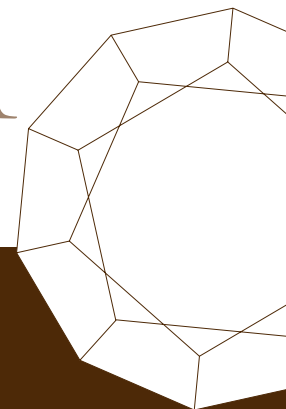




# PROFUNDERE SCIENTIAM

nr 12  
kwiecień 2016

BIULETYN CENTRUM STUDIÓW ZAAWANSOWANYCH POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ



## Chematica - automatyczny chemik XXI wieku

*Profesor Bartosz Grzybowski o komputerowym  
wspomaganiu planowania syntezy organicznej*

Synteza związków organicznych jest podstawą zawodu chemika. Bez niej nie byłoby całej masy związków - barwników syntetycznych, materiałów polimerowych czy leków ratujących życie. Do tej pory projektowanie ścieżek syntezy - czyli szeregu różnych przemian chemicznych, prowadzących do otrzymania pożądanej cząsteczki docelowej (rys. 1) - było oparte tylko na wiedzy pojedynczego chemika lub grupy naukowców. Wiedza ta jest wynikiem wieloletniej praktyki i intensywnego zapamiętywania kolejnych reakcji. Niestety, człowiek może zapamiętać tylko ich pewną liczbę - powiedzmy, że dla doświadczonego chemika jest ona rzędu tysiąca - natomiast liczba możliwych do przeprowadzenia syntez sięga milionów, a nawet miliardów [1]. W praktyce, na każdym etapie planowania syntetycznego należy uwzględnić przynajmniej 10 możliwości, które mnoży się przez ilość etapów reakcji. Zatem wyobraźmy sobie, że przy dziesięcioetapowej reakcji będziemy mieli 10 bilionów możliwych dróg syntezy! Sprawdzenie tak ogromnej liczby reakcji jest więc poza możliwościami ludzkiego mózgu. Nie jest jednak poza zasięgiem komputerów! Pomysł wykorzystania maszyn do planowania syntez chemicznych pojawił się już w pracach Ivar Ugi i E.J. Coreya [2-3].

Niestety, ci genialni chemicy zajęli się tym problemem zbyt wcześnie - w latach 70. i 80. XX wieku - kiedy, nie tylko komputery były zbyt powolne, ale również nie istniało jeszcze wiele algorytmów wykorzystywanych w syntetycznym planowaniu reakcji. W późniejszych latach takim zagadnieniem stała się Chematica, którą zajęła się moja grupa badawcza.

Począwszy od 2000 roku, podejmujemy wyzwanie stworzenia komputerowego modelu syntetycznego działającego na zasadzie sieci, w której znane reakcje chemiczne tworzą gigantyczną bazę około 10 milionów związków połączonych za pomocą podobnej liczby reakcji (tzw. strzałek). Ta sieć jest drugą co do wielkości siecią globalną, o około 1000 razy większą niż dla ludzkiego metabolomu (rys. 2). W wielu naszych pracach [1, 4-8] wykazaliśmy, że sieć chemii organicznej ma konstrukcję swobodną, w której ewoluuje zgodnie z dobrze zdefiniowanymi zasadami dotyczącymi reaktywności chemicznej. Poza gromadzeniem wiedzy chemicznej i przedstawieniem jej w nowy sposób, sieć chemii organicznej otwiera kilka ciekawych możliwości w zakresie badań chemicznych. Po pierwsze, pozwala za pomocą algorytmów wyszukiwania - podobnych do tych stosowanych w branży

(CIĄG DALSZY NA S. 4)

### W NUMERZE

*między innymi:*

- *Chematica - automatyczny chemik XXI wieku*  
profesor Bartosz Grzybowski (s. 1)
- *Sym-ballein, dia-ballein*  
profesor Stanisław Janeczko (s. 1)
- *Planeta wuja Thoma* - tłumaczenie  
rozmowy z René Thomem (s. 10)
- *Rysunek - obraz myśli*  
Joanna Pętkowska (s. 15)
- *Na progu kwantowej rewolucji w informatyce*  
profesor Van Cao Long (s. 19)
- *Młodzi naukowcy PW o swojej  
pracy naukowo-badawczej* (s. 23)
- *Nauka bez granic - Współpraca  
po szwajcarsku* - mgr inż. Dariusz  
Aksamit (s. 30)

### SYM-BALLEIN, DIA-BALLEIN

*Profesor Stanisław Janeczko*

Czy nauka polega na powiększaniu wiedzy? Ludzie gromadzą obserwacje, ale to nie jest jeszcze wiedza. Wiedza powstaje w procesie wyjaśniającego i rozumiejącego poznania. W pierwszym etapie gromadzony jest tzw. korpus danych empirycznych, obserwacji i spostrzeżeń. Kolejny etap to wstępne porządkowanie korpusu, opis za pomocą pojęć, często potocznych, nietworzących jeszcze żadnego systemu formalnego. Następne etapy to długie, uporczywe dążenie do wyjaśnienia danych, do podania teorii. Teoria to wybranie języka (w uproszczeniu) i podanie w nim modelu (formalnego, zwykle matematycznego).

(CIĄG DALSZY NA S. 8)

## DZIAŁALNOŚĆ CENTRUM STUDIÓW ZAAWANSOWANYCH PW

czyli najważniejsze wydarzenia i najbliższe plany CSZ

### PROFESOROWIE WIZYTUJĄCY

W okresie październik 2014 – marzec 2015 gościliśmy 19. wybitnych uczonych z ośrodków naukowych na całym świecie:

- Prof. Marco CANTONI
- Prof. Jose Alberto CUMINATO
- Prof. Alexey DAVYDOV
- Prof. Takuo FUKUDA
- Prof. Michael GIERSIG
- Prof. Victor GORYUNOV
- Prof. Carlos GARCIA-MATEO
- Prof. Cecilia HASKINS
- Prof. Abramo HEFEZ
- Prof. Goo ISHIKAWA
- Prof. Maxim KAZARYAN
- Prof. Branko KOLAREVIC
- Prof. Terence LANGDON
- Prof. Takashi NISHIMURA
- Prof. Maria del Carmen ROMERO FUSTER
- Prof. Gerd RUDOLPH
- Prof. Armen SERGEEV
- Prof. Toamsz WIELICKI
- Prof. Ehrenfried ZSCHECH
- Prof. Tam Kam WENG

Sylwetki wszystkich profesorów wizytujących, którzy gościli na Politechnice Warszawskiej na zaproszenie Centrum Studiów Zaawansowanych w ramach Programu Rozwojowego Politechniki Warszawskiej, zostały przedstawione w wydaniu podsumowującym pt. *Profesorowie wizytujący CSZ PW 2009-2015*, które można znaleźć na stronie

internetowej Centrum: <http://goo.gl/vF2fgY>

### KONWERSATORIUM – ODCZYTY

W trakcie ostatnich trzech semestrów odbyło się 8 spotkań w ramach Konwersatorium Politechniki Warszawskiej:

Semestr zimowy 2015/2016

21 stycznia 2016 r. – Profesor Mikołaj Szafran, Kierownik Katedry Technologii Chemicznej, Wydział Chemiczny Politechniki Warszawskiej, odczyt pt. *Chemia w technologii zaawansowanych tworzyw ceramicznych*

26 listopada 2015 r. – Profesor Marek Demiański, Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, odczyt pt. *Ogólna teoria względności – teoria i zastosowania*

5 listopada 2015 r. – Profesor Marek Abramowicz, Centrum Astronomiczne im. Mikołaja Kopernika PAN, odczyt pt. *Czarne dziury i paradoks siły odśrodkowej*

Semestr letni 2014/2015

11 czerwca 2015 r. – Dr Joseph Monkowski, President and Chief Technical Officer, Pivotal Systems Corporation Fremont, California, odczyt pt. *From Tenured Professor to Silicon Valley Entrepreneur – How It Is Being Done in America*

21 maja 2015 r. – Profesor Tomasz Sosnowski, Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej PW, odczyt

pt. *Every breath you take – zagadnienia techniczne podawania leków drogą wziewną*

19 marca 2015 r. – Profesor Adam Kowalczyk, Centre for Neural Engineering, The University of Melbourne, Australia, odczyt pt. *Computational and Statistical Challenges of Genome-Wide Detection of Biomarkers Associated with Diseases and Agricultural Traits*

Semestr zimowy 2014/2015

22 stycznia 2015 r. – Profesor Marco Cantoni, Interdisciplinary Centre for Electron Microscopy CIME, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, odczyt pt. *Analytical Electron Microscopy in Materials Science*

15 grudnia 2014 r. – Profesor Krzysztof Maurin, Katedra Metod Matematycznych Fizyki, Uniwersytet Warszawski, odczyt pt. *Refleksje o matematyce i filozofii*

### SEMINARIUM SPECJALISTYCZNE W KONWERSATORIUM PW

Podczas ostatnich trzech semestrów Centrum Studiów Zaawansowanych we współpracy z Centrum Informatyzacji zorganizowało i przeprowadziło cztery serie spotkań pt.: *Problemy, metody i obliczenia wielkoskalowe oraz wyzwania informatyki obsługującej takie zadania. Problemy, metody i obliczenia wielkoskalowe oraz wyzwania modelowania inżynierskiego i biznesowego (2 serie) oraz Wyzwania modelowania inżynierskiego i biznesowego (2 serie)*. Łącznie

↓ Konwersatorium Politechniki Warszawskiej z udziałem Profesora Marka Demiańskiego



omówiono 37 tematów – szczegóły:  
<http://goo.gl/9JxIEj>

Ponadto w cyklu seminaria specjalistyczne odbyły się dwa wykłady prof. Andrew Duchowskiego związane z Uniwersytetem Clemson w USA i ETH Zürich w Szwajcarii:

3.03.2015 – *Analiza badań okولوجraficznych i symulacja ruchu oka*

7.03.2016 – *Symulacja ruchu oka*

#### WYDAWNICTWA

W ciągu ostatniego roku oferta wydawnicza Centrum Studiów Zaawansowanych poszerzyła się o cztery pozycje:

→ Monografie CSZ – Jerzy Kijowski, *Geometria różniczkowa jako narzędzie nauk przyrodniczych*

→ CAS Lecture notes /nauki techniczne/ praca zbiorowa pod redakcją Jana Słyka, *Model informacji inżynierskich, BIM*

→ CAS Lecture notes /exact sciences/ Goo Ishikawa, *Singularities of Curves and Surfaces in Various Geometric Problems*

→ Album Joanny Pętkowskiej, *Akwarele/Watercolours*

Wydawnictwa CSZ można nabyć w księgarniach Oficyny Wydawniczej PW w Gmachu Głównym i przy ul. Noakowskiego 18/20.

