, że projekt nie pójdzie dalej, bo np. mieliśmy złą koncepcję albo czegoś nie daje się wyjaśnić metodami, którymi dysponujemy. Gdy coś zaczynamy, nigdy nie wiemy, jaki będzie rezultat badań. Temat komunikacji głąk-mikrogłąk też mógł nas zaprowadzić w ślepy zaułek, ale stało się inaczej. Okazał się gorący i ciekawy. Cieszę się, że nasze badania zostały docenione. Czasem, mimo przygotowania naprawdę świetnej pracy, odbijamy się od najlepszych czasopism. Nie skupiam się na tym, szukam innych rozwiązań, bo chcę szybko udostępniać wyniki badań. I często, gdy nasze artykuły opublikowane w mniej prestiżowych czasopismach zyskują później więcej cytowań niż te, które ukazały się w magazynach z najwyższej półki, czuję satysfakcję.

Pani podejście działa!

Parę lat temu zaproszono mnie na światowy zjazd neuroonkologów w Zurychu i poproszono, żebym opowiedziała o mikrogłąku w głąkach w czasie dnia edukacyjnego. Zdałam sobie wtedy sprawę z tego, że stałam się właśnie klasykiem, że nasze wyniki znalazły się w podręcznikach. Choć z naszego punktu widzenia to nie jest ustalona wiedza, lecz świeże i dynamicznie rozrastające się pole badań. Wracamy czasem do jakiegoś tematu, bo pojawiają się nowe narzędzia, które pozwalają widzieć więcej. Sprawdzamy komórka po komórce.



Prof. Jacek Jemielity

Laureat Nagrody FNP 2021
w obszarze nauk chemicznych
i o materiałach za opracowanie
chemicznych modyfikacji mRNA
jako narzędzi do zastosowań
terapeutycznych i badań procesów
komórkowych

Urodził się w 1973 roku w Wysokiem Mazowieckiem. Studia na Wydziale Chemii Uniwersytetu Warszawskiego ukończył w 1997 roku. Stopień doktora uzyskał w 2002 roku na tym samym wydziale, a habilitację w roku 2012. Pracował też w Zakładzie Biofizyki Instytutu Fizyki Doświadczalnej na Wydziale Fizyki UW. Zagraniczne doświadczenie badawcze zdobywał m.in. we francuskim Institute of Structural Biology i fińskim Uniwersytecie w Turku. Tytuł profesora otrzymał w 2020 roku.

Prof. dr hab. Jacek Jemielity specjalizuje się w chemii organicznej, biologicznej i biochemii nukleotydów i kwasów nukleinowych. Jest kierownikiem Laboratorium Chemii Bioorganicznej Centrum Nowych Technologii UW, gdzie prowadzi grupę badawczą Jemielity Group. Jest również współtwórcą i szefem ExploRNA Therapeutics – spółki *spin-off* Uniwersytetu Warszawskiego, w której technologia chemicznie modyfikowanego mRNA jest rozwijana, a następnie wykorzystywana w projektowaniu nowatorskich terapii.

Realizował granty m.in. Narodowego Centrum Nauki i Fundacji na rzecz Nauki Polskiej (TEAM). Jest współautorem 130 publikacji (m.in. w „Journal of the American Chemical Society”, „Nature Communications”, „Chemical Science”, „Nucleic Acids Research”), które cytowano ponad 2,4 tys. razy. Uzyskany przez niego indeks Hirscha wynosi 28. Jest wynalazcą rozwiązań chronionych na całym świecie 9 patentami bądź zgłoszeniami patentowymi (dwa z nich są wykupione przez firmę BioNTech, cztery przez ExploRNA Therapeutics).

Wielokrotnie nagradzany za osiągnięcia naukowe, m.in. Nagrodą Naukową „Polityki” dla młodych naukowców, Nagrodą Gospodarczą Prezydenta RP, Nagrodami Rektora Uniwersytetu Warszawskiego. Nominowany do Nagrody Europejskiego Wynalazcy przyznawanej przez Europejski Urząd Patentowy.

Prof. Jacek Jemielity jest jednym ze światowych liderów badań dotyczących chemicznie modyfikowanego mRNA. Za badania w tej dziedzinie – opracowanie chemicznych modyfikacji mRNA – został wyróżniony Nagrodą Fundacji na rzecz Nauki Polskiej.

mRNA, czyli informacyjne RNA (ang. *messenger RNA*), jest nazywane komórkowym przepisem na białko. Jest to rodzaj kwasu rybonukleinowego, który powstaje w jądrze komórki. Jako skopiowany z DNA fragment kodu niesie przepis na budowę konkretnego białka. Wyprodukowanie białka jest już zadaniem rybosomów, do których mRNA trafia po opuszczeniu jądra komórkowego. Badania pokazały, że odpowiednio zaprojektowane mRNA można dostarczyć do komórki, aby organizm mógł wyprodukować na jego podstawie konkretne białko. Otwiera to drogę do prac nad terapiami rozmaitych chorób.

Cząsteczka mRNA to pojedyncza nić złożona z nukleotydów (cegiełek budujących kwasy nukleinowe) i zakończona z obu stron w charakterystyczny sposób. Na jednym z jej końców (tzw. końcu 5') znajduje się struktura nazywana czapeczką, a na drugim końcu (3') – ogon poliA.

Prof. Jemielity prowadził badania nad czapeczką mRNA. Wraz ze współpracownikami stworzył wiele narzędzi molekularnych do badań procesów komórkowych związanych z mRNA, takich jak jego degradacja i inicjacja biosyntezy białek. Jednak najciekawsze wydawały się reagenty do modyfikacji mRNA, które poprawiały jego właściwości biologiczne, ze względu na potencjał terapeutyczny takich cząsteczek. W czasie, gdy prof. Jemielity prowadził pierwsze badania nad modyfikacjami mRNA, większość społeczności naukowej nie była jeszcze świadoma znaczenia ich późniejszych zastosowań w nowoczesnych terapiach biologicznych.

Cząsteczka mRNA jest bardzo nietrwała, szybko ulega degradacji i jest bardzo wrażliwa na różne czynniki oraz modyfikacje. Znaczenie badań prof. Jemielitego jest tak istotne, ponieważ dzięki opracowanym analogom (m.in. zawierającym grupy tiofosforanowe, boranofosforanowe w mostku oligofosforanowym) mRNA może być znacznie bardziej stabilne i aktywne translacyjnie. Co najważniejsze, metody opracowane przez prof. Jemielitego i współpracowników umożliwiają uzyskanie pożądanego efektu terapeutycznego przy istotnie zmniejszonej dawce mRNA, co niweluje ryzyko wystąpienia skutków ubocznych.

Analogi mRNA niezbędne do stabilizacji tej cząsteczki umożliwiły prowadzenie badań w wielu laboratoriach na całym świecie. Pierwsza generacja technologii prof. Jemielitego dotyczących modyfikacji czapeczki na końcu 5' mRNA została sprzedana w 2011 roku globalnej firmie biotechnologicznej BioNTech. Wiele grup, które chcą stworzyć bardziej stabilne mRNA na potrzeby swoich badań medycznych czy biotechnologicznych, zabiega o współpracę z prof. Jemielitym. W późniejszych latach powstały dwie kolejne generacje reagentów (odczynników) do modyfikacji mRNA, które nadawały im jeszcze ciekawsze właściwości biologiczne, istotne z punktu widzenia zastosowań terapeutycznych.

Terapeutyczne wykorzystanie mRNA przez wiele lat pozostawało bardzo obiecującą technologią, która jednak nie mogła doczekać się pierwszego powszechnego wykorzystania. Sytuacja uległa zmianie wraz z nadejściem pandemii COVID-19, kiedy to szczepionki na bazie mRNA opracowano w rekordowo szybkim tempie i okazały się one wyjątkowo skuteczne.

Wyniki badań prof. Jemielitego dotyczących opracowania chemicznych modyfikacji mRNA są istotne dla projektowania wielu nowych terapii opartych na mRNA. Obecnie prowadzonych jest kilkaset badań klinicznych z zastosowaniem mRNA.

Syntetyczne mRNA może być wykorzystane przy tworzeniu leczniczych szczepionek przeciwnowotworowych, czyli podawanych jako lek osobom chorującym na nowotwór. Szczepionki te mają powodować, że układ immunologiczny będzie lepiej rozpoznawał chorobę nowotworową i ją niszczył. Jeden z wynalazków prof. Jemielitego jest obecnie stosowany w kilkunastu badaniach klinicznych nad leczniczymi szczepionkami przeciwnowotworowymi.

Kolejnym obszarem zastosowania mRNA są szczepionki przeciwvirusowe, już stosowane przeciwko koronawirusowi SARS-CoV-2. Obecnie trwają też prace nad szczepionkami opartymi na tej technologii, np. przeciwko wirusowi Zika lub grypie. Możliwe są też zastosowania w terapii genetycznych chorób rzadkich, takich jak rdzeniowy zanik mięśni (SMA) czy mukowiscydoza, a także przeciwko chorobom bakteryjnym, a nawet w medycynie regeneracyjnej.

Z prof. Jackiem Jemielitym rozmawia Sławomir Zagórski

SŁAWOMIR ZAGÓRSKI: Kiedy myślę o Pana drodze zawodowej, to wychodzi mi: „Chemik, który poszedł do fizyków i niebezpiecznie zbliżył się do biologii, by w efekcie zrobić rzeczy niezwykle ważne dla medycyny”. Czy dobrze myślę?

JACEK JEMIELITY: Tak, nieźle pan to ujął. Kształciłem się jako chemik. W czasie doktoratu zajmowałem się badaniem enzymów. I potem, po doktoracie, trafiłem – wydawało mi się, że na chwilę – do zespołu prof. Edwarda Darżynkiewicza w Zakładzie Biofizyki na Wydziale Fizyki UW. Tam zacząłem się zajmować nukleotydami, a w szczególności strukturami, które przypominają to coś, co informacyjny kwas rybonukleinowy, tj. mRNA, ma na końcu zwanym 5'. Mam na myśli strukturę kapu, którą niektórzy po polsku nazywają czapeczką.

I rzeczywiście ten czas spędzony w Zakładzie Biofizyki – a było to w sumie aż 12 lat – pozwolił mi poznać ludzi, którzy starali się stosować fizykę do rozwiązywania problemów biologicznych. Jako chemik miałem więc możliwość przyglądania się, jak ci naukowcy z różnych dyscyplin próbują się porozumieć i stworzyć coś na pograniczu dziedzin. Bo jak wiadomo, właśnie tam, pomiędzy dyscyplinami, wciąż jest jeszcze najwięcej do zrobienia.

W tym interdyscyplinarnym towarzystwie, wiedząc, jak zbudowane są cząsteczki chemiczne, uczyłem się, jak one oddziałują z dużymi makrocząsteczkami, istotnymi z punktu widzenia biologii. A także, jak to się może potem przekładać na funkcje

tych dużych cząsteczek. Wreszcie – jak te funkcje aktywować bądź dezaktywować.

Zajął się Pan makrocząsteczką RNA. Co takiego jest w tej cząsteczce, że tak Pana „wzięła”?

Właściwie to w RNA zakochałem się trochę później. Najpierw modyfikowaliśmy nukleotydy (cegiełki, z których zbudowane jest DNA i RNA), tworząc kolejne substancje (reagenty) do modyfikacji RNA.

Wspomniałem o kapie na jednym z końców mRNA. Otóż ta struktura, mimo że jest tak niewielka w stosunku do całej cząsteczki mRNA, odgrywa niezwykle istotną rolę. Bierze udział w kilku kluczowych procesach dla ekspresji, czyli wykorzystania informacji genetycznej. To właśnie od rozpoznania tej struktury przez białko inicjujące proces translacji zaczyna się kaskada wielu zdarzeń, które ostatecznie prowadzą do biosyntezy białka.

A skoro struktura kapu jest rozpoznawana przez białko, od którego wszystko się zaczyna, skoro ten proces decyduje o szybkości biosyntezy białka, to pomyślałem, że może wprowadzając pewne zmiany w strukturze kapu, da się wpłynąć na cały proces tworzenia białka. Na przykład go przyspieszyć.

Wiedziałem też, że mRNA jest bardzo nietrwałe. To było kolejne wyzwanie. Jeżeli udaje mi się modyfikować poszczególne nukleotydy w taki sposób, by stawały się trwalsze, to może w jakiś sposób uda się też ustabilizować całą nietrwałą cząsteczkę mRNA.

I jedno, i drugie okazało się możliwe. Oczywiście nie stało się to z dnia na dzień. Pierwsza modyfikacja zapewniła niezwykłą trwałość mRNA, ale za to obniżała wydajność produkcji białka. Takie RNA pływało sobie w komórce, ale ilość wytwarzanego białka była niewielka. Szukaliśmy dalej.

Wtedy pojawił się pomysł zastąpienia atomu tlenu w strukturze kapu atomem siarki. Nie wiedzieliśmy, w którym dokładnie miejscu dokonać takiej zmiany. Ale udało się. W pewnym momencie uzyskaliśmy wyraźnie trwalsze mRNA, które jednocześnie służyło jako matryca do wytworzenia większej ilości białka. Pracowałem z bardzo zdolnymi studentami, którzy od pierwszego roku studiów przychodzili do laboratorium. Staraliśmy się razem robić – wtedy wydawało się – jeszcze nie tak wyjątkowo potrzebne rzeczy. Ale jak się okazało, że przez dokonanie bardzo subtelnych zmian w reagentach nukleotydowych, które potem wykorzystuje się do syntezy RNA, można w istotny sposób zmieniać właściwości całych olbrzymich cząsteczek, zaczęliśmy się zastanawiać, jakie to może mieć znaczenie praktyczne. I wtedy przyszło mi do głowy, że można by spróbować tak modyfikować mRNA, żeby wykorzystać je potem jako terapeutyk. To był chyba 2006 rok. Napisałem w tej sprawie do mojego współpracownika ze Stanów Zjednoczonych prof. Roberta Rhodasa, który badał modyfikowane przez nas mRNA pod kątem biologicznym.

Myśl o zastosowaniach terapeutycznych pojawiła się więc dopiero na pewnym etapie prac. Pierwsze były badania podstawowe.

Tak. Początkowo interesowało nas to z czysto poznawczego punktu widzenia. Chcieliśmy sprawdzić, czy takie modyfikacje mRNA są w ogóle możliwe. Kiedy okazało się, że tak, robiliśmy narzędzia dla biologów molekularnych. Mogli mieć np. mRNA, które nie będzie degradowane od końca 5', dzięki czemu można było badać różne zjawiska biologiczne, mając jeden proces zablokowany. W ten sposób można było poznawać np. strukturę kompleksów – enzym odcinający kap od mRNA z fragmentem mRNA.

Myśl o wykorzystaniu zmodyfikowanego mRNA w celach terapeutycznych nie mnie pierwszemu na świecie przyszła do gło-

wy. Ale o tym dowiedziałem się nieco później. Okazało się, że już kilka zespołów badawczych chce z RNA zrobić terapeutyk. Tych zespołów nie było wiele, ale jednak.

Kiedy opublikowaliśmy pracę, w której opisywaliśmy wspomniany efekt zamiany jednego atomu tlenu na atom siarki w cząsteczce składającej się z 85 tys. atomów, kilka zespołów natychmiast zwróciło się do nas z propozycją współpracy.

Jeśli mRNA miałoby zadziałać jako lek, nie powinno być bardzo nietrwałe. No i wydajność produkcji białka też powinna być dość wysoka. A nam właśnie udało się tego dokonać.

W naturze mRNA jest nietrwałe, bo jeżeli komórka będzie potrzebowała jakiegoś białka, to sobie wyprodukuje odpowiednio więcej mRNA.

Rzeczywiście natura tak to wymyśliła. Funkcja mRNA jest chwilowa. Jest ono tworzone wtedy, gdy komórka potrzebuje konkretnego białka i to jest regulowane na wielu poziomach, potem ulega ono degradacji.

Natomiast z punktu widzenia zastosowań terapeutycznych, jeśli coś złego dzieje się w komórce, ona już wtedy nie wie, jak sobie pomóc. Nie wytworzy mRNA, które ma rozwiązać ten problem i wtedy my – naukowcy możemy wyjść z inicjatywą i dostarczyć gotowy przepis genetyczny na białko, którego komórce aktualnie brakuje. Tylko że takie dostarczone z zewnątrz mRNA ma trochę trudniejszą drogę i musi być nieco bardziej trwałe, aby być wykorzystane.

A dlaczego lekiem ma być mRNA, a nie pierwowzór przepisu genetycznego na lecznicze białko, czyli DNA?

Początkowo tak myślano i właśnie w tym kierunku szły wysiłki wielu laboratoriów. Zastąpić wadliwy gen prawidłowym albo

dodać, jeśli go w ogóle brakuje. Okazało się jednak, że to nie jest takie proste. By DNA zadziało, musi się zintegrować z DNA gospodarza. Musi ponadto wejść w odpowiednie miejsce. Jeśli to miejsce będzie nieco inne, może to przynieść znacznie więcej szkody niż pożytku.

Tymczasem mRNA nie wchodzi do jądra komórkowego, nie łączy się z naszymi genami. Po tym, jak komórka zrobi na jego podstawie białko, ulega zniszczeniu.

Wracam jeszcze do momentu, gdy zdał Pan sobie sprawę z potencjału terapeutycznego waszych badań. To był rodzaj jakiegoś olśnienia, eureka?

Pamiętam, że czytałem jakieś zgłoszenie patentowe, które dotyczyło czegoś innego. Ale to właśnie ono mnie natchnęło, żeby to RNA o takich właściwościach, jakie udało się nam uzyskać, wykorzystać terapeutycznie.

Kiedy podzieliłem się tą myślą z moimi współpracownikami, oni podchwycili ten temat i zaczęliśmy badać mRNA pod tym właśnie kątem. Chociaż wtedy nie byliśmy jeszcze w stanie przeprowadzić żadnych eksperymentów na modelach zwierzęcych, które mogłyby to potwierdzić. Ale być może właśnie opublikowanie wspomnianej pracy i zawarcie w niej sugestii potencjalnych zastosowań przyciągnęło zainteresowanie.

Jednym z nowych współpracowników został Ugur Sahin, który był profesorem Uniwersytetu w Moguncji i przedstawił się jako osoba, która próbuje od kilku lat wykorzystać mRNA do zastosowań terapeutycznych. Postanowiliśmy połączyć siły. Wystaliśmy mu reagenty do modyfikacji RNA i jego współpracownicy stwierdzili, że rzeczywiście ta nasza modyfikacja w układzie biologicznym działa. A potem okazało się, że prof. Ugur Sahin jest też twórcą firmy BioNTech, która wtedy zatrudniała pewnie 40, może 60 pracowników. Dziś BioNTech jest na ustach całego świata. To ta firma wspólnie z Pfizerem

jako pierwsza wprowadziła na rynek terapeutyk oparte na mRNA. Myślę naturalnie o szczepionce przeciwko wirusowi SARS-CoV-2.

W szczepionce BioNTech i Pfizera wykorzystano wasz wynalazek z atomem siarki?

Nie. Gdyby tak było, rozmawiałby pan z bardzo bogatym człowiekiem (śmiech). Nasz wynalazek jest stosowany w kilkunastu badaniach klinicznych nad szczepionkami przeciwnowotworowymi.

Pierwsze próby zastosowania mRNA w medycynie dotyczyły chyba nie szczepionek przeciwwirusowych, lecz nowotworów?

To zrozumiałe, bo w normalnej sytuacji to choroby nowotworowe są tym zagrożeniem, z którym naukowcy walczą najbardziej intensywnie. Natomiast wybuch pandemii spowodował, że narzędzia, które posiadała nauka, trzeba było wykorzystać w inny sposób. Dzięki temu, że wcześniej zdobyliśmy sporo doświadczeń w wykorzystywaniu mRNA jako terapeutyku – niezależnie od tego, czy chodzi o szczepionki przeciwnowotworowe, czy przeciwwirusowe – nauka była w stanie stworzyć szczepionkę przeciw koronawirusowi tak szybko i tak skutecznie.

Dzisiaj jako zespół naukowy staramy się tworzyć coraz lepsze narzędzia, a następnie wykorzystywać je do tworzenia terapii, z tym że tę działkę terapeutyczną realizujemy już w ramach spółki. Założyliśmy ją razem z moimi współpracownikami z Uniwersytetu Warszawskiego i z immunoonkologami z Warszawskiego Uniwersytetu Medycznego. Spółka nazywa się ExploRNA Therapeutics i jest to inny sposób na komercjalizację wyników naszych badań niż to, co zrobiliśmy poprzednio. Uniwersytet udzielił firmie BioNTech praw do naszego wynalazku w ramach umowy licencyjnej. A teraz

chcemy to robić przez doprowadzenie terapeutyku na wyższy poziom technologiczny i dopiero wtedy podjąć wspólną pracę z dużym przemysłem farmaceutycznym. To konieczne, ponieważ badania kliniczne nowych leków są tak drogie, że jest to nie do udźwignięcia przez świeżo narodzoną spółkę *spin-off* Uniwersytetu. Ale dodam, że mamy dziś wynalazki znacznie lepsze od tego, na który wcześniej udzieliliśmy licencji.

Czyli te badania kliniczne nie będą prowadzone w Polsce?

Ich pierwsza faza jest jak najbardziej w naszym zasięgu. Natomiast koszty drugiej i trzeciej fazy są już tak olbrzymie, że gdyby nawet były takie możliwości, to ze środków publicznych nie powinno się ich prowadzić. Tutaj potrzebny jest partner, który podejmie ryzyko i z którym trzeba się będzie tym sukcesem podzielić. Tak to działa na całym świecie.

Wśród różnych prób terapeutycznych zastosowań mRNA to nowotwory są najtrudniejszym wyzwaniem?

To prawda. Lecznicze szczepionki przeciwnowotworowe są trudniejsze do opracowania niż szczepionka przeciw koronawirusowi. Przeciwnik jest trudniejszy, ponieważ nowotwory to nasze własne komórki, które w wyniku licznych mutacji przekształciły się w komórki zagrażające naszej zdrowej tkance. Dlatego trudniej znaleźć subtelną różnicę pomiędzy komórką zdrową i chorą i wybiórczo zaatakować tylko komórki nowotworowe.

Nowotwory powstały dlatego, że uniknęły szeregu różnych zabezpieczeń, którymi dysponuje komórka, i to sprawia, że aktywacja układu immunologicznego przeciw nowotworom jest też trudniejsza. Ale szczepionki przeciwnowotworowe charakteryzuje również pewna łatwość stosowania. Podobnie jak w przypadku prewencyjnych szczepionek przeciwwirusowych potrzeba stosunkowo niewiele mRNA i białka, które

z niego powstaje, żeby zaktywować układ immunologiczny do zwalczania choroby.

Są natomiast takie schorzenia, których źródłem jest to, że jakieś białko powstaje uszkodzone lub nie powstaje w ogóle. W takich przypadkach również rozważa się leczenie za pomocą mRNA. Z tym, że trzeba go dostarczyć więcej i prawdopodobnie powtarzać terapię co jakiś czas. Takie powtarzanie terapii podnosi poprzeczkę co do jakości terapeutyku, ponieważ będziemy musieli podawać mRNA często, a ono nie jest w 100% niewidzialne dla układu immunologicznego. I w pewnym momencie możemy zaktywować układ immunologiczny przeciwko tej terapii.

Wprowadzanie nowych metod leczenia zawsze wiąże się z licznymi problemami, ale to, co się stało w grudniu 2020 roku, czyli pierwsza dopuszczona do użytku szczepionka oparta na mRNA, to wielki sukces. To wstawienie nogi w drzwi i zapowiedź wielu nowych terapii. Jestem przekonany, że choć ta droga będzie bardzo trudna, czekają nas kolejne sukcesy.

Z dawnymi lekami hamującymi często aktywność białek doszliśmy w pewnym stopniu do ściany, a tu pojawiła się nowa furtka.

Technologia mRNA daje zupełnie nowe możliwości. Oczywiście tradycyjne leki będą nadal wykorzystywane w leczeniu tych chorób, w których terapię się sprawdziły. To samo dotyczy tradycyjnych szczepionek, ale jest wiele dziedzin w medycynie, które potrzebują nowego podejścia. I technologia mRNA jest jednym z nich, choć nie jedynym.

Gdzie jest szansa na najszybszy postęp?

Najwięcej energii i pieniędzy firmy pompują teraz w leczenie szczepionki przeciwnowotworowe. Ale prowadzi się też badania nad chorobami rzadkimi, np. mukowiscydozą czy

SMA (rdzeniowy zanik mięśni). Na SMA są wprowadzane leki, ale niezwykle drogie i Polski nie stać, by je refundować. Warto też wspomnieć o badaniach nad wykorzystaniem mRNA w regeneracji mięśnia sercowego u osób po zawale.

Pracując z mRNA, bardzo dużo się nauczyliśmy o tym, jak można je modyfikować. Ludzie, myśląc o mRNA, często mówią: „Cząsteczka bardzo nietrwała, nie da się chemicznie nic z nią zrobić”. A to nieprawda, nasze doświadczenia w pracy z tą cząsteczką dają nam odwagę, żeby coraz więcej chemicznie z nią robić.

Ostatnio udało nam się zmodyfikować oba końce mRNA i przyłączyć tam z bardzo wysoką wydajnością znaczniki fluorescencyjne. Takie dwa znaczniki na końcach, które jeszcze dodatkowo się ze sobą komunikują, mogą pozwolić na głębsze spojrzenie, co się z tym RNA dzieje w komórkach. A w efekcie zorientować się, co jeszcze można poprawić, co udoskonalić, żeby mRNA było jeszcze lepszym terapeutycznym.

W naszym laboratorium nauka podstawowa cały czas przeplata się więc z zastosowaniami i te dwie dziedziny wzajemnie się napędzają. To jest dla mnie niezwykle atrakcyjne. Widzę, jaka olbrzymia synergia istnieje między tymi dwiema działalnościami, które staram się prowadzić zarówno na Uniwersytecie, jak i w spółce.

Nagroda FNP, jaką Pan w tym roku otrzymuje, jest właśnie za opracowanie narzędzi do badań praktycznych i teoretycznych. Jakie konkretnie procesy komórkowe można badać za pomocą zmienionego przez Pana mRNA?

Wszystkie, w których bierze udział mRNA. Jednym z takich procesów, które badamy we współpracy z Johnem Grossem z Uniwersytetu Kalifornijskiego w San Francisco, jest to, co dzieje się w agregatach składających się z białek i kwasów nukleinowych takich jak np. P-bodies (*processing bodies*). P-bodies tworzą odrębną fazę w komórce. To jakby oczko

tłuszczu w rosole. Okazuje się, że w takim oczku mRNA może być jednocześnie przechowywane i degradowane, czyli zachodzą tam dwa zupełnie sprzeczne procesy. Sprawdzamy, jak to jest regulowane.