Przegląd wszystkich dotychczas wydanych pozycji można odnaleźć pod adresem: <http://www.csz.pw.edu.pl/> Wydawnictwa

#### NAUKOWE STYPENDIA WYJAZDOWE – ZADANIE 4 PRPW

W odpowiedzi na ostatnie z tej serii konkursy stypendialne dedykowane doktorantom – CAS/37/POKL oraz pracownikom naukowym PW – CAS/38/POKL, wpłynęły łącznie 44 wnioski. Komisja Konkursowa przyznała 13 miesięcznych stypendiów dla doktorantów PW oraz 3 dla nauczycieli akademickich. Laureaci konkursów zrealizowali wyjazdy stypendialne w okresie od marca do czerwca 2015.

#### CELOWE NAUKOWE STYPENDIA WYJAZDOWE – ZADANIE 6

W ramach realizacji celowych naukowych stypendiów wyjazdowych dla doktorantów i nauczycieli akademickich PW (projekt: *Wsparcie inicjatyw Politechniki Warszawskiej w kształceniu i doskonaleniu kadr w zakresie innowacyjnych technik teleinformatycznych*) na trzymiesięczne staże wyjechało 6. doktorantów i 2. nauczycieli akademickich. Stypendia

były realizowane na Uniwersytecie w Luksemburgu, Duńskim Uniwersytecie Technicznym w Kopenhadze oraz Politechnice Nantes we Francji.

#### CAS (MINI) WORKSHOP

W ramach CAS (Mini) Workshop odbyły się trzy spotkania w Instytucie Matematycznym Polskiej Akademii Nauk: *Analytic and algebraic singularities*, 3-4.11.2014 r.; *Mathematical physics and singularities*, 5.02.2015 r.; *Geometry and related topics*, 24.03.2015 r. Prelegentami warsztatów byli profesorowie wizytujący PW oraz goście specjalni zajmujący się zastosowaniem teorii osobliwości i analizy.

#### X WARSZTATY NAUKOWE CSZ

W kalendarzu Centrum nie zabrakło wyjazdowych warsztatów naukowych. W dniach 18-19 października 2014 r. w Radziejowicach odbyło się X takie spotkanie z udziałem stypendystów Centrum. Warsztaty rozpoczął wykład profesora Jana Słyka pt. *Materiał w świecie informacji. Budulec architektury XXI wieku*. W urokliwych wnętrzach Pałacu w Radziejowicach odbyły się również dwie sesje: posterowa i prezentacji ustnych, w czasie których stypendyści przedstawili wyniki swoich prac.

Ponadto uczestnicy mieli okazję do wielu inspirujących spotkań i dyskusji. Tradycyjnie ogłoszono i rozstrzygnięto konkursy na najlepsze prezentacje ustne i postery. Komitet Naukowy Warsztatów CSZ wyłonił następujących laureatów:

#### PREZENTACJA USTNA

miejsce I – mgr inż. Dariusz Aksamit z Wydziału Fizyki, *Dozymetria komórkowa a nowe terapie celowane w medycynie nuklearnej*  
 miejsce II – mgr inż. Weronika Zaperty z Wydziału Mechatroniki, *Barwny holograficzny wyświetlacz 3D z podziałem apertury pojedynczego SLM*

miejsce III – mgr inż. Krzysztof Borys z Wydziału Chemicznego, *Reakcje sprzężania estrów aryloboronowych ze związkami arylolitolowymi*

#### PREZENTACJA POSTEROWA:

miejsce I – mgr inż. Łukasz Skórka z Wydziału Chemicznego, *Wpływ czynników strukturalnych na oddziaływanie ferromagnetyczne w oligoaryloaminach*

miejsce II – mgr inż. Marek Maciaszek z Wydziału Fizyki, *O metastabilnym charakterze defektu GaCu w CuGaSe<sub>2</sub>*,

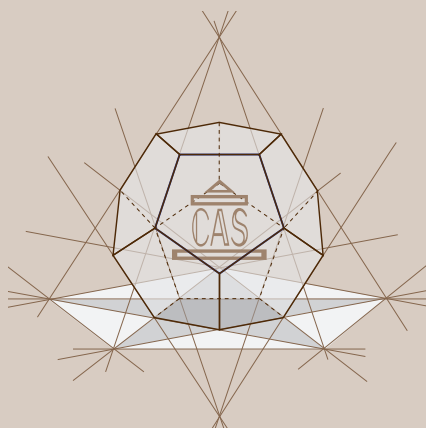
miejsce III – dr inż. Grzegorz Stępiak z Wydziału Elektroniki i Technik Informatycznych, *Światłowodowe zwielokrotnienie MIMO*.

#### VI WARSZTATY KRAJOWEGO FUNDUSZU NA RZECZ DZIECI I CSZ

W dniach 12-15 grudnia 2014 r. odbyły się VI warsztaty Krajowego Funduszu na rzecz Dzieci i CSZ, zatytułowane *Grafy – wybrane zagadnienia*. Uczestnikami byli najzdolniejsi młodzi miłośnicy matematyki – podopieczni KFnRD. W warsztatach udział wzięło 18. gimnazjalistów z całej Polski, głównie uczniów klasy III. Odbyło się 10 wykładów poświęconych różnym aspektom teorii grafów z punktu widzenia matematyki i informatyki teoretycznej.

#### PIERWSZE WYRÓŻNIENIE CENTRUM STUDIÓW ZAAWANSOWANYCH PW

15 grudnia 2014 roku po raz pierwszy nadano wyróżnienie Centrum Studiów Zaawansowanych Politechniki Warszawskiej, którego motto brzmi: *Laus*

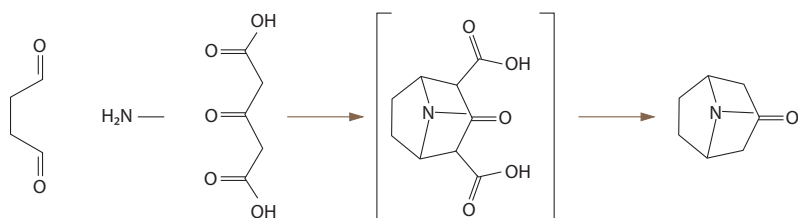


*tibi, non tuleris qui vincula mente animoque* – „Chwała Ci za to, że nie pozwoliłeś nałożyć więzów na swój umysł i swego ducha”. Uroczystość zorganizowana tego dnia w siedzibie Centrum była poświęcona Profesorowi Krzysztofowi Maurinowi, twórcy Katedry Metod Matematycznych Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Spotkanie uświetnili licznie przybyli goście, którzy mieli wyjątkową okazję wysłuchać wykładu profesora Krzysztofa Maurina pt. *Refleksje o matematyce i filozofii* oraz byli świadkami nadania Profesorowi wyróżnienia i tytułu Mistrza Centrum Studiów Zaawansowanych PW. (s. 18)

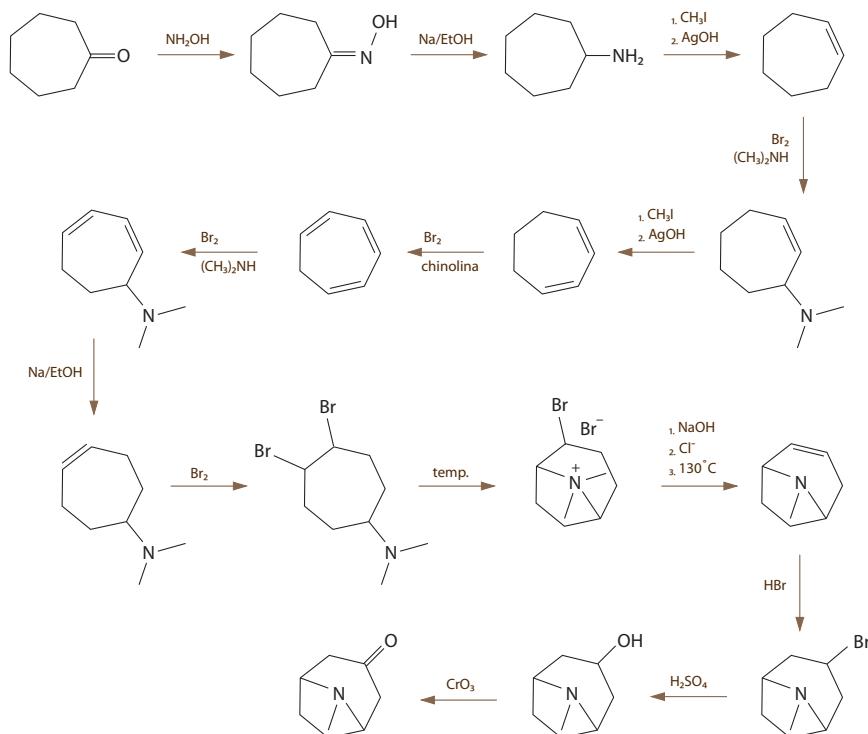
#### W CENTRUM UWAGI

W dniu 3 lutego 2015 r. w Centrum Studiów Zaawansowanych odbyło się

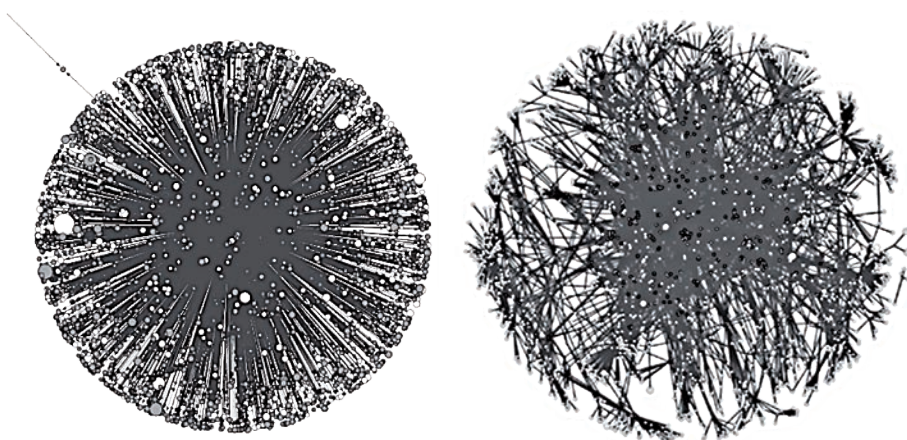
## Synteza tropinonu – Robert Robinson (1917)