Dzięki narzędziom, jakie tworzymy, udało się rzucić trochę światła na procesy zachodzące w tego typu układach. Ale tych zastosowań jest dużo więcej. Często to, co dzieje się w komórkach, oceniamy statystycznie. Tymczasem, jeśli się spojrzy na pojedyncze cząsteczki, np. na pojedynczą cząsteczkę mRNA – jak ona się zachowuje, oddziałując z różnymi białkami, można się znacznie więcej dowiedzieć na temat jej losów w komórce.

Wracam jeszcze do tej pierwszej ważnej modyfikacji mRNA sprzed lat. To wciąż robi wrażenie, że zamiana jednego z 85 tys. atomów tak bardzo zmienia właściwości całej cząsteczki.

Otóż to. To właśnie był ten moment, w którym ja się w tym mRNA zakochałem. Jeżeli taka subtelna modyfikacja tak dramatycznie zmienia właściwości, to znaczy, że to jest potencjalna kopalnia złota, jeśli chodzi o pomysły, projekty naukowe. No i też o odkrywanie nowych zastosowań terapeutycznych mRNA.

Tematem modyfikacji nukleotydów i mRNA zajmuję się już 20 lat. I czasem zastanawiam się, czy uda się nam zrobić coś jeszcze lepszego. Znaleźć jakiś proces, który możemy włączyć, wyłączyć i dzięki temu poprawić właściwości mRNA. Czasem przychodzi zwątpienie. Ale kilka tygodni czy miesięcy później odkrywamy coś, co np. zwiększa efektywność ekspresji genetycznej u myszy stukrotnie.

Ta cząsteczka wciąż Pana zaskakuje po 20 latach?

Tak. I czasem nie rozumiemy, dlaczego dana modyfikacja to spowodowała, ale w odkrywaniu tego jest właśnie cała przyjemność.

W którymś z wywiadów powiedział Pan, że nauka to ciężka, frustrująca robota. Odnoszę jednak wrażenie, że ma Pan z tego jednocześnie wielką frajdę.

To prawda. Mam niesamowicie dużo przyjemności z tego, co robimy. A największą przyjemność czerpię z tego, że mogę pracować z ludźmi. To jedna z moich największych satysfakcji, że wraz z dr hab. Joanną Kowalską stworzyliśmy zespół składający się z ludzi o różnych specjalnościach, uzupełniających się swoimi umiejętnościami. I teraz w zasadzie możemy samodzielnie tworzyć narzędzia, badać je pod kątem biologicznym i szukać zastosowań. W jednolitym zespole nie moglibyśmy nawet o tym marzyć.

Oczywiście wiem, że są naukowcy, którzy mają taką ekspery-tyzę, której my w zespole nigdy nie osiągniemy. Ale wiem też, że jeśli się do nich zwrócę, oni będą mnie wspierać i będziemy robić wspólne projekty.

Jest pewien osobisty element w tej historii. To, czego nauka dokonała w ostatnich dwóch latach, jeśli chodzi o badania związane z mRNA, to prawdziwy przełom. Szczepionki przeciw SARS-CoV-2 zmieniły naszą rzeczywistość i pozwalają myśleć, że możemy wrócić do normalności. Dla mnie takim przełomem był rok 2007. Wtedy właśnie odkrywaliśmy, że atom siarki może wywołać tak wielki efekt. Już znaliśmy wyniki badań biologicznych i zacząłem patentować to na Uniwersytecie.

W tamtych czasach to było niezwykle trudne i frustrujące. Zastanawiałem się, po co to robię. Dlaczego tracę czas na patentowanie zamiast zajmować się badaniami naukowymi? Ale zdarzyło się, że właśnie na początku 2007 roku moja wówczas 2,5-letnia córka zachorowała na białaczkę. I ja przez pół roku spędzałem noce w szpitalu. Patrzyłem na dzieci, które tak bardzo cierpiały, bo zażywane przez nie leki wywoływały skutki uboczne. Niektóre z nich umierały, ponieważ ich

organizmy były tak wycieńczone, że zwykła infekcja potrafiła je zabić.

I wtedy uświadomiłem sobie, że jeśli nie zacisnę zębów i nie złożymy i nie uzyskamy patentu, to nikt tego dalej nie pociągnie, nie zaryzykuje, by zastosować tę technologię. To było niezwykle mocne doświadczenie. Od tamtej pory, mimo że sama nauka bardzo mnie fascynuje, że chcę zdobywać wiedzę o procesach, o sposobach syntezy związków chemicznych, to jednak zawsze myślę, czy to, co robimy, nie mogłoby znaleźć zastosowania, żeby po prostu poprawić ludziom życie.

Czym jest dla Pana Nagroda Fundacji?

Traktuję ją jako docenienie pracy całego zespołu. Mam świadomość, że indywidualnie mogę już coraz mniej, nawet gdybym pracował w laboratorium. Od jakiegoś czasu jestem już tylko trenerem moich młodszych współpracowników. Ale tak naprawdę nasze odkrycia robimy wspólnie. Dyskutujemy, poszukujemy sposobów rozwiązywania problemów, które się pojawiają.

Udzielając rad moim współpracownikom, czasem się mylę i nie mam z tym żadnego problemu. To ważne, żeby w badaniach naukowych nie budować barier między profesorem a studentem. Gdy zaczynałem badania nad nukleotydami i ich wykorzystaniem, postawiłem na pracę z młodymi ludźmi. Teraz mam niestety coraz mniej czasu na rozmowy z nimi, chociaż zawsze sprawia mi to olbrzymią przyjemność.

Zawsze też obiecywałem sobie, że nigdy nie będę udawał mądrzejszego, niż jestem, i to pozwala tym młodym ludziom włączyć swoją kreatywność. To nie następuje z dnia na dzień. Zwykle po 2–3 latach, czasem później, ale trzeba młodym na to pozwolić. Jeżeli będę im ciągle mówił *ex cathedra*, jako profesor, bo jestem w łańcuchu pokarmowym znacznie wyżej,

to ten pierwiastek innowacyjności włączy im się znacznie później.

Czego Panu i zespołowi życzyć?

Żeby nam się ciągle chciało.

Jestem w tym biznesie od 20 lat i do emerytury zostało mi drugie tyle. Więc nie chcę myśleć, że to już finał. Tylko że może właśnie teraz ta nagroda otworzy mi jeszcze jakieś kolejne drzwi. Że będzie inspiracją do dalszej pracy i że może przyjdź z niej coś bardzo ciekawego. Mam wspaniały zespół i dlatego wierzę, że jeszcze wiele przed nami. Oczywiście system pracy w takiej jednostce uniwersyteckiej, gdzie ludzie nie są zatrudnieni na etatach, tylko trzeba stale zdobywać dla nich pieniądze, nie jest łatwy. Przy załamaniu systemu grantowego to wszystko może runąć i zniknąć, jeśli pracownicy się rozejdą.

Na szczęście wasze sukcesy, coraz wyższa pozycja międzynarodowa, mogą wam pomóc w zdobywaniu pieniędzy na przyszłość.

Tak się właśnie stało. Właśnie utworzyliśmy konsorcjum, które nazywaliśmy Dream Teamem. Szefem jest Andrzej Dziembowski (laureat Nagrody FNP w 2018 roku). W skład wchodzi ja oraz Joanna Kowalska, z którą współtworzę nasz zespół, Jakub Gołąb, Dominika Nowis, Robert Hołyst, Marcin Nowotny i Marta Miączyńska, czyli specjaliści z bardzo różnych dziedzin.

Same świetne nazwiska.

Dostaliśmy właśnie finansowanie w ramach Wirtualnego Instytutu Badawczego, jako jedyne konsorcjum w Polsce. To jest ok. 70 mln zł do podziału pomiędzy nasze zespoły. Będziemy się zajmować mRNA. Tylko od drugiego końca cząsteczki [3'] plus cykularyzacją mRNA, bo takie cyrkularne RNA też istnieje i może być użyteczne terapeutycznie.

To coś, co nas niezwykle fascynuje, bo mamy zespół tak znakomitych naukowców, że coś po prostu musi nam się udać. Ponadto jest to finansowanie badań w naszych laboratoriach na następne 5 lat. Co w sytuacji, kiedy moją największą obawą jest to, że nie będzie mnie stać na zatrzymanie tych świetnych ludzi, z którymi razem pracowaliśmy przez lata, jest niesamowitą sprawą. I to akurat zbiegło się z Nagrodą FNP, więc ostatni czas jest dla mnie niezwykle dobry i daje energię do dalszych marzeń.



Prof. Grzegorz Pietrzyński

Laureat Nagrody FNP 2021
w obszarze nauk matematyczno-
fizycznych i inżynierskich
za precyzyjne wyznaczenie
odległości do Wielkiego Obłoku
Magellana

Urodził się w 1971 roku w Nowym Dworze Mazowieckim. W 1995 roku ukończył astronomię na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. W 1999 roku uzyskał stopień doktora (na podstawie pracy pod kierunkiem prof. Andrzeja Udalskiego), doktora habilitowanego – w 2006 roku (Wydział Fizyki UW) za rozprawę pt. *Projekt Araucaria – poprawa kalibracji skali odległości we Wszechświecie na podstawie obserwacji świec standardowych w pobliskich galaktykach*. W 2014 roku otrzymał tytuł profesora nauk fizycznych. Jest wiodącym badaczem w dziedzinie astrofizyki obserwacyjnej i światowym ekspertem w zakresie pomiarów odległości kosmicznych.

Pracuje w Centrum Astronomicznym im. M. Kopernika PAN w Warszawie. Założył i kieruje międzynarodowym projektem Araucaria, którego celem jest kalibracja kosmicznej skali odległości.

Staż podoktorski odbywał w Chile w Universidad de Concepción. Współpracował z Princeton University i Europejskim Obserwatorium Południowym. Przez 20 lat pracował w Obserwatorium Astronomicznym Uniwersytetu Warszawskiego. Prowadził wykłady w placówkach badawczych m.in. w Japonii, Niemczech, Francji, Belgii, we Włoszech i w Chinach.

Jest autorem lub współautorem ponad 400 publikacji naukowych, które ukazywały się w najbardziej prestiżowych czasopismach m.in.: „Nature”, „Science”, „Astrophysical Journal”, „Astronomical Journal” i zostały zacytowane ponad 23 000 razy.

Jest laureatem wielu prestiżowych polskich i zagranicznych grantów badawczych, w tym Europejskiej Rady ds. Badań Naukowych (ERC), nagrody czasopisma „Nature” za wybitny wkład naukowy, nagrody Marii Skłodowskiej-Curie PAN w dziedzinie fizyki, Nagrody Rektora UW. W 2011 roku wraz z dr. hab. Igozem Soszyńskim otrzymał Nagrodę im. Mariana Mięsiowicza przyznawaną przez Radę Polskiej Akademii Umiejętności za wybitne osiągnięcia w dziedzinie fizyki. Jest laureatem programów FOCUS i TEAM Fundacji na rzecz Nauki Polskiej.

Fundacja na rzecz Nauki Polskiej nagrodziła prof. Grzegorza Pietrzyńskiego za precyzyjne wyznaczenie odległości do Wielkiego Obłoku Magellana.

Wielki Obłok Magellana (WOM) to galaktyka satelitarna zlokalizowana najbliżej Drogi Mlecznej i najważniejszy kalibrator kosmicznej skali odległości, wzorzec odległości we Wszechświecie. Odległość do WOM stanowi obecnie podstawę do prawie wszystkich empirycznych wyznaczeń tzw. stałej Hubble’a za pomocą supernowych. Z kolei wartość parametru Hubble’a jest konieczna, aby móc poznać ewolucję naszego Wszechświata i zbadać istotę ciemnej energii. Każde udoskonalenie tego parametru prowadzi do kolejnych odkryć i ważnych ustaleń. Jednym z głównych problemów wyznaczenia stałej Hubble’a była precyzja pomiaru odległości do WOM.

Osiągnięcie prof. Pietrzyńskiego polega na wykonaniu pomiaru odległości do galaktyki Wielkiego Obłoku Magellana z największą jak dotąd dokładnością – wynoszącą 1%. Z jego ustaleń wynika, że WOM znajduje się w odległości 49,59 kiloparseków od Ziemi, czyli ok. 161 tys. lat świetlnych.

Laureat Nagrody FNP udoskonalił metody pomiaru odległości kosmicznych do poziomu, który jest obecnie standardem w astrofizyce. Proces pomiaru odległości do WOM składał się z kilku elementów, które prowadziły do oszacowania dystansu do dwudziestu tzw. zaćmieniowych układów gwiazd podwójnych, krążących wokół siebie i znajdujących się w omawianej galaktyce. Naukowcy mierzyli zaćmienia, prędkości wspomnianych gwiazd, a następnie, przy użyciu prostych praw fizyki wyznaczyli precyzyjne parametry fizyczne badanych obiektów oraz ich odległość.

Wszystko to było możliwe dzięki realizowanemu już ponad dwie dekady projektowi Araucaria, którym kieruje właśnie prof. Pietrzyński (wraz z prof. Wolfgangiem Gierenem). Celem naukowców jest kalibracja kosmicznej skali odległości. Wyniki dotychczasowych prac prezentowano już w wielu publikacjach, kilkakrotnie ukazywały się one w „Nature”.