## Synteza tropinonu – Richard Martin Willstätter (1901)



↑ Rys. 1. Syntezy tropinonu (syntetycznego prekursora atropiny) opracowane przez Roberta Robinsona (1917) oraz Richarda Martina Willstättera (1901). Przykład dwóch zupełnie różnych podejść prowadzących do tego samego produktu końcowego. Synteza R.M. Willstättera jest długa i przebiega z niską wydajnością, natomiast wieloskładnikowa reakcja R. Robinsona, znacznie krótsza i z wysoką wydajnością



↑ Rys. 2. Obraz po lewej powstał na podstawie 0,1% (10.000 cząsteczek) wiedzy z zakresu chemii organicznej zgromadzonej w sieci [4-6]. Nawet ta niewielka część chemii jest większa od ludzkiej sieci metabolicznej pokazanej po prawej stronie [9]

telekomunikacyjnej – znajdować optymalne ścieżki dla znanych nam cząsteczek chemicznych. Po drugie i najważniejsze, pozwala na wydobycie z tego labiryntu możliwości, syntetycznych reguł, których następnie uczy się komputer, aby przewidzieć syntezy nowych cząsteczek (takich, które nie zostały jeszcze otrzymane w warunkach laboratoryjnych).

Efektywne wykorzystanie tych dwóch możliwości zależy od zdolności do wyszukiwania i przetwarzania informacji na temat dużej liczby cząsteczek i reakcji w krótkim czasie. To z kolei wymaga, abyśmy nauczyli komputer, jak ma rozumieć i planować reakcje chemiczne. W tym celu trzeba, w sposób zrozumiały dla maszyny, zdefiniować cząsteczki biorące udział w reakcji. Można to zrobić poprzez notację macierzową, za pomocą której określimy względne położenie wszystkich atomów, na przykład MOLfile opisującym benzen (rys. 3). Jednakże wykorzystanie notacji macierzowej związane jest z dwójakim problemem: (i) nieefektywne wykorzystanie pamięci komputera oraz (ii) czułość metody na rotację cząsteczek (ta sama cząsteczka inaczej narysowana może mieć inną strukturę matrycy). Te dwie rzeczy sprawiają, że operacje na macierzach molekularnych powodują duże obciążenie obliczeniowe i są powolne – co jest szczególnie problematyczne, ponieważ planujemy zbadać miliony miliardów możliwych kombinacji substratów i reakcji wieloskładnikowych. Możemy pokonać te ograniczenia poprzez wykorzystanie tzw. *Simplified Molecular Input Line Entry System* – SMILES[10] – nawiasem mówiąc, wywodzący się ze słynnej odwrotnej notacji polskiej (*Reverse Polish Notation*) – do przedstawiania cząsteczki za pomocą jednowymiarowych ciągów, a nie macierzy. Na przykład, tę samą cząsteczkę benzenu można prosto zapisać za pomocą SMILES, jako



Przedstawienie związku chemicznego za pomocą takiego prostego łańcucha liter i liczb umożliwia przechowywanie oraz szybką i treściwą odpowiedź, bez utraty istotnych informacji. Omija również potrzebę odczytu przez matrycę. Zapis SMILES jest znacznie uproszczony w porównaniu do MOLfile i wyraźnie rozpoznaje aromatyczności, co przedstawiono za pomocą małych liter. Chociaż SMILES jest doskonałym sposobem do reprezentowania pojedynczych cząsteczek, nie jest w stanie śledzić konkretnego atomu pomiędzy jedną reakcją a drugą. W związku

z tym uzupełniliśmy SMILES notacją SMART [11], która jest językiem opisującym wzorce molekularne zawierające tę samą reprezentację liniową co w zapisie SMILES, ale z mapowaniem atomów, co umożliwia chemikowi śledzenie drogi, jaką przebywa każdy atom. Rysunek 4 ilustruje, w jaki sposób można zapisać reakcję alkiłowania Friedel-Craftsa za pomocą notacji SMARTS. Oznaczenie >> określa kierunek reakcji – prezentowana reakcja jest przykładem retrosyn-tezy (czyli przebiega „od tyłu” – od produktu do substratu).

Ponadto przewyżczyliśmy bardzo znaczące ograniczenie zapisu SMILES/SMARTS, mianowicie brak zdolności przewidzenia lub zachowania prawidłowej stereo- lub regiochemii po obu stronach zapisu reakcji. Problem został rozwiązany za pomocą wielu opracowanych i opatentowanych przez nas algorytmów, określanych jako STEREOFIX. Dopiero zestawienie ze sobą zapisów SMARTS i STEREOFIX doprowadziło do pierwszego w historii zapisu matematycznego, w którym reakcje chemiczne można zwięźle zapisać z pełną poprawnością i zachowaniem informacji chemicznych (rys. 5).

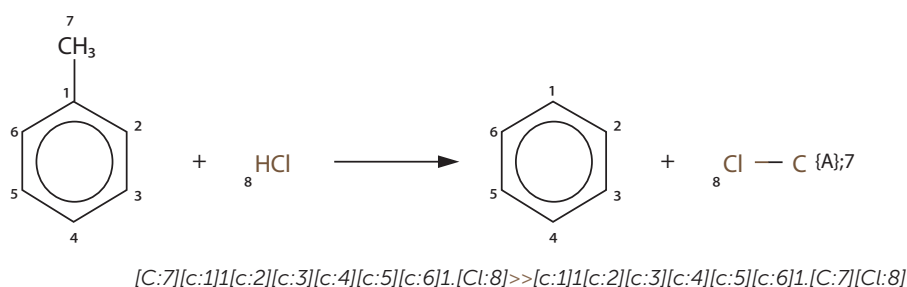
Wdrożenie powyższego zapisu, umożliwiło zakodowanie, a następnie analizowanie za pomocą sieci teoretycznej milionów reakcji chemicznych bazujących na całej wiedzy chemicznej. Analizy te doprowadziły do opracowania programu Chematica, który jest zaawansowanym oprogramowaniem składającym się z ponad 250 000 linii kodu oraz łatwego w obsłudze interfejsu (rys. 6). Obecnie Chematica jest już używany przez różne uniwersytety oraz ogólnościatowe firmy chemiczne i stanowi wielką sensację w prasie specjalistycznej (np. w *Angewandte Chemie* w 2012 roku ukazały się na ten temat trzy artykuły opublikowane jeden po drugim [1,7,8]) oraz w popularnych mediach (patrz artykuły i media w odnośnikach [12-14], a także w Internecie na [chematica.net](http://chematica.net)). Chematica daje wielokrotną możliwość syntetycznej analizy i projektowania syntezy – odpowiedź otrzymujemy bardzo szybko. To wszystko pozwala na wykorzystanie Chematica do:

a) wyszukiwania spośród miliardów (i więcej!) znanych reakcji w celu identyfikacji i określenia, która z możliwych ścieżek syntezy będzie najbardziej ekonomiczna;

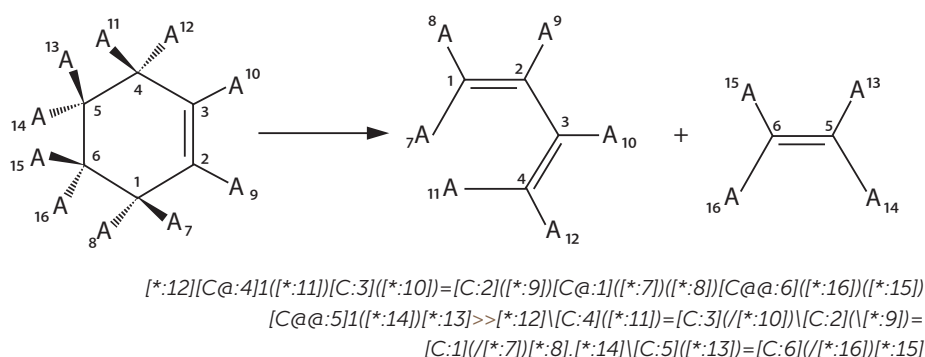
benzene  
ACD/Labs0812062058

|         |         |        |   |   |   |   |   |   |   |   |   |       |   |
|---------|---------|--------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-------|---|
| 6       | 6       | 0      | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | V2000 |   |
| 1.9050  | -0.7932 | 0.0000 | C | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0     | 0 |
| 1.9050  | -2.1232 | 0.0000 | C | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0     | 0 |
| 0.7531  | -0.1282 | 0.0000 | C | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0     | 0 |
| 0.7531  | -2.7882 | 0.0000 | C | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0     | 0 |
| -0.3987 | -0.7932 | 0.0000 | C | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0     | 0 |
| -0.3987 | -2.1232 | 0.0000 | C | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0     | 0 |
| 2       | 1       | 1      | 0 | 0 | 0 | 0 |   |   |   |   |   |       |   |
| 3       | 1       | 2      | 0 | 0 | 0 | 0 |   |   |   |   |   |       |   |
| 4       | 2       | 2      | 0 | 0 | 0 | 0 |   |   |   |   |   |       |   |
| 5       | 3       | 1      | 0 | 0 | 0 | 0 |   |   |   |   |   |       |   |
| 6       | 4       | 1      | 0 | 0 | 0 | 0 |   |   |   |   |   |       |   |
| 6       | 5       | 2      | 0 | 0 | 0 | 0 |   |   |   |   |   |       |   |
| M       | END     |        |   |   |   |   |   |   |   |   |   |       |   |
| \$\$\$  | \$\$\$  |        |   |   |   |   |   |   |   |   |   |       |   |

↑ Rys. 3. Benzen zapisany za pomocą MDL MolFile organicznej zgromadzonej w sieci [4-6]



↑ Rys. 4. Zapis reakcji alkiłowania *Friedel-Craftsa* za pomocą notacji SMARTS

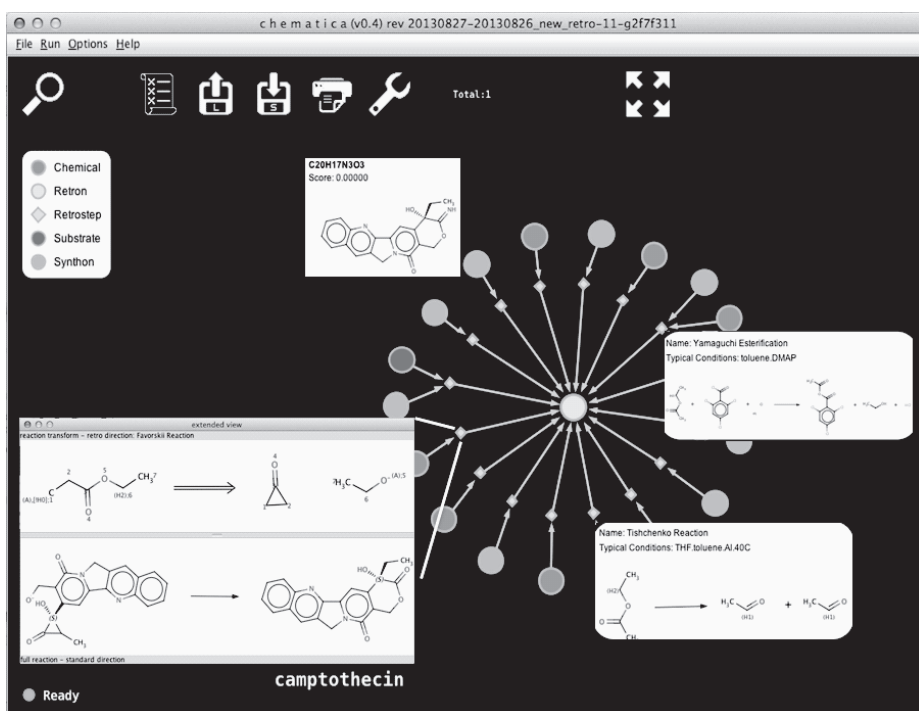


↑ Rys. 5. Uproszczony schemat SMART/STEREOFIX przedstawiający zakodowaną reakcję Dielsa-Aldera stosowany w retrosyntetycznym planowaniu przez Chematica. Symbol \* reprezentuje grupy dopuszczalnych typów atomowych (szczegółowo zdefiniowanych przez STEREO MIX w górnej części ilustracji zapisane ogólnie jako A). Znaki @ i@@oznaczają chiralność, która przekłada się na konfigurację w STEREOFIX

- b) określenia strategii syntez chemicznych bez stosowania toksycznych związków chemicznych;
- c) znalezienia syntezy, która wykorzystuje popularne cząsteczki, czyli łatwo dostępne i syntetycznie wytrzymałe – stabilne, łatwo rozpuszczalne w wodzie (stosowane w „zielonej chemii”) lub niewymagające użycia specjalnych zabezpieczeń w czasie przeprowadzania reakcji;
- d) zaprojektowania syntezy prowadzącej do otrzymania nieznanymi związków przy wykorzystaniu wiedzy

- e) ponad 30 000 podstawowych przekształceń chemicznych;
- e) wskazania obszarów występowania konfliktów reaktywności i konieczności zastosowania szczególnych wymogów bezpieczeństwa w proponowanych syntezach;
- f) zestawiania powyższych zastosowań z wieloma trybami graficznej prezentacji, włącznie z barwieniem grup reaktywności, modelowaniem molekularnym 3D, kryteriami Lipińskiego itd.

→



Możliwości, jakie daje oprogramowanie Chemica, sprawiły, że światowa prasa okrzyknęła je zmianą światopodjęcia i określiła „automatycznym chemikiem” XXI wieku [12] (lista komunikatów prasowych na chemica.net). W tym krótkim artykule należy podkreślić, że w ciągu ostatnich lat został opracowany w Polsce, w Instytucie Chemii Organicznej Polskiej Akademii Nauk, główny moduł retrosyntetyczny Chemica. Jest to jeden z nielicznych przykładów polskiej technologii, która może mieć globalne znaczenie – podążając za aspiracjami naszego kraju, aby stać się jednym z „graczy” na światowej mapie innowacyjnych badań i rozwoju.

## LITERATURA

- [1] M. Kowalik, C.M. Gothard, A.M. Drews, N.A. Gothard, A. Wieckiewicz, P.E. Fuller, B.A. Grzybowski, K.J.M. Bishop, *Parallel optimization of synthetic pathways within the network of organic chemistry*, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2012, 51, 7928-7932.
- [2]
- a) I. Ugi, J. Bauer, K. Bley, A. Dengler, A. Dietz, E. Fonatin, B. Gruber, R. Herges, M. Knauer, K. Reitsam, N. Stein, *Computer-assisted solution of chemical problems – the historical development and the present state-of-the-art of a new discipline of chemistry*, *Angew. Chem. Int. Ed.* 1993, 32, 201-227.
- b) I. Ugi, *Recent progress in the chemistry of multi-component reactions*, *Pure Appl. Chem.* 2001, 73, 187-191.
- [3] E. J. Corey, X.-M. Cheng, *The logic of Chemical Synthesis*, Wiley: Weinheim, 1989.
- [4] M. Fialkowski, K.J.M. Bishop, V. Chubukov, C.J. Campbell, B.A. Grzybowski, *The architecture and evolution of organic chemistry*, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2005, 44, 7263.
- [5] K.J. M. Bishop, R. Klajn, B.A. Grzybowski, *The core and most useful molecules in organic chemistry*, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2006, 45, 5348.
- [6] B.A. Grzybowski, K.J.M. Bishop, B. Kowalczyk, C.E. Wilmer, *The wired universe of organic chemistry*, *Nature Chemistry* 2009, 1, 31-36.
- [7] C.M. Gothard, S. Soh, N.A. Gothard, B. Kowalczyk, Y. Wei, B. Baytekin, B.A. Grzybowski, *Rewiring chemistry: Algorithmic discovery and experimental validation of one-pot reactions in the network of organic chemistry*, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2012, 51, 7922-7927.
- [8] P.E. Fuller, C.M. Gothard, N.A. Gothard, A. Wieckiewicz, B.A. Grzybowski, *Chemical network algorithms for the risk assessment and management of chemical threats*, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2012, 51, 7933-7937.
- [9] N.C. Duarte, et al., *Global reconstruction of the human metabolic network based on genomic and bibliomic data*, *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 2007, 104, 1777-1782.
- [10] D. Weininger, *SMILES, a chemical language and information system. 1. Introduction to methodology and encoding rules*, *J. Chem. Inf. Comput. Sci.* 1988, 28, 31-36.
- [11] D.C.I. Systems, *SMARTS – A language for describing molecular patterns*. <http://www.daylight.com/dayhtml/doc/theory/theory.smarts.html>.
- [12] Ball, P. *Chemistry World*, August 2012. <http://www.rsc.org/chemistryworld/2012/08/automatic-chemist>.
- [13] J. Chrostowski, *Matematyczna teoria w służbie nowoczesnej chemii – Grafy wiedzą lepiej*, *J. Polityka*, May 2013, 20, 54-56.
- [14] Tucker, I. *The Guardian*, August 2012: <http://www.theguardian.com/technology/2012/aug/12/chemica-chemistry-network-bartosz-grzybowski>.

← Rys. 6. Widok przykładowego ekranu oprogramowania Chemica ilustrujący jego możliwości – dla cząsteczki docelowej kamptotecyny

**Profesor Bartosz Grzybowski** z wyróżnieniem ukończył Yale, doktoryzował się w dziedzinie chemii na Harvardzie. Pod koniec 2003 roku rozpoczął pracę na Northwestern University. Wraz ze współpracownikami są pionierami badań nad nierównowagowymi procesami samoorganizowania w układach chemicznych (*Nature* 2000, 2002, *Science* 2002). Byli pierwszymi, którzy opisali samoorganizowanie oparte na oddziaływaniach elektrostatycznych w nanoskali (*Science* 2006) i zaprezentowali elektroniczne nanocząstki (*Nature Nanotechnology* 2011) oraz materiały hybrydowe łączące obiekty nanoskopowe z maszynami molekularnymi (*Nature Chemistry* 2009). Zespół Bartosza Grzybowskiego odkrył kilka fundamentalnych zjawisk w małej skali (w układach plastik-metal *Science* 2007; w fotoprzewodnikach odwrotnych, *Nature* 2009) i uznany za pionierski, chemiczny system reakcji dyfuzji działających w skali nano- i mikroskopijnej (przegląd w *Angew. Chem.* 2010 oraz podręczniku profesora B. Grzybowskiego na ten temat). Kolejnymi osiągnięciami grupy są odkrycie ogólnych praw rządzących Siecią Syntezy Organicznej – *The Network of Organic Synthesis* (*Nature Chemistry* 2009, *Angew. Chem.*, 2005, 2006), oraz stworzenia Chemica – „mózgu chemicznego” (*Angew. Chem.*, 2012a, 2012b, 2012c) już w tej chwili używanego przez kilku dużych firm i krajowych agencji bezpieczeństwa. W 2011 roku grupa rozwiązała chyba najstarszy problem naukowy – postawiony pierwotnie przez Talesa z Miletu – jak i dlaczego materiały łądowują się po zetknięciu ze sobą (*Science* 2011, *Science* 2013). W 2013 roku zademonstrowała pułapki magnetyczne, za pomocą których, w przeciwieństwie do ich odpowiedników optycznych, można manipulować obiektami nanoskopowymi zarówno magnetycznymi, jak i niemagnetycznymi (*Nature* 2013). Bartosz Grzybowski jest autorem ponad 200 artykułów z dziedziny chemii, fizyki i biologii, w tym 20. artykułów w *Science* i *Nature* oraz laureatem wielu nagród: ACS, AIChE, RSC, DChG, a także światowej *Nanoscience Prize Nanoscience* (2013).