Pomiar odległości bezwzględnych jest jednym z największych problemów w kosmologii. Aby dokonywać pomiarów najbardziej odległych obiektów, na początku naukowcy muszą precyzyjnie zmierzyć dystans właśnie do Wielkiego Obłoku Magellana. Później, znając odległość, wylicza się jasność absolutną znajdujących się w WOM (i innych galaktykach) wyjątkowo jasnych gwiazd zwanych cefeidami. Są one określane jako tzw. świece standardowe do pomiarów odległości w Kosmosie, bo wyliczenie dystansu do nich jest możliwe dzięki znajomości ich jasności absolutnej oraz pomiarowi jasności obserwowanych.

Obserwacja jasności cefeid w innych galaktykach pozwala na mierzenie kolejnych odległości do jeszcze dalszych obiektów, m.in. do galaktyk, w których były obserwowane supernowe typu Ia. Te pomiary zaś są używane do wyznaczenia jasności absolutnych supernowych. Z kolei, znając absolutną jasność supernowych, możemy, tak jak w przypadku cefeid, porównać ją z jasnością obserwowaną i wyznaczyć ich odległości. Supernowe Ia są jednymi z najjaśniejszych obiektów we Wszechświecie, więc pozwalają wyznaczyć odległości do bardzo odległych zakątków Wszechświata, a co za tym idzie – wyznaczyć wspominany parametr Hubble’a.

Precyzyjny pomiar odległości do WOM stanowi obecnie solidny fundament do wyznaczania stałej Hubble’a z dokładnością ok. 3%.

Naukowcy z projektu Araucaria wykorzystywali w badaniach sieć obserwatoriów Europejskiego Obserwatorium Południowego i Obserwatorium Las Campanas w Chile oraz South African Astronomical Observatory w Kapsztadzie. Część obserwacji wykonano w Obserwatorium Cerro Armazones należącym do Centrum Astronomicznego PAN. Wykorzystano także dane z polskiego przeglądu OGLE (projekt badawczy pod kierunkiem prof. Andrzeja Udalskiego).

Z prof. Grzegorzem Pietrzyńskim rozmawia Patrycja Dołowy

PATRYCJA DOŁOWY: Nagrodę Fundacji na rzecz Nauki Polskiej otrzymał Pan za mierzenie odległości, a dokładnie za precyzyjne wyznaczenie odległości do Wielkiego Obłoku Magellana.

GRZEGORZ PIETRZYŃSKI: Zawsze pasjonowałem się astronomią. Miałem dwa marzenia, które chciałem zrealizować – Chile i mierzenie odległości kosmicznych. I to się udało.

Jesteśmy w Pana gabinecie w Centrum Astronomicznym im. Mikołaja Kopernika PAN w Warszawie. Na ścianach wiszą piękne fotografie: kwitnącej pustyni Atakama w Chile, gór Cerro Armazones, gdzie budowany jest właśnie największy teleskop świata. Całkiem niedaleko znajduje się od niedawna polskie obserwatorium.

Pasjonuję się roślinami, przyrodą, a Chile jest ich skarbnicą. Wyobraźmy sobie kraj, który rozciągałby się od północnej Norwegii prawie do środka Afryki. Fiordów jest tam dwa razy więcej niż w Norwegii, ogromne połacie lodowców – białe pustynie, aż po horyzont. A trzeci region Chile to nieprawdopodobne góry – fiolety, seledyny. Pustynia Atakama kwitnie raz na dziesięć lat. Lokalni mieszkańcy nazywają ten fenomen *desierto florido*. Proszę sobie wyobrazić taki kwietny w najprzeróżniejszych kolorach: żółte krzaki, pieprzowce pokrywające się wieloma barwami. Niezwykłe kontrasty, tysiące kilometrów, wszystko w tym samym kraju. Największy teleskop świata, tzw. Ekstremalnie Wielki Teleskop (ELT), projekt Europejskiego Obserwatorium Południowego (ESO), najważniejszej międzyrządowej organizacji astronomicznej w Europie

powstaje na górze Cerro Armazones. Niedaleko jest właśnie nasze obserwatorium. Obok niemal marsjańska pustynia. Po sąsiedzku znajduje się całe miasteczko dla pracowników, którzy wykonują prace ziemne. My jesteśmy na wysokości 2800 m n.p.m., a teleskop powstaje na 3000 m n.p.m. Z naszej góry widać przepiękne wulkany, które mają 6800 m n.p.m. Do oceanu jest ok. 50 km.

Jeszcze jeden powód, żeby tam pracować.

To jest niezwykle miejsce. Najsuchsza pustynia świata, zimny prąd zatokowy, wysokie góry – wszystko to daje optymalne warunki do prowadzenia obserwacji astronomicznych. Niedługo 80% obserwacji z Ziemi będzie prowadzonych z tego małego regionu: największy teleskop świata po sąsiedzku, 20 km na zachód jest Paranal – cztery wielkie wspaniałe teleskopy i wiele mniejszych. Obserwatorium CTA też jest budowane po sąsiedzku; 400 km od nas znajduje się obserwatorium ALMA – 66 ogromnych anten. Teraz marzymy, żeby tam wrócić, bo przez pandemię minęły prawie dwa lata, odkąd tam nie pracujemy. Wszystko jest zamknięte. Obawiamy się, że jak ruszymy nasze teleskopy, będzie mnóstwo awarii. Ten sprzęt nie lubi być wyłączany.

W naszej pracy opublikowanej w “Nature” w 2013 roku po ponad 10 latach pomiarów raportowaliśmy odległość do Wielkiego Obłoku Magellana wyznaczoną w latach świetlnych z dokładnością do 2%. A w 2019 roku usprawniliśmy pomiar do dokładności 1% i część obserwacji wykonaliśmy już z naszego polskiego obserwatorium na Cerro Armazones. Jak znów je uruchomimy, wykonamy dodatkowe pomiary i może ulepszymy pomiar do 0,8%. Jednak to wymaga jeszcze wiele pracy. Każdy krok zajmuje ok. 10 lat.

Wróćmy więc do pierwszych kroków.

Zaczynałem pracę pod kierunkiem prof. Marcina Kubiaka. Na początku wykonywałem obserwacje astronomiczne w Ostrowiku pod Warszawą. Po raz pierwszy wyjechałem do Chile w 1996 roku jako członek zespołu OGLE (The Optical Gravitational

tional Lensing Experiment) prowadzonego od 1992 roku przez naukowców z Obserwatorium Astronomicznego Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem prof. Andrzeja Udalskiego, promotora mojej pracy doktorskiej. Praca dotyczyła gromad gwiazdowych. Miałem przyjemność obserwować niebo przez polski teleskop w obserwatorium Las Campanas, którego budowę na początku lat 90. współfinansowała zresztą FNP w ramach programu SUBIN. Tak się zaczęła moja przygoda z Chile i przepięknym południowym niebem. Byłem wtedy na I roku studiów doktoranckich. W sumie spędziłem ponad 2,5 roku przy teleskopie na najsuchszej pustyni świata na wysokości 2500 m n.p.m. Od razu zachwyciłem się przyrodą i ludźmi. To było jak poznawanie nieba – nowe zakątki, wcześniej zupełnie dla mnie nieznane.

Aż chce się tam wracać.

W 2000 roku przeprowadziliśmy się całą rodziną do Chile, do Concepción. Spędziłem tam 6 lat. Tam narodził się projekt Araucaria. Wspólnie z prof. Wolfgangiem Gierenem, z którym współpracowałem, rozpoczęliśmy szeroko zakrojone badania ukierunkowane na pomiary odległości kosmicznych. W 2001 roku ukazała się praca grupy The Hubble Space Telescope Key Project podsumowująca wyniki jednego z najbardziej wybitnych i przełomowych projektów w astronomii, mianowicie pomiaru stałej Hubble’a, opartej na obserwacji z użyciem teleskopu kosmicznego Hubble’a. Główną autorką tego projektu była prof. Wendy Freedman. Gdy wraz z prof. Gierenem przeczytaliśmy jej pracę, stwierdziliśmy, że trzeba tam dużo poprawić. Poprawa miała polegać na lokalnym, żmudnym kroku w całej procedurze – udokładnieniu pomiarów odległości do pobliskich obiektów. Pożytkaliśmy bardzo dużo czasu obserwacyjnego na wielu różnych teleskopach w najlepszych obserwatoriach na naszej planecie. Idea była prosta. Chcieliśmy na różne sposoby mierzyć odległości do pobliskich galaktyk, porównywać je, szukać błędów, usprawniać, udokładniać. I w pewnym momencie wpadliśmy na pomysł, by użyć do tych pomiarów układów podwójnych

zaćmieniowych. Zdaliśmy sobie sprawę, że to jest sposób, by dokonać najdokładniejszego z możliwych pomiaru do pobliskich galaktyk, w szczególności takich jak Wielki Obłok Magellana.

Dlaczego właśnie Wielki Obłok Magellana jest tak ważny?

Obłoki Magellana zawsze budziły ogromne zainteresowanie. To były obłoki, które cały czas były na niebie, nie zmieniały się jak chmury. Nazwa pochodzi z kronik wielkiego odkrywcy, który obserwował je w czasie swojej podróży dookoła Ziemi. Przez wieki robiły wrażenie na obserwatorach nieba, ale przełom nastąpił na początku XX wieku, kiedy dowiedzieliśmy się, czym są pobliskie galaktyki. Wszystko to także dzięki pomiarowi. Odległość do innej galaktyki, pobliskiej M31, okazała się dużo większa niż rozmiar naszej galaktyki. Zrozumieliśmy, że te obiekty to nie fragmenty Drogi Mlecznej, nie chmury gazu i pyłu naszej galaktyki, tylko osobne światy, osobne wyspy, składające się z miliardów gwiazd. Duża część współczesnej astrofizyki polega na obserwacji różnych zjawisk w pobliskich galaktykach, bo możemy je zbadać z zewnątrz (nasza galaktyka nie jest pod tym względem najlepsza, bo jesteśmy wewnątrz niej – to tak, jakbyśmy starali się badać topografię Warszawy, będąc w samym centrum miasta), ale również przez to, że są blisko – z bardzo dużą dokładnością. Te obiekty nabrały wagi dla astronomów, gdyż zdaliśmy sobie sprawę, że są to doskonałe laboratoria, w których obserwujemy wiele procesów, różnych rodzajów gwiazd, mgławic. Ich zbadanie jest kluczowe dla zrozumienia całego Wszechświata, całej astrofizyki. Wielki Obłok Magellana jako najbliższa galaktyka stwarza możliwości najdokładniejszych pomiarów. Pomiar odległości do Obłoku Magellana jest istotny nie tylko dla kosmologii, dla skali odległości, ale również w badaniach procesów fizycznych. Gdy obserwujemy jakąś gwiazdę, musimy znać odległość do niej, by móc coś o niej powiedzieć. Wtedy wiemy, ile energii do nas dociera, i możemy stosować narzędzia astrofizyczne. Bez tego nasza wiedza jest uboga. Nie wiedzieliśmy nic o naturze fizycznej tych obiektów, dopóki nie zmierzylśmy ich odległości.

Na czym polega przetóm w mierzeniu odległości kosmicznych?

W astronomii bardzo łatwo jest mierzyć odległości względne, powiedzieć, że między jedną a drugą galaktyką jest pięć razy taka odległość, jak między drugą a trzecią. Natomiast bardzo trudno jest mierzyć odległości bezwzględne. Do tego naszą kosmiczną drabinę odległości trzeba odpowiednio wykalibrować. Musimy znać odległość do jednej z galaktyk. Mając ten pomiar i znając odległości względne, można już zmierzyć odległość w kilometrach czy latach świetlnych. Inaczej mówiąc: konieczne jest wyznaczenie wzorca, względem którego możemy mierzyć odległości do innych obiektów. Im dokładniejszy jest ten wzorzec, tym bliżej jesteśmy właściwego pomiaru bezwzględnego.

Co w tym kosmicznym laboratorium dało wykorzystanie akurat gwiazd zaćmieniowych?

Układy podwójne zaćmieniowe od ponad 100 lat są uważane za jedną z najlepszych metod pomiarów odległości. To jest bardzo szczególny rodzaj gwiazd, z których astronomowie czerpią wiedzę o ich parametrach fizycznych. Trudnością jest wybranie specyficznych układów zaćmieniowych w Wielkim Obłoku Magellana. W pracy z 2001 roku opublikowanej w „Nature” odległość została wyliczona za pomocą różnych metod z dokładnością do 10%. Mieliśmy do dyspozycji przepastną bazę OGLE. Bardzo długo ją analizowaliśmy, by wybrać najbardziej obiecujące układy zaćmieniowe.

Układy dwóch gwiazd są częste?

Bardzo powszechne. Są też układy wielokrotne – potrójne, poczwórne. To jest raczej reguła niż wyjątek. Niektórzy astronomowie twierdzą, że wszystkie gwiazdy rodzą się w układach podwójnych. A według naszej wiedzy ponad połowa z nich występuje w takich układach. Słońce akurat nie. Generalnie układów podwójnych gwiazd jest dużo. Te, które wybraliśmy, są bardzo specyficzne. Po pierwsze, żeby móc je obserwować jako zaćmieniowe,

muszą być położone w stosunku do obserwatora pod odpowiednim kątem. Wtedy gwiazdy w układzie podwójnym zakrywają się wzajemnie podczas wędrówki wokół wspólnego środka masy. To jest cykliczne w okresach, w jakich się poruszają. Podobnie jest z tranzytami Wenus na tle tarczy słonecznej, ale w naszym przypadku nie mamy planety i gwiazdy, tylko dwie gwiazdy.