## DYSPUTY PITAGOREJSKIE

*Forma rozmów, interakcji i spotkań inspirująca do dostrzegania nowych, ukrytych i zapomnianych aspektów rzeczywistości*

Wszelkie myślenie realizuje się w formach narzuconych przez język. Nasze postrzeganie i pojmowanie dokonuje się w ramach świata przez nas rozumianego, interpretowanego i nazwanego. Mowa jest organem poznawczym i przechowuje dla nas to rozumienie. Często mowa nieświadomie zawiera określoną interpretację bytu. Mowa teorii naukowej staje się organem za pomocą, którego tak naprawdę postrzegamy świat: „Dopiero teoria powiada, co się mierzy” (A. Einstein). Jeśli tak rozumie się język, to rozumie się również rolę rozmowy w dochodzeniu do prawdy: „Prawda poczyna się we dwoje” (F. Nietzsche). Chcemy takich rozmów, gdzie dzieje się prawda: „Istotna, byt trafiająca prawda powstaje dopiero w komunikacji” (K. Jaspers). Prawda dzieje się i powstaje między rozmawiającymi ludźmi. W rozmowie myśl nie jest przekazywana do drugiego jako gotowy twór. Jest to raczej

zaczyn, impuls pobudzający nurt własnych myśli, w sposób niezwykle twórczy wychodzący poza słowa i myśli pierwszego z rozmówców. Chcemy takich rozmów. Dysputy pitagorejskie to rozmowy. Rozmowy realizujące potęgę języka a w końcu słowa. Coś raz wypowiedziane zmienia rzeczywistość i to w sposób nieodwracalny. Wydaje się, że potęga słowa polega na uformowywaniu, czyli kreowaniu formy z bezkresu bezkształtnej substancji świadomości. Ten stosunek między formą i brakiem uformowania (brakiem formy) jest fundamentem świadomej egzystencji. Być może wypowiedziane, w rozmowie, w niezwykłym zdarzeniu zetknięcia się odrębnych światów (spotkaniu), „wydziela się z mglistego ła i dopiero wtedy staje się w pełni rzeczywiste. Nabiera kształtu i stałości i jako takie ostaje się.” (O.F. Bollnow).

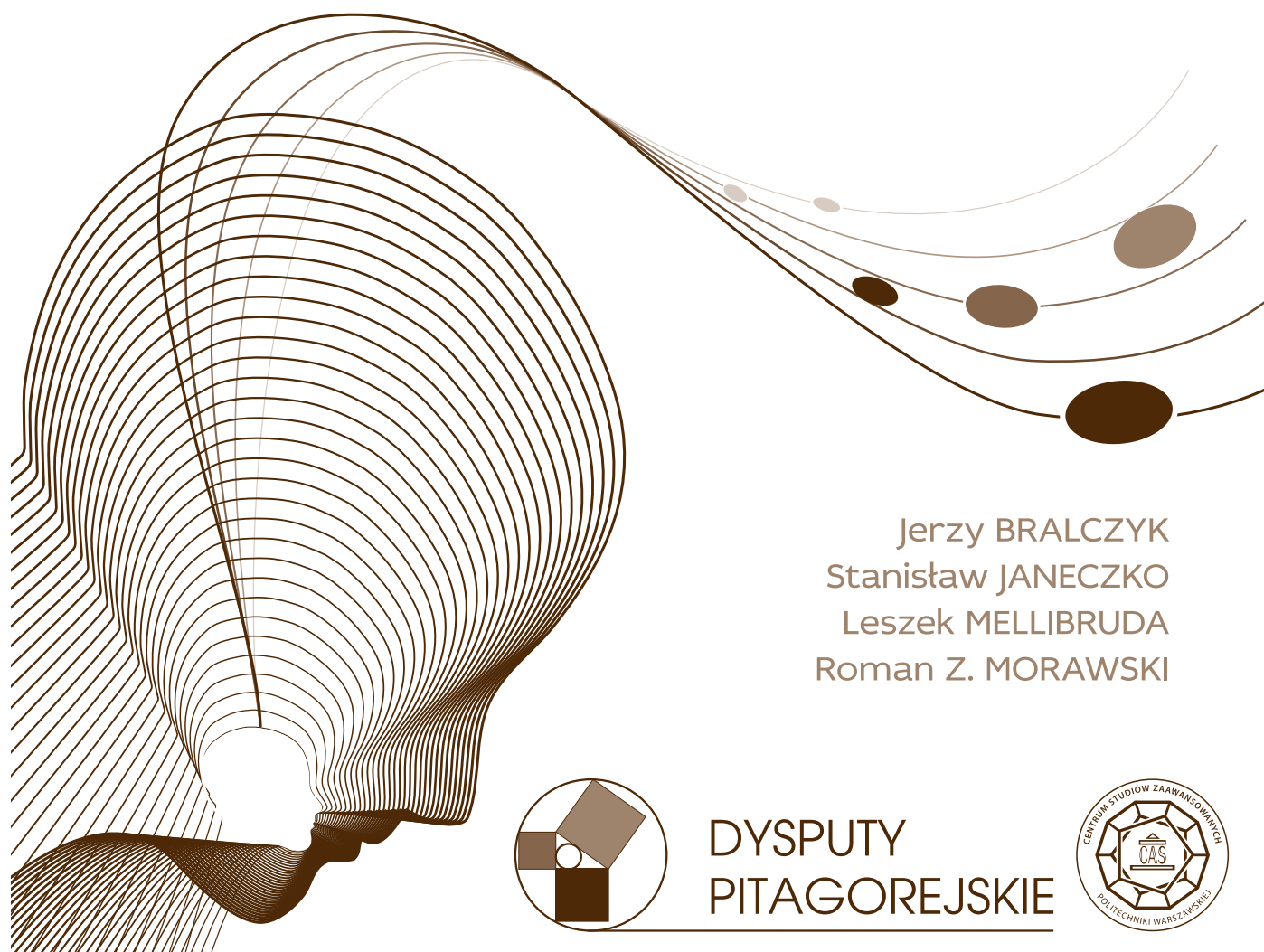
*Stanisław Janeczko*

### w cyklu DYSPUTY PITAGOREJSKIE

*Pierwsza rozmowa /październik 2015/:*  
Nadzieje i zagrożenia świata wirtualnego. Kiedy jesteś sobą? Wiarygodność informacji w Internecie. Nowe wzorce zachowań. Informacja i człowieczeństwo.

*Druga rozmowa /kwiecień 2016/:*  
Samodzielność w świecie nauki. Na czym polega samodzielność? W czym się przejawia? Samodzielność badawcza a niezależność życiowa. Odwaga i indywidualizm w nauce.

*Trzecia rozmowa /w planach/:*  
Czy istnieje przeszłość i przyszłość czy tylko teraźniejszość? Świat myśli i przeżyć. Czy czas i świadomość są tożsame? Jak poradzić sobie z sensem życia?



Jerzy BRALCZYK  
Stanisław JANECKO  
Leszek MELLIBRUDA  
Roman Z. MORAWSKI



DYSPUTY  
PITAGOREJSKIE

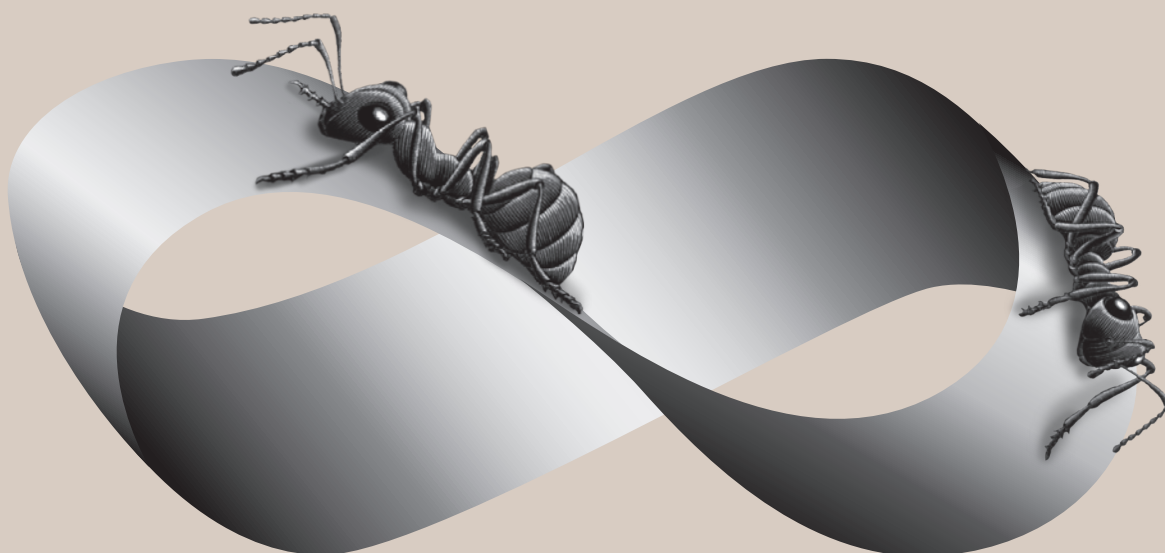


# „Efektem głodu teorii w ambitnych naukach przyrodniczych jest trend ku „numeryzacji”, odkłada się poszukiwania matematycznych podstaw teorii, a wprowadza zastępcze „metody obliczeniowe” ...”

Przed pojawieniem się teorii występuje złożony proces wyjaśniania i zaawansowanego opisu. Wyjaśnianie olbrzymiego korpusu obserwacji to ograniczanie dowolności w opisie tych obserwacji. Dla przykładu: prawo przyciągania Newtona  $F=km_1 m_2 /r^2$  ogranicza dowolność w opisie zbioru obserwacji i wprowadza pewien porządek/ład w obserwacjach mechaniki nieba i ziemi, ale nie wyjaśnia natury zjawiska przyciągania. Prawa przemian izotermicznych (Boyle’a, Mariotte’a) nie wyjaśniają natury ciśnienia. Dopiero cząsteczkowa teoria gazów wyjaśnia naturę ciśnienia jako efekt zderzania cząsteczek. Z kolei cząsteczkowa teoria gazów występuje jako wyjaśnienie dla istotnie szerszego zbioru obserwacji (termodynamika, ruchy Browna etc.). Jak przebiega proces wyjaśniania, czyli redukcji

dowolności opisu? W zgromadzonych obserwacjach dokonuje się wyróżnienia zjawisk elementarnych, wśród tych z kolei wyróżnia się pewne zespoły zjawisk elementarnych, tzw. zjawiska fragmentaryczne. Wśród zjawisk fragmentarycznych, ich zespołów wyróżnia się następnymi zjawiskami i tak powstaje pewna hierarchia w zbiorze zjawisk fragmentarycznych: wyższe rozkładają się na niższe. Dla podania najprostszego przykładu można rozważać jako obserwacje wszystkie słowa, zdania, okrzyki, dźwięki w języku naturalnym. Wyróżnione w nich zjawiska elementarne to fonemy w zdaniach, słowach, okrzykach etc. Zjawiska fragmentaryczne to oczywiście słowa, wyrażenia idiomatyczne, zdania. Dalej naturalnie prowadzona hierarchia to najniższe fonemy, następnie sylaby, następnie słowa i następnie zdania.

Cztery wyróżnione szczeble hierarchii. Kontynuowanie tych zabiegów i odnajdywanie związków pomiędzy szczeblami hierarchii prowadzi do bardzo powszechnych w nauce metod redukcjonizmu i strukturalizmu. Poszukiwanie struktury polega na wyborze dwóch sąsiednich szczebli w hierarchii oraz podanie formalizmu opisującego zjawiska fragmentaryczne wyższego szczebla w terminach zjawisk fragmentarycznych niższego szczebla. Metoda redukcji polega na rozkładzie zgromadzonych obserwacji na możliwie niskie, najniższe w hierarchii zjawiska fragmentaryczne i podaniu formalizmu pozwalającego generować wszystkie inne obserwacje z tych zjawisk fragmentarycznych. Dla przykładu można wymienić cząsteczkową i atomową budowę materii. W ogólności fizyka jest szczególną dziedziną nauki, właściwie brak teorii porównywalnych z fizycznymi, a jeśli są – to opisują często obiekty kreowane przez badacza – zamiast rzeczywistych. W każdej dziedzinie nauki występuje przemożne parcie, dążenie do ścisłej teorii, jest to trend ku „matematyzacji”, a więc popularność strukturalizmu. Efektem głodu teorii w ambitnych naukach przyrodniczych jest trend ku „numeryzacji”, odkłada się poszukiwania matematycznych podstaw teorii, a wprowadza zastępcze „metody obliczeniowe”, np. biologia obliczeniowa etc., lub przestawianie socjologii i psychologii i także przechemizowanie biologii. Często daje się odczuć, że używany język nie jest adekwatny, chociaż dostarcza namiastki rozumienia i dającego się przetwarzać opisu. Jaki to jest więc adekwatny język? To taki język, który

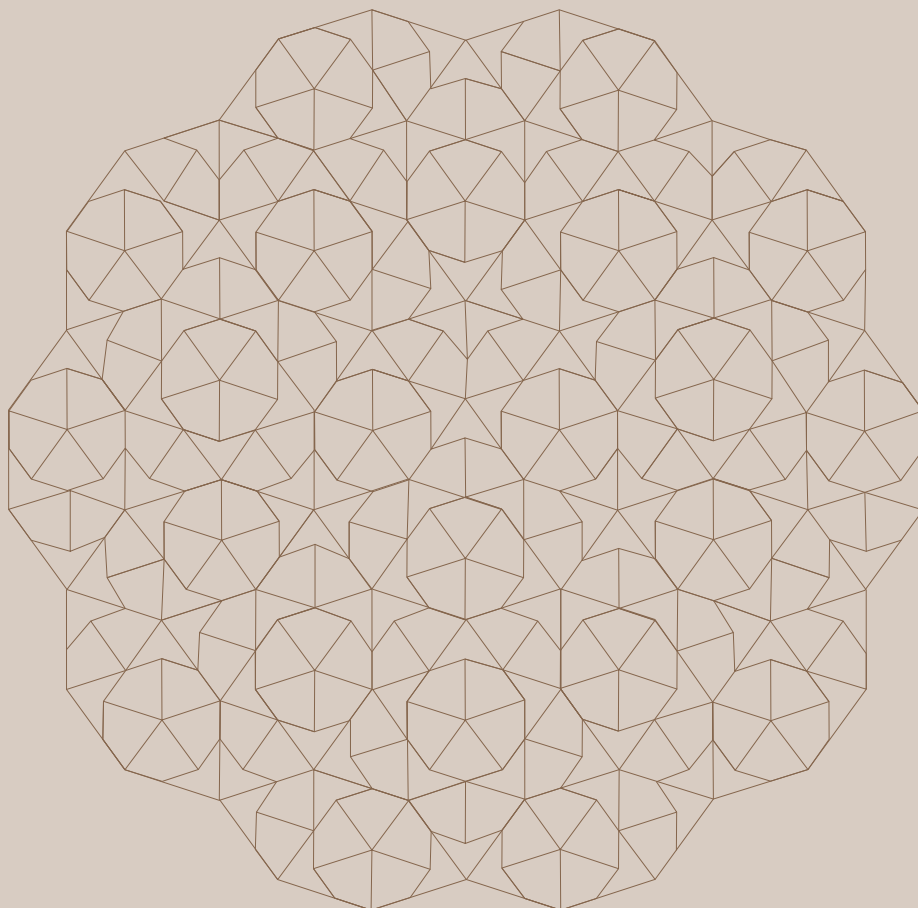




pozwała opisać złożoność korpusu i sformułować zgodną z nim teorię, tzn. sformułować model formalny. Podanie teorii nie jest jeszcze pełnym sukcesem. Ważne jest, aby język teorii na możliwie dużym obszarze stykał się z rzeczywistością, tzn. aby odpowiednio duża liczba jego podstawowych terminów miała odpowiedniki w naszych (bezpośrednich) postrzeżeniach, aby teoria nie mnożyła bytów. Adekwatny język to też taki język, który nie doprowadzi do stanu, w którym sami powiemy, że straciliśmy kontakt z początkowym obiektem naszych zainteresowań/badań i że mówimy o czymś innym. Dla przykładu można zrobić pewne porównania: Newton mówił o ciałach materialnych, także niebieskich. Językiem była analiza matematyczna. Jednak niektóre teorie fizyki, których językiem jest na przy-

„Pytanie, czy wynik badań jest praktyczny (i „przynosi pieniądze”) powinno być zastąpione pytaniem, czy wynik badań jest wartościowy?”

kład analiza funkcjonalna albo geometria algebraiczna etc., mówią głównie o matematyce, którą rozwijają, a nie o fizyce. Można wyraźnie zauważyć, że dawniej występował podział uczonych według obiektów ich zainteresowania. Obiekt zainteresowania jednocyli ludzi rozumiejących się. Dzisiaj ten podział wygląda już inaczej. Dostaniemy taki podział, jeśli dokonamy go głównie według używanych języków. Wiedza powstaje w procesie poznania. Poznanie to immanentna



własność świadomości. Ma niezwykle złożoną strukturę. Metoda poznania naukowego, opisana wyżej, jest jednym z wielu aspektów relacji w podziale na przedmiot i podmiot. Jest splotem dwóch nurtów aktywności. Poznania dzielącego, „rozbijającego na części”, diabolicznego od greckiego słowa dia-ballein oznaczającego rozdzielanie, rozpraszanie, oraz poznania symbolowego pochodzącego od greckiego słowa sym-ballein, czyli łączenia i jednoczenia, charakterystycznego dla antropozofii. Poznanie symbolowe odbywa się w pewnej symbiozie podmiotu i przedmiotu z zachowaniem pewnego szacunku dla poznawanego, gdy tymczasem poznanie dzielące nie ma tego szacunku, jest „poniżające” i „degradujące”. Zauważmy, skąd płynie przyczyna zniszczenia i degradacji naszego nie tylko materialnego świata. Zauważmy także, że poznanie dzielące jest łatwe i przynosi często szybki lokalny zysk. Kariera uczonego przeliczana na komercyjny efekt wypiera poznanie symbolowe lub go istotnie zubaża. Pytanie, czy wynik badań jest praktyczny (i „przynosi pieniądze”), powinno być zastąpione pytaniem, czy wynik badań jest wartościowy? W pewnym sensie

dominującą dziedziną nauki jest fizyka. Jednak właściwie fizyka jest tylko tam, gdzie formułowane prawa wyrażone są równaniami i jako takie są sprawdzalne doświadczalnie. Z praw wynika pewna hipoteza, co do przewidywanego rezultatu eksperymentu. Sprawdzenie doświadczalne, chociaż częściowo prawa fizyki, uzyskuje się po przeprowadzeniu eksperymentu potwierdzającego hipotezę. Widzimy wyraźnie, że natura nie jest generyczna. Prawa fizyki wyróżniają się raczej nie tym, że są typowe, tzn. takie jak prawie wszystkie możliwe do pomiaru, lecz tym, że zgadzają się z doświadczeniem z wielką precyzją.

{ Profesor Stanisław Janeczko,  
Dyrektor Centrum Studiów  
Zaawansowanych Politechniki  
Warszawskiej }

# Planeta wuja Thoma

René Thom geometryzuje i filozofuje z Jeanem-Francois Fogelem i Jeanem-Louisem Hue'em

*Tłumaczenie z języka francuskiego rozmowy z profesorem René Thomem, wybitnym matematykiem, twórcą teorii katastrof. Wersja oryginalna wywiadu pt. „La planète de l'oncle Thom” została opublikowana w 1977 r. w czasopiśmie „Le Sauvage”*

*Nasza skóra jest falą uderzeniową,  
Kora – tektoniką płyt,  
a świat – kulą krystaliczną z przeszłości,  
która się rozprzestrzenia w przyszłość.  
Za pomocą modeli matematycznych René Thom  
odkrywa sens życia i zastanawia się nad Bogiem*

Przed spotkaniem z Panem próbowaliśmy na próżno zrozumieć Pana prace. Uzyskałiśmy przede wszystkim ogromną satysfakcję estetyczną. Pańskie modele zasługują na ujawnienie, w ich przejrzystości i dynamice, ich mnogości w przestrzeni. Szczególnie kiedy Pan modeluje rozwój embrionu.