Po drugie, potrzebowaliśmy gwiazd chłodnych, bo tylko dla takich mamy bardzo dobrą kalibrację. Natomiast zazwyczaj gwiazdy chłodne są zbyt słabe. Żeby dokonać tego, co zaplanowaliśmy, trzeba było znaleźć olbrzymy w układach zaćmieniowych. To są ogromne, chłodne gwiazdy. Emitują dużo energii i są wystarczająco jasne, aby móc je obserwować w pobliskich galaktykach z dużą dokładnością. Wielkie gwiazdy potrzebują dużych orbit. Okres obiegu jednej gwiazdy względem drugiej wynosi kilkaset dni. Nasze obserwacje musiały być więc rozciągnięte w czasie. Na początku typowaliśmy jedne kandydatki, potem pojawiły się nowe. Otrzymaliśmy czas na największych teleskopach świata, żeby zmierzyć prędkości, właściwości fizyczne, odległości, posługując się naszymi zależnościami. Wcześniej nie było to zmierzone tak dokładnie, bo nie było wystarczająco dobrych układów. Nie każdy nadaje się do pomiaru odległości.

Na czym dokładnie polega precyzja tego pomiaru?

Sama idea jest bardzo prosta, mamy prawo Keplera, które ściśle określa, jak okres obiegu powinien się wiązać z masami gwiazd. Czyli używamy prostych praw fizyki. Dodatkowo mamy informacje, które łatwo uzyskać – geometryczne efekty – gdy jedna gwiazda zakrywa drugą, obserwujemy tzw. zaćmienie. Kształt tego zaćmienia pozwala na pomiar. Mierzymy jasność gwiazdy i kształt zaćmienia, który zawiera pełną informację o rozmiarach. Musimy jeszcze znać odległość pomiędzy gwiazdami w układzie zaćmieniowym. Na szczęście znamy też prędkości gwiazd w ich ruchu dookoła środka ciężkości. Obserwujemy linie, jak one się przesuwają – efekt Dopplera, i natychmiast mamy prędkości. A ta informacja pozwala nam wyznaczyć roz-

miary liniowe gwiazd z dokładnością do dziesiątych procenta. Chciałbym zwrócić uwagę na to, że obserwując ten układ zaćmieniowy gwiazd, jesteśmy w stanie zmierzyć rozmiary fizyczne dwóch składników gwiazdy z dokładnością do ok. 0,5%!

To jest niestychane!

Podobnie masy. Tu jesteśmy w stanie osiągnąć jeszcze lepszą dokładność. Nie ma innej metody, która pozwoliłaby nam zmierzyć masę gwiazdy z taką dokładnością. Metoda układów zaćmieniowych pozwala zmierzyć najbardziej dokładną, bo geometryczną odległość do Wielkiego Obłoku Magellana. Geometryczną dlatego, że odległość wyznaczana jest za pomocą szkolnej geometrii trójkąta prostokątnego ze stosunku rozmiaru liniowego i kąтового gwiazdy. Jeśli wiemy, jakie są te rozmiary (które dla gwiazd są bardzo małe), dzielimy jedno przez drugie i natychmiast dostajemy wynik. Proste i dokładne. Im obiekt jest dalej położony, tym jest mniejszy. Od dłuższego czasu było wiadomo, jak to zrobić, ale wiedzieć to jeszcze nie znaczy móc.

W czym tkwiła trudność?

Z analizy układów zaćmieniowych potrafimy dokładnie wyznaczyć rozmiary liniowe, natomiast rozmiary kątowe były osobnym zadaniem. Istnieje relacja pomiędzy blaskiem gwiazdy, jej temperaturą i rozmiarem kątowym. Tę zależność można wykalibrować, obserwując gwiazdy, które znajdują się blisko Słońca. Dla takich gwiazd jesteśmy w stanie zmierzyć rozmiary kątowe metodami interferometrii. Można też oczywiście pomierzyć ich jasności i temperatury, a wtedy mamy już wszystko, czego potrzebujemy.

Przy większych odległościach zależności będą podobne?

Tak, te same rodzaje gwiazd będą spełniały takie same zależności. Taką zależność można łatwo wykalibrować i my to zrobiliśmy. Kalibracji możemy użyć do wybranych przez nas układów zaćmieniowych. Tam zmierzemy rozmiary liniowe na podstawie klasycz-

nych obserwacji, jak to astronomowie robią od 100 lat. A dodatkowo wykorzystujemy tę relację, żeby uzyskać rozmiary kątowe. Dzielimy jedno przez drugie i obliczamy odległość. Piękno tkwi w prostocie. Proszę sobie wyobrazić, że polską kosmiczną linią mierzymy rozmiary kątowe gwiazd z dokładnością do 0,8%.

Zajęto wam to 20 lat.

Pomiar wymagał doprecyzowania. Poświęciliśmy wiele lat, żeby z układów zaćmieniowych stworzyć doskonałe narzędzie do pomiarów odległości. Następnie zastosowaliśmy to narzędzie i wyznaczyliśmy indywidualne odległości do 20 obiektów w Wielkim Obłoku Magellana. Potem to uśredniliśmy i mamy naszą finalną odległość.

Mówi Pan: my. Kto jest w Pana zespole?

To jest największe osiągnięcie, moje i profesorów biorących udział w tym projekcie. Mamy bardzo młody zespół, który poświęcił wiele czasu, żeby wykonać wszystkie konieczne obserwacje oraz przeanalizować zgromadzone dane. Na początku byłem ja i prof. Gieren – od tego się zaczęło. Później dołączyło jeszcze kilka osób. W tamtym czasie spędzałem ok. 100 nocy w roku w różnych obserwatoriach. Teraz jest inaczej. Gdy wróciłem z Concepción do Polski, uzyskałem dwa granty z Fundacji na rzecz Nauki Polskiej: FOCUS i TEAM, które pozwoliły mi zbudować grupę badawczą tutaj, w Polsce. W Warszawie jest 14 osób związanych obecnie z naszym projektem. To jeden z najmłodszych zespołów w astronomii.

Współpracujecie nie tylko w ramach warszawskiej grupy?

Jest kilka instytucji, z którymi mamy relacje naukowe, prowadzimy wspólnie badania. Araucaria jest projektem międzynarodowym – bierze w nim udział około 30 astronomów z 11 krajów świata. Najściślejszą współpracę mamy z uniwersytetem w Concepción – razem stanowimy trzon tego zespołu. Mamy też bardzo owocną współpracę z Uniwersytetem Paryskim,

z zespołem prof. Pierre'a Kervella. Właśnie otrzymaliśmy grant ERC Synergy, dzięki któremu będziemy kontynuować badania. Bardziej dokładny pomiar odległości do Wielkiego Obrotu Magellana jest jednym z naszych celów. W ten projekt jest zaangażowanych więcej instytucji, dołączyło Centrum Fizyki Teoretycznej PAN w Warszawie i Heidelberg Institute for Theoretical Physics. Będziemy stosować nowe metody pomiaru odległości.

Wykorzystacie polskie obserwatorium w Chile?

Obserwatorium zostało przekazane Centrum Astronomicznemu im. Mikołaja Kopernika PAN w 2020 roku. Znajduje się na terenie ESO. Grupa naukowców zgłosiła się do nas z propozycją przekazania nam obserwatorium astronomicznego w celu usprawnienia naszych badań. Uznali, że są one na tyle ciekawe, że bylibyśmy w stanie rozwinąć obserwatorium do badań astrofizycznych. Na początku nie chcieliśmy o tym słyszeć, wydawało się to zbyt ambitne, ale z czasem uznaliśmy, że warto. Mamy tam 5 małych teleskopów, które będą używane do naszych badań w sposób dostosowany do określonych potrzeb. Teraz w astronomii jest dobry moment na badania bardzo jasnych gwiazd, do czego wystarczą małe teleskopy. A później bardzo przydatne będą duże teleskopy dostępne w najbliższej okolicy. Jesteśmy odpowiedzialni za prowadzone tam badania. Od polskiego ministerstwa nauki dostaliśmy szczodre finansowanie, które pozwoli nam zbudować bardzo dobre teleskopy. Już 8 grudnia wybieramy się do firmy ASA po odbiór nowych teleskopów, ale w Chile musimy wykonać prace ziemne, które są na razie opóźnione. Musimy się uzbroić w cierpliwość. Dzięki ERC Synergy dysponujemy budżetem w wysokości 14 milionów euro, który obejmuje też środki na budowę 2,5-metrowego teleskopu oraz kamery podczerwonej. Spodziewamy się, że uda się to zrobić za 2–3 lata.

Jak na Wasze czekanie po 10 lat te dwa lata to za chwilę.

Specyfika obserwacji astrofizycznych rzeczywiście wymaga wiele cierpliwości. To nie wygląda tak jak w laboratorium fizycznym,

że zaprojektujemy eksperyment i powtarzamy go. Czasami coś pojawia się na niebie. Żeby drugi raz zobaczyć coś podobnego, trzeba czekać wiele lat, więc astronomowie są raczej cierpliwymi naukowcami. My zresztą przez te 3 lata nie będziemy próżnować, bo już mamy małe teleskopy i pełne ręce roboty.

Będziecie doprecyzowywać pomiary, aż dojdziecie do perfekcji?

Precyzja pomiaru jest niezwykle ważna. Jeśli spojrzymy na historię astrofizyki, każde kolejne usprawnienie dokładności prowadziło do rewolucji w naszych poglądach. Jednym z przykładów jest odkrycie ekspansji Wszechświata. Pomiary odległości stały się na tyle dokładne, że potrafiliśmy zobaczyć, że nasz Wszechświat się rozszerza. To było ogromne odkrycie, mające wpływ nie tylko na astronomię, ale też na filozofię, literaturę – to jest część naszego dziedzictwa kulturowego – nasza wiedza o Wszechświecie. Kolejne udokładnienie doprowadziło do odkrycia ciemnej energii. Wszechświat nie tylko się rozszerza, ale robi to coraz szybciej. Nie wiemy dlaczego, więc pojawiło się pojęcie ciemnej energii, która jest zagadkowym tworem o nieznanej naturze fizycznej. Jeśli chcemy wiedzieć coś więcej, znów musimy poprawić dokładność. Jedną z metod zbadania właściwości ciemnej energii jest udokładnienie pomiaru stałej Hubble’a przy pomocy świec standardowych. Obecna dokładność 2% nie jest wystarczająca. I najważniejsza rzecz. Często jesteśmy pytani, jaki jest pożytek z tego, że znamy odległość do jakiejś galaktyki. Obiekty kosmiczne są doskonałymi laboratoriami do testowania współczesnej fizyki. Wszystkiego, co wiemy. Obecnie mamy kilka metod pomiarów. Jedną, o której opowiedziałem – wyznaczenie drabiny kosmicznych odległości. Astronomowie zazwyczaj używają dziś układów zaćmieniowych, cefeid i supernowych. To najdokładniejsza i dająca się łatwo zweryfikować w każdym kroku metoda. Wiemy, jakie ma błędy. Z drugiej strony jest metoda kosmologiczna – analiza promieniowania mikrofalowego. Satelita Planck sporządził doskonałe mapy tego promieniowania. Na podstawie analizy możemy

też wyznaczyć stałą Hubble’a. Dokładność jest oszałamiająca – do 1%, tylko trudno zweryfikować błędy. I tu zaczynają się problemy. Mamy dwa różne pomiary – nasz badający ekspansję Wszechświata w chwili obecnej i tamten, który mierzy ekspansję na wczesnych etapach ewolucji. Możemy te wyniki zestawić i porównać, bo dysponujemy modelem kosmologicznym. Tylko, że one się nie zgadzają. Nie da rady pogodzić tych pomiarów. Jest coraz więcej doniesień pokazujących anomalie – mówimy o kryzysie fizyki współczesnej, tzw. *Hubble tension*.

Jesteśmy w przeddzień zmiany paradygmatu?

Być może. Powstały setki prac, w których próbowano to rozwiązać na wszystkie możliwe sposoby. I teraz jest zasadnicze pytanie: „Czy rzeczywiście mamy tu anomalie, czy może dokładność, z którą to mierzymy, nie jest wystarczająco dobrze zweryfikowana?”. Aczkolwiek błędy występują ponad wszelką wątpliwość. Chcemy zweryfikować błędy w wyznaczaniu stałej Hubble’a za pomocą świec standardowych. Trudno, żeby w tak złożonych pomiarach bardzo precyzyjnie wyznaczyć dokładność. Może weryfikując te metody, odkryjemy coś zupełnie nowego. Pamiętam, że kiedy wykonywano pomiary z dokładnością do 10%, pomijano mnóstwo elementów, które my teraz rozważamy. Im dalej w las, tym więcej drzew. Wiemy, jak to sprawdzać, mamy coraz lepsze instrumenty. Chcemy poprawić polską linię kosmiczną. To może zweryfikować całą współczesną fizykę. Będziemy wtedy musieli poukładać wiedzę od nowa.

To nie ma szans się znudzić!

Najpierw miałem zostać biologiem, potem sportowcem, w końcu zostałem astronomem. Po maturze fizyka zaczęła mi się wydawać niewystarczająco ciekawa, więc wybrałem astronomię – kontakt z niebem. Każda obserwacja jest jak ekspedycja naukowa, którą trzeba przygotować. Jest dreszczyk emocji, czy będą chmury. Cała otoczka tego wszystkiego – bardzo to lubię.