Przyznaję, że nigdy nie myślałem o tej sprawie w kategoriach estetycznych. Trzeba jednak przyznać, że moja wizja świata sytuuje mnie na poboczu w odniesieniu do postawy pragmatycznej naukowców. Generalnie uważają oni, że obiekt może stać się instrumentem stosowanym w konkretnym działaniu. Osobiście próbuję raczej zrozumieć początki każdej rzeczy, katastrofę lub centrum organizujące, które ją stworzyło. Kiedy analizuję embriologię, interesuję się czynnikami relatywnie abstrakcyjnymi, których konflikt powoduje rozwój embriologiczny. W tym sensie moje poczynanie ma aspekt być może bardziej refleksyjny niż pragmatyczny.

Na jaki rodzaj piękna jest Pan wrażliwy?

Osobiście nie jestem szczególnie wrażliwy.

To osobliwe jak na badacza, który zajmuje się formami.

Nie. Wrażenie estetyczne jest właśnie rodzajem sztuczki, którą używa życie, aby ludzie nie musieli myśleć. Daje ono wrażenie wiedzy natychmiastowej związanej z ukrytą głębią. Piękna forma wydaje się zwieńczeniem spójnego i jednolitego mechanizmu, który pokonał oporność materiału. W estetyce zadowolamy się cieszeniem. Ja,

przeciwnie, szukam zrozumienia i interpretacji dynamizmu tworzącego formy.

Wciąż próbuje Pan zrozumieć?

Tak. To trochę moje ciągle powołanie. Wszędzie, gdzie spojrzę, obserwuję małe przemiany form. Całkiem niedawno, na twarzy pokrytej zmarszczkami, dostrzegłem potrójny punkt pod oczami. To zasugerowało mi teorię, która tłumaczy wulkanizm wewnątrzpłytowy, jak mówią geolodzy. W morfogenezie biologicznej, obserwuje się całą masę fenomenów, które *a priori* są dziwne. Proszę przyjrzeć się formie liścia z drzewa. Technicznie ujmując, nie jest ona wcale natychmiastowa, wymaga wcześniejszego ukształtowania. To samo z korą drzew. Wiele z nich mają morfologię dosyć banalną, ale niektóre są o wiele bardziej złożone.

Jak odróżnić korę banalną od złożonej?

Na przykład brzoza jest dosyć banalna, ale jawor już bardziej specyficzny. Widać to po naturze przemian i kątach różnych rowków. Ogólnie, warstwy kory, a kora to również tektonika płyt, mają różny charakter w zależności od rodzaju rozpatrywanego drzewa. Natura geometryczna przemian informuje o zachowaniu się kory i podstawowej dynamice eksfoliacji.

Poza formami żywymi, Pana modele mogą obejmować również struktury społeczne?

Ponieważ struktury społeczne mają charakter statyczny, są konceptualnie bardziej proste i w wielu przypadkach

są podatne na modelowanie. W tej chwili próbuję opisać obecność obszarów morfogenetycznych w historii podczas rewolucji. Obszar morfogenetyczny, który występuje np. w rozwoju embriologicznym, jest następstwem wydarzeń, które podążają za wzorcem dobrze zdefiniowanym. W historii np. mamy wzorec następujący: ustrój rewolucyjny następuje po monarchii absolutnej. Następnie pojawia się dyktatura, a po niej odnowienie monarchii pierwotnej. Nadaję temu następstwu wydarzeń tłumaczenie o charakterze geometrycznym.

Nie mogę zrozumieć, jak Pan przewiduje rewolucję w przestrzeni. Jak tworzy Pan swoją figurę geometryczną?

Mój model opiera się na teorii elastyczności. Każda struktura społeczna jest trochę jak ściśnięta gałąź, której końce są umocowane. Jeśli podda się ją trochę mocniejszej sile, przybiera formę bardziej skrzywioną. Ta siła jest narzucana przez ogólny stan ducha członków społeczności. Kiedy odległość psychologiczna pomiędzy strukturą społeczną a strukturą mentalną członków społeczności staje się zbyt wielka, powstaje nagły skok i pojawia się nowy typ rządzenia.

Oczywiście, jest to sposób dosyć skomplikowany w wyjaśnianiu niektórych pojęć. W mojej teorii rewolucji dochodzę do jednakowych konkluzji co Tocqueville: każda rewolucja wynika z nagłej zmiany paradygmatów w organizacji społeczeństwa.

Pana modele wydają się mieć nieskończone pole zastosowań. Odnoszą się do rozlicznych fenomenów, historycznych, biologicznych, geologicznych etc. Czy naprawdę mogą być zastosowane w czymkolwiek?

Z założenia, tak. Teoria katastrof jest *grosso modo* teorią analogii. Dąży do klasyfikacji wszystkich możliwych sytuacji analogicznych, zarówno w świecie ożywionym, jak i nieożywionym. W tych dążeniach jest teoria presokratyczna: niektóre zagadnienia wyraźnie antropomorficzne jak konflikt, równowaga lub sprawiedliwość, mówiąc za Heraklitem, mogą mieć

sens w dziedzinach nieożywionych. To bardzo interesujące. Nie było żadnej ogólnej teorii analogii od Arystotelesa. Cała moja podstawa metafizyki polega na próbie zmiany koncepcji w geometrię. Zamiany logiki na dynamikę i koncepcji w geometrię. Kiedy udaje mi się przeprowadzić tę transformację, niektórzy pytają: Co Pan zyskuje, geometryzując sens, znaczenie? Tutaj pojawia się poważna obiekcja, która może odnosić się do zastosowań teorii katastrof. W szczególności w naukach humanistycznych. Mam na myśli prace Christophera Zeemana, który stworzył model geometryczny dotyczący zamieszek w więzieniach. Przedstawia on piękny obrazek tego co się dzieje, choć w gruncie rzeczy nie wnosi za wiele.

**Jaka forma geometryczna odpowiada zamieszkom w więzieniach?**

W modelu Zeemana pojawia się rodzaj formy falistej. Kiedy psychika więźniów przekracza pewien wierzchołek, wskakuje na inny stabilny poziom, który jest poziomem rebelii.

**Jak Pan wyczuwa chwilę niestabilną, moment katastrofy?**

To poluznienie stanu napięcia. To stan metastabilny, wpada się w stan bardziej stabilny. Ten właśnie typ sytuacji stanowi prototyp każdej katastrofy. Może to być wybuch lub spadek. Spadek w otchłań, śmierć, to są niezaprzeczalnie katastrofy.

**Jak przejawia się śmierć według matematyka?**

Według modelowania najprostszego, życie jest kraterem potencjału. Jesteśmy małą kulą, która się kręci od wewnątrz, podatna na wstrząsy mniej lub bardziej dowolne. Kiedy wstrząs jest wystarczająco duży, kulka przekracza ścianę krateru i spada ścianą zewnętrzną. W tym momencie następuje śmierć. Jest to całkiem prosta wizja unicestwienia. Jeśli chodzi o wizję śmierci człowieka, fascynuję się ideą Mallarmego, zgodnie z którą, w momencie gdy człowiek umiera, jego świadomość czasu staje się nieskończona. Inaczej mówiąc, to trochę jak asymptota hiperboli. Docenia się czas tym bardziej, im zostaje go mało do życia. Jeśli wrażliwość na czas może stać się nieskończona tuż przed śmiercią, jesteśmy nieśmiertelni. Może tak być, że w jednej setnej sekundy przed ostateczną utratą świadomości przeżywamy nieskończoność. W każdym razie nikt nie może wykluczyć tej hipotezy.

**Ale czy jest jakieś „poza”?**

Byłbym skłonny wierzyć w nieśmiertelność formalną człowieka. Istota formalna tworzy każdą z naszych egzystencji. Na przykład, w wymiarze genetycznym możemy powiedzieć, że dwaj bliźniacy realizują jedną istotę formalną. Rozwijając tę ideę, możemy założyć, że dwie istoty mogą realizować jeden, ten sam początek formalny. Inaczej mówiąc, możemy mieć powiązanie współistnienia z niektórymi istotami bez naszej świadomości.

**Czy można stworzyć model matematyczny Boga?**

Modelowanie matematyczne skłania do pewnego sceptycyzmu na ten temat. Mamy koncepcje, jak zbiór wszystkich zbiorów, które – dobrze wiemy – są sprzeczne. Pierwsza reakcja zatem, wobec koncepcji Boga, skłania do myślenia, że nie jest on spójny w wymiarze wewnętrznym. Osobiście nie przepadam za wizją monoteistyczną świata. Wolę wizję politeistyczną, nieskończenie bliższą rzeczywistości. Opiera się ona na idei konfliktu, według której źródła formujące lub nieformujące działają w naszej rzeczywistości i są w nieustan-

jest czas realny. Bezdyskusyjnie, czas jest nieodwracalny.

Jednak wśród wielu fizyków, czas jest osią, na której można cofać się i poruszać do przodu, co pozwoliłoby m.in. tłumaczyć fenomen prekognicji.

Nie mam zbyt dużej sympatii do tego rodzaju spekulacji. Rozróżnienie pomiędzy przeszłością a przyszłością wydaje mi się dosyć fundamentalne.

A jednak biologom udaje się skakać na osi czasu. Przyspieszając mutacje niektórych wirusów grypy, mogą przewidywać, jaki będzie typ wirusa grypowego w 1982 r.

Podchodzę sceptycznie do możliwości przewidzenia ewolucji wirusa. Zresztą, biolodzy mają w tej materii poglądy podstawowe. Dla mnie wirus jest procedurą używaną przez życie do niszczenia samego siebie. Jest to proces autodestrukcji o charakterze formalnie biologicznym. Uważam również, że niektóre choroby degeneracyjne, nawet jeśli są wirusowe, są w pewien sposób zaprogramowane genetycznie, w ścisły sposób, w naszej ewolucji biologicznej. Będzie niemożliwym ich uniknięcie lub cofnięcie.