Niektórzy mają wręcz odwrotnie, chcą mieć pełną kontrolę nad tym, co jest w małych próbkach. A u Pana 10 lat przygotowań, chmury i wszystko może pójść nie tak!

Jest bardzo dobra książka napisana przez kanadyjskiego astronoma George'a S. Mumforda *Cloudy night*. Autor opisuje różne bardziej i mniej śmieszne historie, które przydarzają się astronomom. Jest suspens – czy się uda, czy nie. Jest też ogromny postęp technologiczny. Pozwala nam on dokonywać pomiarów, o których niedawno mogliśmy tylko pomarzyć. Są też misje satelitarne, jak europejska misja Gaia. Będziemy mieli informacje o tych najjaśniejszych gwiazdach. To będzie naprawdę rewolucja. Ustalimy krzywe zmian blasku dla układów zaćmieniowych z kosmiczną dokładnością. Nieprawdopodobnej jakości dane. Wystarczy je uzupełnić. Znaleźliśmy naszą niszę i wspianą synergii między projektami. Ten finansowany przez ministerstwo ma tytuł: „Wsparcie misji kosmicznych i teleskopów ESO”. My to naprawdę zrobimy. Jeśli chodzi o kosmiczne odległości, to ma głęboki sens.

To niezwykle, że każda kolejna większa precyzja może kompletnie zmienić nasze postrzeganie świata.

Żyjemy w niesamowitym momencie. Mamy precyzyjną kosmologię, co pozwala nam weryfikować współczesną fizykę. A z drugiej strony kosmiczne pomiary z ich klasycznymi metodami. Kto wie, może koncept stałej Hubble'a jest błędny i trzeba będzie zweryfikować teorię. Stałą Hubble'a pierwszy wyznaczył Georges Lemart. Hubble był trzeci w kolejce, ale nikt nie wierzył w żadne z tych trzech wyznaczeń, bo stała Hubble'a określa też wiek Wszechświata – im większy, tym starszy. W pierwszym pomiarze wyszło, że świat musiałby mieć 2,5 miliarda lat, a już wtedy wiedzano, że jest starszy. Więc w ten koncept nikt nie wierzył. Dopiero później pokazano, że zrobiono błędy w tych pierwszych wyliczeniach. W pomiarach stałej Hubble'a dokonano wielu małych rewolucji. Kryzysy są mobilizujące. W tym tkwi całe piękno nauki. Nasza wiedza jest najlepsza, ale dziś. Jutro może być konieczna weryfikacja.



Prof. Cezary Cieśliński

Laureat Nagrody FNP 2021
w obszarze nauk humanistycznych
i społecznych za rozwiązanie
kluczowych problemów
deflacionistycznej teorii prawdy

Urodził się w 1965 roku w Warszawie. W 1999 roku uzyskał doktorat z filozofii na Uniwersytecie Warszawskim. Habilitację w 2010 roku przyniosła mu praca pt. *Deflacyjna koncepcja prawdy. Wybrane zagadnienia logiczne*. W 2021 roku uzyskał tytuł profesora. Jego zainteresowania naukowe dotyczą logiki matematyczno-filozoficznej, teorii modeli, teorii prawdy i filozofii języka. Należy do światowej czołówki specjalistów w zakresie badań nad teorią prawdy.

Jest kierownikiem Zakładu Logiki na Wydziale Filozofii Uniwersytetu Warszawskiego, a także członkiem Rady Naukowej Dyscypliny Filozofia tej uczelni. Realizuje dwa granty Narodowego Centrum Nauki: „Teorie Prawdy i ich siła” oraz „Epistemiczne i semantyczne zobowiązania fundamentalnych teorii matematycznych” (we współpracy z prof. Alim Enayatem z Uniwersytetu w Göteborgu).

Był promotorem trzech prac doktorskich. Jest autorem dwóch monografii i kilkudziesięciu artykułów w czasopismach, m.in. w „Journal of Philosophical Logic” i „Mind”.

W 2019 roku otrzymał Nagrodę Naukową I Wydziału PAN w dziedzinie filozofii im. Tadeusza Kotarbińskiego oraz Nagrodę Naukową im. Jana Łukasiewicza Polskiego Towarzystwa Logiki i Filozofii Nauki. Obie za monografię dotyczącą deflacionistycznej teorii prawdy pt. *The Epistemic Lightness of Truth*.

Fundacja na rzecz Nauki Polskiej doceniła prof. Cieślińskiego za rozwiązanie kluczowych problemów tzw. deflacionistycznej teorii prawdy, której zwolennicy opowiadają się przeciwko mnogości najróżniejszych definicji prawdy.

Ustaleniem definicji pojęcia prawdy filozofowie zajmowali się od czasów starożytności. Twórcą klasycznej definicji prawdy – według której jest to zgodność treści sądu z rzeczywistym stanem rzeczy, którego ten sąd dotyczy – był Arystoteles. Do tej pory pojęcie prawdy nęściło wielu trudności, a przez wieki powstało wiele jego definicji.

Prof. Cezary Cieśliński w swoich pracach nawiązuje do tradycji lwowsko-warszawskiej szkoły logiki i filozofii, której początki

sięgają końca XIX wieku. Do szkoły tej należał też logik, matematyk i filozof Alfred Tarski, który dążył do stworzenia formalnie precyzyjnego pojęcia prawdy. Określił ją jako pewną cechę zdań logicznych. To umożliwiło rozwój badań nad m.in. logiką i filozofią matematyki. Podążający za jego poglądami zwolennicy deflacionistycznej teorii prawdy uważają, że najrozmaitsze koncepcje prawdy zarówno dawne, jak i bardziej współczesne (m.in. klasyczne, nieklasyczne, koherencyjne, pragmatyczne, realistyczne, antyrealistyczne, epistemiczne) różnią się jedynie detalami, które są tylko niepotrzebnym uzupełnieniem pojęcia prawdy. Wobec tego, z tak mnogich teorii, można – ich zdaniem – „spuścić powietrze”, odejmując kolejne zbędne elementy. Pozbawione tych nadmiarowych szczegółów teorie będą spełniały kryteria prawdy opisane przez wspomnianego wyżej Alfreda Tarskiego. W języku angielskim można opisać ten proces jako *deflation*, skąd pochodzi polski termin „deflacionizm”.

Prof. Cieśliński wniósł przełomowy wkład w prace nad tą problematyką, a jego nagradzana monografia *The Epistemic Lightness of Truth* z 2017 roku znacząco przyczyniła się do rozwoju deflacionizmu. W nawiązaniu do tytułu pracy prawdę można określić jako „lekką”. Zgodnie z myślą przewodnią monografii: prawda jest raczej narzędziem dokonywania generalizacji niż istotną cechą np. wypowiedzi. Aby wyrażana przez kogoś myśl była prawdziwa, nie musi wcale strukturalnie odzwierciedlać stanu rzeczy w świecie. W nagrodzonej pracy laureat pokazuje, że logika pozwala na precyzyjne formułowanie złożonych idei filozoficznych. Jest to istotne zwłaszcza w przypadku złożonych teorii prawdy. Prof. Cieśliński wykorzystuje narzędzia logiki, aby zaprezentować jasne i precyzyjne sformułowanie szeregu rozważanych deflacyjnych koncepcji. Bada te teorie, przedstawia nieoczywiste i istotne wnioski ich dotyczące.

Książka stanowi przykład połączenia matematyki i filozofii. Zaprezentowane są w niej niektóre z najbardziej wyrafinowanych matematycznie prac prof. Cezarego Cieślińskiego. Dotyczą one strategii rozwiązywania problemów postawionych w książce i za pomocą logiki pokazują poprawność przedstawianych teorii.

Z prof. Cezarym Cieślińskim rozmawia Anna Mateja

ANNA MATEJA: Zdaniem deflacionisty z licznie istniejących teorii prawdy, zbyt bogatych w treści, trzeba „spuścić powietrze”. Co to znaczy? Istnieje zbyt wiele definicji prawdy? Możliwe jest stworzenie jednej?

CEZARY CIEŚLIŃSKI: Filozofowie na przestrzeni wieków zaproponowali wiele konkurencyjnych definicji prawdy, które nie były ze sobą zgodne. Arystoteles, autor klasycznej definicji tego pojęcia, nazywanej też korespondencyjną, twierdził – w dużym uproszczeniu – że prawda to po prostu zgodność myśli z rzeczywistością. Twórcy pragmatycznej definicji kładli z kolei nacisk na użyteczność – prawdziwa myśl miała prowadzić do skutecznego działania. Pojawiły się też koncepcje koherencyjne, konsensualne, ewidencyjne, weryfikacjonistyczne. I wiele innych. W przypadku każdej z nich kłopotliwe okazywały się szczegóły, a dociekliwe pytania podważające wartość podawanej definicji nie omijały nawet tej, którą podawał wspomniany przed momentem Arystoteles. Na czym bowiem ma polegać owa zgodność myśli z rzeczywistością? Jeśli jest relacją, w jaki sposób można ją precyzyjnie scharakteryzować?

Kolejne problemy, utrudniające rozważania na temat teorii prawdy, miały charakter logiczny, a przynosiły je paradoksy, w których pojęcie prawdy było używane. Najstynnijszym z nich jest paradoks kłamcy – rozumowanie, w którym rozważamy wyrażenie: „Zdanie, które teraz wypowiadam, jest fałszywe”. Język umożliwia nam budowę tego rodzaju zdań, mimo że zawarta w nich sprzeczność jest oczywista: jeżeli to

zdanie jest prawdziwe, to znaczy, że głosi fałsz, a jeśli jednak jest fałszywe, wynika z tego, że głosi prawdę. Trudności, z jakimi musieli się mierzyć teoretycy prawdy, były tak frustrujące, że w latach 20. XX wieku wielu filozofów i logików odnosiło się z rezerwą do pojęć semantycznych, w tym do prawdy. Było ono dla nich na tyle podejrzane, że wręcz uważali je za zbędne, przekonując do rezygnacji z postępowania się nim. Aż pojawił się Alfred Tarski.

Urodzony w 1901 r. uczony został wychowany, m.in. za sprawą Tadeusza Kotarbińskiego, Stanisława Leśniewskiego i Jana Łukasiewicza, w duchu lwowsko-warszawskiej szkoły filozoficzno-logicznej. Jego prace nie tylko uczyniły z logiki bardziej autonomiczną dziedzinę, okazały się też istotne dla filozofii analitycznej i lingwistyki.

Stało się tak, ponieważ Tarski, używając narzędzi matematyczno-logicznych, sformułował pierwszą formalną definicję prawdy, nazwaną semantyczną. Przedstawię kwestię w dużym uproszczeniu: scharakteryzował on pojęcie prawdy jako cechę zdań języka przedmiotowego, ale opisywaną w metajęzyku, a nie w języku przedmiotowym. Zwolennicy deflacionizmu – dość luźnego zespołu poglądów filozoficznych, który pojawił się na początku lat 90. XX wieku – domagając się „spuszczenia powietrza” z teorii prawdy, uważali, że w dyskusji na temat prawdy trzeba wrócić do Tarskiego i sformułowanego przez niego warunku adekwatności definicji prawdy. Tarski przyjął bowiem, że z adekwatnej definicji prawdy powinny wynikać wszystkie równoważności o postaci: „p jest prawdziwe wtedy i tylko wtedy, gdy p”. Podejmując tę myśl, deflacyoniści stwierdzili, że powiedzenie, iż zdanie jest prawdziwe, znaczy dokładnie tyle, ile stwierdza samo to zdanie. I nic więcej. Deflacyoniści postawili ponadto ambitną tezę, że pojęcie prawdy nie ma istotnego znaczenia w wyjaśnieniach niesemantycznych faktów i w uzasadnieniach niesemantycznych przekonań.

Proszę o przykład.

Za fakt niesemantyczny uznaje się taki, który można opisać bez odwoływania się do takich pojęć jak prawda, np. „Wychodząc z domu, zabrałem parasol”. Założmy, że ktoś mnie pyta, dlaczego tak postąpiłem. Odpowiadam: „Ponieważ było prawdą, że padał deszcz”. Deflacionista podsumuje te rozważania krótko: „Po co odwoływać się tu do pojęcia prawdy, jeżeli można się ograniczyć do stwierdzenia, że «Zabrałem parasol, bo padał deszcz?»”. W odniesieniu do przykładów tego rodzaju teza o eliminowalności pojęcia prawdy z wyjaśnień może się sprawdzać. Deflacioniści uważają jednak, że pojęcie prawdy nie figuruje w istotny sposób w żadnym wyjaśnieniu niesemantycznego faktu. Żeby była jasność: oni nie kwestionują użyteczności pojęcia prawdy, ale uważają, że prawda jest użyteczna wyłącznie dlatego, że pozwala nam generalizować.

Zilustrujmy to na prostym przykładzie. Istnieje nieskończenie wiele zdań odpowiadających schematowi: „jeśli p, to p”. Na przykład: „Jeśli psy są czworonogami, to psy są czworonogami”, „Jeśli pada deszcz, to pada deszcz”, „Jeśli studenci uczą się pilnie, to studenci uczą się pilnie” itd. Akceptujemy każde z tych zdań z osobna. Jak jednak wyrazić naszą akceptację ich wszystkich? Potrafimy to zrobić dzięki pojęciu prawdy. Możemy mianowicie powiedzieć: „Każde zdanie, które ma postać: «jeśli p, to p», jest prawdziwe”. Na tym polega generalizacja. Powtórzę: tak deflacioniści, jak nie deflacioniści zgadzają się, że pojęcie prawdy jest użyteczne, bo pozwala budować uogólnienia. Tyle że ci drudzy uważają, że służy między innymi do tego, a pierwsi utrzymują, że do niczego więcej.

Na czym polegają badania Pana Profesora?

Moje i mojej grupy, którą tworzą Mateusz Łętyk i Bartosz Wciśło oraz prof. Ali Enayat z Uniwersytetu w Göteborgu. Dwaj pierwsi byli moimi doktorantami. Mateusz Łętyk za dysertację doktorską otrzymał Nagrodę Prezesa Rady Ministrów, a Bar-

tosz Wcisło Nagrodę Betha, czyli jedno z najważniejszych międzynarodowych wyróżnień przyznawanych za prace z logiki.

Zajmujemy się formalnymi teoriami prawdy, a deflacionizm był tylko początkową motywacją dla naszych badań prowadzonych w ramach tzw. filozofii formalnej. Oznacza to, że w analizie i rozwiązywaniu problemów używamy – co zasługuje na podkreślenie – narzędzi matematycznych i logicznych. Punktem wyjścia jest intuicja dotycząca dowolnego zagadnienia filozoficznego, które intryguje badacza, a więc, co oczywiste, nie tylko teorii prawdy. Wartość naszej intuicji sprawdzamy w następnym kroku, próbując przełożyć jej treść na formalną teorię wyrażoną w precyzyjnym języku, tzn. taką, która ma ściśle określone aksjomaty i reguły wnioskowania. Następny, bardzo ważny etap naszej pracy to badanie formalnych własności takiej teorii.

Etap bardzo matematyczny.

Nie może być inaczej. Zajmujemy się wtedy dowodzeniem twierdzeń opisujących formalne własności teorii. Interesuje nas np. siła teorii. Zaznaczę przy tym, że to pojęcie może mieć różny sens, więc za każdym razem trzeba precyzyjnie zdefiniować, o co dokładnie pytamy. Inaczej niż u matematyków zakończenie dowodu nie kończy pracy filozofa formalnego. Wracamy wtedy do punktu wyjścia – porównujemy uzyskane rezultaty z intuicjami, od których badanie się rozpoczęło, a ostatnim etapem pracy jest filozoficzna interpretacja wyników matematycznych.

Tak prowadzone badania pozwoliły Panu napisać monografię *The Epistemic Lightness of Truth*, wydaną w 2017 r., którą uznaje się dziś za przełomową. Na czym polega jej wyjątkowość?

Kluczowe było dla mnie pytanie o aksjomaty teorii prawdy, czyli twierdzenia przyjmowane bez dowodu. Które z nich

mają charakter twórczy, a które nie? Pracę rozpocząłem od intuicji, wedle której twierdzenie: „Zdanie p jest prawdziwe” jest równoważne stwierdzeniu samego p . Tej intuicji odpowiada teoria formalna, której aksjomaty mają postać: „ p jest prawdziwe wtedy i tylko wtedy, gdy p ”, gdzie w miejsce litery p można podstawić dowolne zdanie niezawierające predykatu prawdziwości. Można rozważyć dodanie aksjomatów bardziej złożonych, np. „zdanie o postaci « p i q » jest prawdziwe wtedy i tylko wtedy, kiedy « p » jest prawdziwe i « q » jest prawdziwe” (inaczej mówiąc: koniunkcja jest prawdziwa, gdy oba jej człony takie właśnie są). Ale czy dodanie takich aksjomatów pozwoli dowodzić nowych niesemantycznych twierdzeń? Bywa różnie, wszystko zależy od tego, jakie to są aksjomaty. Rzecz w tym, że nietwórczość pewnych aksjomatów...

Co to znaczy, że aksjomat jest nietwórczy?

Aksjomaty twórcze pozwalają udowodnić coś istotnie nowego. Nietwórcze takiej własności nie posiadają.

I te nietwórcze aksjomaty...

...były problemem dla deflacyjnej koncepcji prawdy. Jej przeciwnicy zarzucali bowiem deflacionistom, że skoro, jak oni twierdzą, prawda jest pojęciem niewinnym – nie figuruje w nowych wyjaśnieniach, służy jedynie do tworzenia uogólnień – to aksjomaty teorii prawdy powinny mieć nietwórczy charakter. Tymczasem pewne bardzo naturalne aksjomatyki, charakteryzujące pojęcie prawdy dla zdań arytmetycznych, są twórcze i pozwalają udowodnić niesprzeczność arytmetyki. W samej arytmetyce bez aksjomatów teorii prawdy byłoby to niemożliwe, co opisuje tzw. drugie twierdzenie Gödla o niedowodliwości niesprzeczności. No i to jest problem, bo wspomniane aksjomatyki są bardzo naturalne. Co jest złego w wyprowadzaniu niesprzeczności arytmetyki z tych naturalnych aksjomatów? Deflacionista powinien to wyjaśnić.

W programie badawczym, którego wyniki złożyły się na pracę z 2017 r., zająłem się badaniem granicy Tarskiego, która oddziela aksjomaty twórcze teorii prawdy od aksjomatów nietwórczych. Wraz ze współpracownikami opracowaliśmy mapę tej granicy i odpowiedzieliśmy na wiele pytań otwartych na temat siły rozmaitych teorii.

Na przykład?

Jeżeli jednym z aksjomatów teorii prawdy jest twierdzenie: „Koniunkcja jest prawdziwa, gdy oba jej człony są prawdziwe”, to jest to aksjomat niewinny – inaczej nietwórczy albo konserwatywny – a więc taki, o którym wiadomo z literatury, że przy jego pomocy nie udowodnimy niczego nowego. Jeśli jednak dodamy do naszej teorii aksjomat: „Jeżeli alternatywa jest prawdziwa, to znaczy, że któryś z jej członów jest prawdziwy”, to dojdziemy do zaskakujących rezultatów. Tego rodzaju alternatywa może być bowiem dowolnie długa, jak zdanie: „W piątek wieczorem pójdę do kina lub do restauracji, lub do opery, lub do teatru, lub do lekarza...”. Ten niewinnie przedstawiający się aksjomat powoduje, że w teorii pojawia się moc, co tu dużo mówić. Pozwala bowiem udowodnić zdania arytmetyczne, których nie da się udowodnić w samej tylko arytmetyce. W badaniach nad granicą Tarskiego nie brakowało takich niespodzianek.

Praca z 2017 r., co mnie bardzo satysfakcjonuje, rozpropagowała tę problematykę. Nie tylko sam drążyłem ją coraz głębiej, ale wciągnąłem w to dwóch moich doktorantów. Nawiązaliśmy kontakty międzynarodowe, bo tematyką zainteresowali się uczeni z innych ośrodków zajmujący się teoriami prawdy. I w tym momencie wyniki posiadają także inne grupy badawcze.

To jest miarą sukcesu dla Pana – zainteresowanie tematem innych?

Między innymi, bo ważne jest też miejsce publikacji artykułu, liczba cytowań, rozpoznawalność badacza. Nasza grupa ma

niezłą rozpoznawalność mimo hermetyczności problematyki. Ale fakt, że inni też nad nią pracują, nie jest bez znaczenia. Przecież dzięki temu badania nabierają tempa, informacji przybywa.

„Niewinność”, „nietwórczy”, „lekka prawda”, „intuicja deflacionisty” – to tylko niektóre pojęcia, które w Pana dziedzinie mają inne znaczenie niż w języku potocznym, ale to dzięki nim możecie komunikować wasze rezultaty szerszemu gronu odbiorców niż tylko fachowcom. To, co najistotniejsze, wyrażacie jednak w języku matematyki?

Tak, dla badaczy tej dziedziny nie ma bardziej adekwatnego sposobu pracy i komunikowania się, a aspekt logiczny naszej pracy, udowodnienie czegoś nowego cieszy nas najbardziej. Natomiast osoba z zewnątrz weźmie z tego tyle, ile pozwoli na to jej przygotowanie. Bez wiedzy matematycznej nie zrozumie wyników formalnych, nie doceni też opartych na nich konkluzji filozoficznych. Przyznaję, że to niebezpieczne przekonanie o hermetyczności dziedziny, którą się zajmuję, przełożyło się na zaskoczenie, z jakim dowiedziałem się o przyznaniu Nagrody Fundacji na rzecz Nauki Polskiej. Nie jest to przecież wyróżnienie z filozofii czy logiki, ale z obszaru dużo szerszego: humanistyki i nauk społecznych. W porównaniu z historykiem czy archeologiem człowiek, który zajmuje się teoriami prawdy, potrzebuje sporo czasu, by przedstawić laikom przedmiot badań. Znam to chociażby z procedury aplikowania o grant, kiedy największym wyzwaniem jest przedstawienie tematu w sposób przystępny dla niespecjalisty.

Skąd pomysł na wybór takiej drogi badawczej – opis świata w języku logiki?

To wynik szczęścia do ludzi. W odpowiednim czasie spotkałem właściwe osoby, czyli troje profesorów (ich nazwiska wymie-

niam w kolejności chronologicznej mojego ich poznania, nie wedle hierarchii ważności, bo tej nie potrafiłbym stworzyć): Barbara Stanosz, Marcin Mostowski – oboje z Wydziału Filozofii Uniwersytetu Warszawskiego – i Henryk Kotlarski, uczony z Instytutu Matematyki PAN.

Barbara Stanosz, która zajmowała się filozofią języka i była promotorką mojej pracy magisterskiej, już na początku studiów zwróciła na siebie moją uwagę za sprawą języka, w jakim prowadziła zajęcia. O ile inni wykładowcy przemawiali kwiecistie, szczerze korzystając z nieznanej mi wtedy terminologii, o tyle prof. Stanosz imponowała prostotą i klarownością wypowiedzi. Była fenomenalnie błyskotliwa, co obserwowaliśmy podczas dyskusji, kiedy potrafiła celnie ripostować, odpowiadając prosto i bardzo do rzeczy. Dzięki niej przekonałem się, że prostota jest wartością. U prof. Mostowskiego przeszedłem z kolei szkołę zaawansowanej logiki. Co ważne w tym kontekście, on miał pasję i potrafił nią zarazić, na dodatek był znakomitym naukowcem. Spełniał więc wszystkie warunki, by stworzyć własną grupę badawczą. I to mu się udało. Chociaż jego metody dydaktyczne... Opowiedzieć?

Jak najbardziej.

Wielokrotnie rozmawiałem o tym z jego uczniami i każdy potwierdzał, że tak właśnie było. Profesor był bezpośredni, więc łatwo nawiązywał kontakt ze studentami. Wychodziliśmy też w większych grupach albo sam na sam na kawę czy piwo, by kontynuować filozoficzne dyskusje. W trakcie tych spotkań profesor zachowywał się jednak tak, jakby zapomniał, że naprzeciwko niego siedzą bardzo młodzi ludzie, którzy niewiele jeszcze wiedzą. Rozmawiał z nami tak, jakbyśmy byli wyrobionymi pracownikami naukowymi: wypowiadał się swobodnie, używał terminów z zaawansowanej logiki, których znaczenia w żaden sposób nie mogliśmy znać. Siedzieliśmy więc jak trusie, nic nie rozumiejąc i zastanawiając się, kiedy to się wreszcie skończy. Niektórzy nie wytrzymywali

i wykruszali się z tych nieformalnych debat, ale byli też tacy, którzy po powrocie do domu siadali do książek, by sprawdzić znaczenie używanych słów i zrozumieć, o czym była mowa. Naiwnie zakładali, że tym sposobem podczas następnego spotkania będą w stanie dotrzymać kroku Mostowskiemu. Nic z tego. Kolejna rozmowa przynosiła kolejne nieznane pojęcia. Mniej więcej po pół roku takich spotkań zaczynało się rozumieć, o czym profesor mówi. Ale trzeba było te sześć miesięcy przetrwać.

Dlaczego Pan wytrwał?

Bo byłem przekonany, że prof. Mostowski mówi coś ważnego, więc warto zadać sobie trud doczytania i zrozumienia tego.

Najbliższy temu, czym się zajmuje nasza grupa, był prof. Henryk Kotlarski – autor lub współautor fundamentalnych wyników w teorii klas spełniania, tematyce podobnej do teorii prawdy (Alfred Tarski zdefiniował pojęcie prawdy właśnie za pomocą spełniania). Dzięki niemu zajmuję się tym, czym się zajmuję. Pamiętam, że kiedy w rozmowach pojawiały się tematy filozoficzne, od razu zastrzegał, że nie ma nic do powiedzenia, bo taka problematyka jest dla niego za trudna. I gładko przechodził do kwestii z zaawansowanej matematyki – to nie było dla niego zbyt skomplikowane... Żałuję, że nigdy go nie zapytałem, czy uwaga o filozofii była ironiczna, czy faktycznie uważał jej problemy za trudniejsze do rozwikłania od teorii klas spełniania.

Dlaczego używanie narzędzi formalnych do opisu świata jest zdaniem Pana Profesora tak istotne?

Bo pozwala sięgnąć głębiej. Od filozofów, którzy nie korzystają z narzędzi formalnych, usłyszałem co najmniej parę razy opinię, która mnie niezmiennie dziwi: „Może to, co twierdzimy, nie jest tak jednoznaczne, jak wywody z logiki, ale za to jakież głębokie”. Myślę zupełnie inaczej – kluczowa jest precyzja,

traktowana nie jako cel sam w sobie, ale jako środek, który pozwala sięgnąć głębiej, do istoty rzeczy.

Opiszę sytuację, posługując się przykładem z matematyki (w filozofii wygląda to jednak tak samo). Mamy twierdzenie, które może nie jest przełomowe ani wybitnie frapujące, ale po raz pierwszy ktoś je udowodnił, a to już coś. Pojawia się następny uczony, który wykorzystując wynik poprzednika, buduje dowód innego twierdzenia. Przychodzi trzeci i robi to samo: tworzy nowe rzeczy, bazując na jego dorobku. Każdy kolejny naukowiec sięga głębiej, stojąc jednak na tym, co udowodnili inni. Czy taki łańcuch byłby możliwy, gdyby ten pierwszy dowód był przeprowadzony mało precyzyjnie? Wykluczone, byłby beużyteczny, a praca nad nim przypominałaby łowienie ryb w mętnej wodzie.

Rozwijanie tematów zaczerpniętych z dorobku lwowsko-warszawskiej szkoły logiczno-filozoficznej jest chyba łowieniem pstrągów w wodzie przejrzystej jak kryształ. Które z nich są istotne dla grupy badawczej Pana Profesora?

Połączenie logiki matematycznej z filozofią było podstawowe dla Szkoły Lwowsko-Warszawskiej, to kontynuujemy. Z Tarskiego wzięliśmy sporo, w tym formalną definicję prawdy, a teoria modeli, którą zapoczątkował, jest kluczowym narzędziem w naszej pracy. Tyle że my też wykraczamy poza Tarskiego, a czasami wręcz go nie słuchamy. Nie podziеляmy na przykład jego sceptycyzmu wobec aksjomatycznego podejścia do prawdy. On wolął bazować na definicjach niż na aksjomatach, czyli wyrażeniach pierwotnych, których się nie definiuje. My tymczasem skupiamy się na podejściu aksjomatycznym. Zajmujemy się też – choć to nie jest oryginalny pomysł naszej grupy – zjawiskiem samoodnośnego pojęcia prawdy, czyli – znowu inaczej niż u Tarskiego – teoriami, w których nie przestrzega się zasady stratyfikowania predykatów prawdy.

A co Panu jest w pracy najbliższe?

Badania na temat siły teorii. Mówiąc kolokwialnie: chodzi o to, co dana teoria nam tak naprawdę daje. Ile tu się kryje niespodzianek! Zwłaszcza wtedy, gdy teoria, z którą nie wiązaliśmy większych nadziei, pokazuje, że ma moc. Rozkładamy więc maszynę teorii na części, dociekając i drążąc, gdzie znajduje się źródło jej siły.

**L A U R E A C I
N A G R Ó D
F N P**

1 9 9 2 – 2 0 1 0

NAUKI HUMANISTYCZNE I SPOŁECZNE

- 1992** prof. Marian Biskup, Instytut Historii PAN, Toruń
- 1994** mgr Roman Aftanazy, em. pracownik Biblioteki Zakładu Narodowego im. Ossolińskich
- 1995** prof. Teresa Michałowska, Instytut Badań Literackich PAN, Warszawa
- 1996** prof. Jerzy Gadomski, Uniwersytet Jagielloński
- 1997** prof. Andrzej Paczkowski, Instytut Studiów Politycznych PAN, Warszawa
- 1998** prof. Janusz Sondel, Uniwersytet Jagielloński
- 1999** prof. Mieczysław Tomaszewski, Akademia Muzyczna, Kraków
- 2000** prof. Jan Strelau, Uniwersytet Warszawski
- 2001** prof. Stefan Swieżawski, em. prof. Katolickiego Uniwersytetu Lubelskiego
- 2002** prof. Lech Leciejewicz, Instytut Archeologii i Etnologii PAN; Uniwersytet Wrocławski
- 2003** prof. Jerzy Szacki, em. prof. Uniwersytetu Warszawskiego
- 2004** prof. Jadwiga Staniszkis, Uniwersytet Warszawski
- 2005** prof. Karol Myśliwiec, Zakład Archeologii Śródziemnomorskiej PAN, Warszawa
- 2006** prof. Piotr Sztompka, Uniwersytet Jagielloński
- 2007** prof. Karol Modzelewski, Uniwersytet Warszawski

- 2008** prof. Stanisław Mossakowski, Instytut Sztuki PAN, Warszawa
- 2009** prof. Jerzy Strzelczyk, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
- 2010** prof. Anna Wierzbicka, Australian National University, Canberra

NAUKI PRZYRODNICZE I MEDYCZNE

- 1992** prof. Ewa Kamler, Instytut Ekologii PAN, Warszawa
- 1993** prof. Wiesław Jędrzejczak, Wojskowa Akademia Medyczna, Warszawa
- 1994** prof. Krzysztof Selmaj, Akademia Medyczna, Łódź
- 1995** prof. Stanisław J. Konturek, Akademia Medyczna, Kraków
- 1996** prof. Aleksander Koj, Uniwersytet Jagielloński
- 1997** prof. Ryszard Gryglewski, Uniwersytet Jagielloński
- 1998** prof. Andrzej Szczeklik, Uniwersytet Jagielloński
- 1999** prof. Maciej Żylicz, Uniwersytet Gdański
- 2000** prof. Leszek Kaczmarek, Instytut Biologii Doświadczalnej PAN, Warszawa
- 2001** prof. Maciej Gliwicz, Uniwersytet Warszawski
- 2002** prof. Mariusz Jaskólski, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
- 2003** prof. Roman Kaliszan, Akademia Medyczna, Gdańsk
- 2004** prof. Janusz Limon, Akademia Medyczna, Gdańsk

- 2005** prof. Zofia Kielan-Jaworowska, Instytut Paleobiologii PAN, Warszawa
- 2006** prof. Mariusz Z. Ratajczak, Pomorska Akademia Medyczna w Szczecinie; University of Louisville, USA
- 2007** prof. Włodzimierz J. Krzyżosiak, Instytut Chemii Bioorganicznej PAN, Poznań
- 2008** prof. Jacek Oleksyn, Instytut Dendrologii PAN w Kórniku
- 2009** prof. Andrzej Koliński, Uniwersytet Warszawski
- 2010** prof. Tomasz Guzik, Uniwersytet Jagielloński

NAUKI ŚCISŁE

- 1992** prof. Aleksander Wolszczan, Pennsylvania State University, USA; Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
- 1993** prof. Stanisław Woronowicz, Uniwersytet Warszawski
- 1994** prof. Zbigniew Ryszard Grabowski, Instytut Chemii Fizycznej PAN, Warszawa
- 1995** prof. Adam Sobiczewski, Instytut Problemów Jądrowych, Warszawa
- 1996** prof. Bohdan Paczyński, Princeton University, USA
- 1997** prof. Tomasz Łuczak, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
- 1998** prof. Lechośław Latos-Grażyński, Uniwersytet Wrocławski
- 2000** prof. Bogumił Jeziorski, Uniwersytet Warszawski
- 2001** prof. Ludomir Newelski, Uniwersytet Wrocławski

- 2002** prof. Andrzej Udalski, Uniwersytet Warszawski
- 2003** dr Marek Pfützner, Uniwersytet Warszawski
- 2004** prof. Wojciech J. Stec, Centrum Badań Molekularnych i Makromolekularnych PAN, Łódź
- 2006** prof. Tomasz Dietl, Instytut Fizyki PAN, Warszawa
- 2007** doc.dr hab. Andrzej L. Sobolewski, Instytut Fizyki PAN, Warszawa
- 2008** prof. Ryszard Horodecki, Uniwersytet Gdański
- 2009** prof. Józef Barnaś, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu; Instytut Fizyki Molekularnej, Poznań
- 2010** prof. Tadeusz Marek Krygowski, Uniwersytet Warszawski

NAUKI TECHNICZNE

- 1993** prof. Kazimierz Sobczyk, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa
- 1995** prof. Maksymilian Pluta, Instytut Optyki Stosowanej, Warszawa
- 1997** prof. Antoni Rogalski, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa
- 1998** prof. Leszek Stoch, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
- 1999** prof. Zdzisław Kowalczyk, Politechnika Gdańska
- 2000** prof. Jan Węglarz, Politechnika Poznańska
- 2001** prof. Michał Kleiber, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa
- 2002** prof. Adam Proń, Politechnika Warszawska; Komisariat Energii Atomowej (CEA) w Grenoble

- 2004** prof. Krzysztof Matyjaszewski, Carnegie Mellon University, USA;
Centrum Badań Molekularnych i Makromolekularnych PAN, Łódź
- 2005** prof. Roman Słowiński, Politechnika Poznańska
- 2006** prof. Leon Gradoń, Politechnika Warszawska
- 2007** prof. Andrzej Nowicki, Instytut Podstawowych Problemów
Techniki PAN, Warszawa
- 2008** prof. Andrzej Jajszczyk, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
- 2009** prof. Bogdan Marciniak, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza
w Poznaniu

**L A U R E A C I
N A G R Ó D
F N P**

od 2011 roku

NAUKI O ŻYCIU I O ZIEMI

- 2011** prof. Jan Potempa, Uniwersytet Jagielloński, University of Louisville, USA
- 2012** prof. Krzysztof Palczewski, Case Western Reserve University w Cleveland, USA
- 2013** prof. Andrzej K. Tarkowski, Uniwersytet Warszawski
- 2014** prof. Tomasz Goslar, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
- 2016** prof. Jan Kozłowski, Uniwersytet Jagielloński
- 2017** prof. Piotr Trzonkowski, Gdański Uniwersytet Medyczny
- 2018** prof. Andrzej Dziembowski, Instytut Biochemii i Biofizyki PAN w Warszawie
- 2020** prof. Jacek Radwan, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
- 2021** prof. Bożena Kamińska-Kaczmarek, Instytut Biologii Doświadczalnej im. M. Nenckiego PAN w Warszawie

NAUKI CHEMICZNE I O MATERIAŁACH

- 2011** prof. Elżbieta Frąckowiak, Politechnika Poznańska
- 2012** prof. Mieczysław Mąkosza, em. prof. Instytutu Chemii Organicznej PAN w Warszawie
- 2013** prof. Sylwester Porowski, Instytut Wysokich Ciśnień PAN
- 2014** prof. Karol Grela, Uniwersytet Warszawski i Instytut Chemii Organicznej PAN w Warszawie

- 2015** prof. Stanisław Penczek, Centrum Badań Molekularnych i Makromolekularnych PAN w Łodzi
- 2016** prof. Marek Samoć, Politechnika Wrocławska
- 2017** prof. Daniel Gryko, Instytut Chemii Organicznej PAN w Warszawie
- 2018** prof. Andrzej Gałęski, Centrum Badań Molekularnych i Makromolekularnych PAN w Łodzi
- 2019** prof. Marcin Drąg, Politechnika Wrocławska
- 2020** prof. Ewa Górecka, Uniwersytet Warszawski
- 2021** prof. Jacek Jemielity, Centrum Nowych Technologii UW

NAUKI MATEMATYCZNO-FIZYCZNE I INŻYNIERSKIE

- 2011** prof. Maciej Lewenstein, Institut de Ciències Fotòniques (ICFO), Castelldefels oraz Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats, Barcelona
- 2012** dr hab., prof. UMK Maciej Wojtkowski, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
- 2013** prof. Marek Żukowski, Uniwersytet Gdański
- 2014** prof. Iwo Białynicki – Birula, Centrum Fizyki Teoretycznej PAN
- 2015** prof. Kazimierz Rzążewski, Centrum Fizyki Teoretycznej PAN
- 2016** prof. Józef Spałek, Uniwersytet Jagielloński
- 2017** prof. Andrzej Trautman, Uniwersytet Warszawski
- 2018** prof. Krzysztof Pachucki, Uniwersytet Warszawski
- 2019** prof. Andrzej Kossakowski, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

- 2020** prof. Krzysztof M. Górski, Uniwersytet Warszawski i NASA Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology (Caltech)
- 2021** prof. Grzegorz Pietrzyński, Centrum Astronomiczne im. M. Kopernika PAN w Warszawie

NAUKI HUMANISTYCZNE I SPOŁECZNE

- 2011** prof. Tomasz Giaro, Uniwersytet Warszawski
- 2012** prof. Ewa Wipszycka, Uniwersytet Warszawski
- 2013** prof. Jan Woleński, Uniwersytet Jagielloński
- 2014** prof. Lech Szczucki, Instytut Filozofii i Socjologii PAN w Warszawie
- 2015** prof. Jerzy Jedlicki, Instytut Historii im. Tadeusza Manteuffla PAN w Warszawie
- 2016** prof. Bogdan Wojciszke, SWPS Uniwersytet Humanistycznospołeczny, Wydział Zamiejscowy w Sopocie
- 2017** prof. Krzysztof Pomian, CNRS w Paryżu i Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
- 2018** prof. Timothy Snyder, Uniwersytet Yale
- 2019** prof. Andrzej Wiśniewski, Uniwersytet im. A. Mickiewicza w Poznaniu
- 2020** prof. Romuald Schild, Instytut Archeologii i Etnologii PAN w Warszawie
- 2021** prof. Cezary Cieśliński, Uniwersytet Warszawski

WYDAWCA:

Fundacja na rzecz Nauki Polskiej

ul. I. Krasickiego 20/22, 02-611 Warszawa

tel.: 22 845 95 01

www.fnp.org.pl

REDAKCJA:

Elżbieta Marczuk

ZDJĘCIA:

Magdalena Wiśniewska-Kraśńska, OneHD

OPRACOWANIE TYPOGRAFICZNE:

Studio DTP Academicon

DRUK:

ASC GLOBAL s.c.

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