{11}

„... życie jest kraterem potencjału. Jesteśmy małą kulą, która się kręci od wewnątrz, podatna na wstrząsy mniej lub bardziej dowolne...”

nej opozycji. Wizja ta jest dużo bardziej owocna niż wizja świata głównie monoteistyczna i racjonalna, gdzie wszystko jest ustalone raz na zawsze. Ta teocentryczna wizja jest niezwykle nieprzyjemna. Wobec czasu lepiej jest zachować znaczenie antropomorficzne. Przeszłość jest ustalona raz na zawsze, ale przyszłość w dużej mierze jest wolna, płynna. Możemy w niej działać. Według Josephsona, współczesnego fizyka, świat jest rodzajem kuli kryształowej z przeszłości, która się powiększa i rozprzestrzenia w przyszłość. Powierzchnią peryferyczną jest hiperpowierzchnia teraźniejszości oraz zdarzenia wzrostu, materia i promieniowanie. Uważam, że czas odwracalny jest iluzją fizyków. To nie

Samobójstwo, które jest autodestrukcją, nie jest zatem aberracją?

Absolutnie nie. Jeśli przyjrzymy się biologii, wiele sytuacji przywołuje samobójstwo. Śmierć jest jednym z narzędzi podstawowych życia a martwica komórek, jednym z wielkich czynników tworzenia organizmu. W embriologii, kiedy powstaje dłoń, formuje się jako płetwa. Następnie pojawia się szkielet kostny, potem cały obszar pośredni ulega martwicy, jak to się mówi w języku antropomorficznym. Komórki otrzymują rozkaz samobójstwa. Pojawiają się przerwy między palcami. Ta błona pozostaje zresztą u kaczek i tworzy płetwę.

→

Niektóre osoby mają przecież dłonie z błoną pławną.

Czy człowiek ma według Pana formę satysfakcjonującą? Kiedy robi Pan wykresy humanoidalne...

Nigdy nie próbowałem wyobrazić sobie innych rzeczy niż te, które istnieją. Może to błąd. Sądzę, że struktura ludzi i zwierząt odpowiada wymaganom dosyć oczywistym, narzuconym przez środowisko, źródła energii etc. W pewnym sensie człowiek realizuje strukturę bardziej zbliżoną do pierwotnych archetypów niż wiele żywych istot, które były przed nim. Na przykład nosorożec dysponuje monstrualnymi wyrostkami rogowymi, które nie są mu konieczne bardzo użyteczne, podczas kiedy człowiek jest pozbawiony organów naprawdę wyspecjalizowanych. Ręka jest organem, który ma nieskończoną możliwość czynności. Świadczy to o powrocie do początkowej nieokreśloności.

Istnieje konieczność człowieka na Ziemi, czy jest to gatunek jak każdy inny?

Trudno powiedzieć. Myślę, że człowiek wygrał, ponieważ wybrał inteligencję.

Czym jest inteligencja?

To zdolność do identyfikowania się z czymś innym, kimś innym. Ludzki system nerwowy jest organem alienacji. Pozwala na bycie kimś innym niż samym sobą. U innych zwierząt ta zdolność alienacji jest ograniczona do form biologicznych mniej ważnych, jak zdobycze i drapieżcy. U człowieka jest odwrotnie, alienacja obejmuje dużą kategorię istot i rzeczy, w założeniu, bez większego interesu biologicznego. Człowiek dowiódł, że posiada ciekawość. Zwierzęta są również zdolne do pewnej niezamierzonej ciekawości. Ale człowiek był zdolny do rozwinięcia tej ciekawości głębiej. W teorii religii George Bataille zastanawiał się, jaki byłby świat, gdyby człowiek nie istniał. Jaki byłby status ontologiczny świata postrzegany jedynie przez mózgi zwierzęce? To jest fascynujące zagadnienie. Bataille uczynił z tego źródło początkowe świętości. Świętość, tak jak erotyzm, według Bataille'a, to powrót do zaskórników prymitywnych, gdzie człowiek-zwierzę jest współistniejący ze swoją zdobyczą. W drapieżności usiłujemy nieustannie odzyskać rodzaj cząstki pierwotnej.

Na podstawie tej idei stworzyłem podstawy moich modeli dotyczących embriologii. Na początku nasza jedność

jest podzielona, jesteśmy czymś innym niż my sami, ale próbujemy odnaleźć naszą całość. To w tym wysiłku powrotu do jedności rodzi się świadomość. Kiedy jesteśmy świadomi, jesteśmy świadomi czegoś innego niż my sami.

Jednocześnie próbujemy zintegrować jedność początkową, co przekłada się na zdobycie obiektu pożądania i jego strawieniu lub destrukcji. W tym momencie pojawia się sen, to znaczy stan nierozróżnienia na drapieżcę i zdobywcę. Subiektywność znika, a razem z nią świadomość.

„Wielu uważa, że człowiek jest bardziej złożony od bakterii. Nie jestem o tym przekonany... Wszystko zależy od perspektywy...”

Stosuje Pan ten schemat do wszystkich drapieżników?

Oczywiście. Sądzę, że odnosi się do całej sfery biologicznej. Istnieje już na poziomie ameby. Niektórym pasożytom udaje się oszukać reakcje immunologiczne żywiciela, otaczając się jego białkami. Rozróżnienie między *self* a *non-self* ma tendencje do zanikania zupełnie na poziomie molekularnym. Ta anihilacja opozycji pomiędzy ja i nie-ja jest fundamentalna w dynamice biologicznej. Odnajdujemy ją na tym poziomie immunologii, ale również w trakcie całej ewolucji.

Mówił Pan o świętości. Wydaje się, że w Pana badaniach dużo jest emocji, uczucia prawie religijnego.

Interesowałem się bardzo nie tyle świętością, co magią. Wszystkie ludzkie społeczności do naszych czasów – nie wiem, czy należy powiedzieć, włączając czy wyłączając – wierzyły w magię. Wbrew charakterowi

gruntownie fałszywemu tych wierzeń, społeczeństwa przystosowały się do nich i odczuwały ich konieczność. To czyni problem teoretyczny niezwykle poważnym.

Jaką ma Pan na to odpowiedź?

Istnieje podstawowy sposób odpowiedzi. Reprezentacja przestrzeni zajęła dużo czasu, aby się zagnieździć w sposób właściwy u człowieka. Do czasów całkiem niedawnych, człowiek sądził, że przestrzeń, a nawet czasoprzestrzeń, mogły w pewnej mierze być plastyczne i dostosować się do jego życzeń. Samo w sobie nie jest to całkiem absurdalne. W gruncie rzeczy, wyposażyć substancję w energię kinetyczną, według teorii relatywistycznej, oznacza, nagiąć czas wokół tego obiektu. Kiedy rzucamy kamieniem, uzupełniamy bak benzyną, realizujemy wokół rodzaj osobliwości czasoprzestrzennej. Osobliwość, która będzie mogła się rozciągnąć dalej w czasie podczas ruchu. Magia polegała na wierze, że ta sama osobliwość mogła być osiągnięta przez procedury prób, poświęceń, rytuałów etc. Durkheim mówił zresztą: od magii do fizyki nie ma przeskoaku.

Człowiekowi udało się scalić swoją przestrzeń w przeciwieństwie do zwierzęcia, które dysponuje wieloma mapami – terytorium domowe, terytorium towieckie etc.

Nie należy przesadzać z tą różnicą. Powiedzmy, że człowiek jest świadomy, ponieważ dysponuje w każdym momencie lokalną mapą opisującą każdą przestrzeń, która go otacza, z usytuowaniem jego ciała wewnątrz. Wszystkie nasze akty świadomości pierwotnej są wciąż mniej lub bardziej przemieszczaniem się. Próbuje się uchwycić obiekt. Moment schwytania, jest przebłyskiem świadomości pierwotnej. Przestrzeń, widziana w ten sposób, przypomina koronę, a ciało – dziurę usytuowaną wewnątrz tej korony. Dziura składa się z punktów, których nie możemy osiągnąć. I jest ona przedziwnie wypełniona bólem i przyjemnością. Dla mnie to jest cud. Skóra jest rodzajem fali uderzeniowej, która oddziela dwa typy świadomości, świadomość ruchomą na zewnątrz od świadomości głównie afektywnej i kinetycznej wewnątrz. To są dwa rodzaje świadomości o różnej strukturze. Trudno mówić o geometrii ukrytej pod pojęciami bólu i przyjemności. Jaką nadać temu interpretację? Dla mnie to naprawdę tajemnica. Trzeba czasem się poddać, że nie rozumiemy.

Czym staje się ciało w matematyce?

W konstrukcji matematycznej człowiekowi udało się unicestwić ciało. Myśl matematyczna była zdolna do wypełnienia dziury ciała przez abstrakcyjną przestrzeń, pustą. We współczesnej matematyce ludzie twierdzą, że robią postęp, zastępując geometrię Euklidesa algebrą liniową i geometrią analityczną. Grubo się mylą. Osie kartezjańskie, to właśnie powrót ciała w przestrzeń. Początek to ciało, „ja”, a liniami są ramiona, które wychodzą z mojego „ja”, aby uchwycić jakikolwiek inny punkt przestrzeni. To powrót do obrazowania biologicznego.

Co mówią Pana koledzy, kiedy przedstawia Pan ten śmiały obraz?

Śmieją się, oczywiście. Ale uważam, że psychologicznie – to bardzo prawdziwe.

Jaka jest Pana wizja ewolucji? Życie zawsze optowało za formami najprostszymi w zależności od warunków środowiska?

Prostota jest niesłychanie trudna do zdefiniowania. Wielu uważa, że człowiek jest bardziej złożony od bakterii. Nie jestem o tym przekonany. Jeśli patrzemy na rzeczy z pewnej perspektywy, możemy uznać, że człowiek jest nieskończenie bardziej prosty niż bakteria. Wszystko zależy od perspektywy i poziomu morfologicznego, na którym się plasujemy. Jednak prostota lub złożoność nieskończone nie istnieją. Struktury hiperzłożone M. Morina

powodują u mnie hiperwzburzenie. Twierdzenie czegoś odwrotnego sprowadza się do przypuszczenia, że istnieją elementy nieupraszczalne, jak atomy, które można policzyć, aby wyznaczyć miarę złożoności jakiegoś systemu.

W jakim wymiarze możemy uznać, że człowiek jest mniej skomplikowany niż bakteria?

Proszę spojrzeć na fenomen metabolizmu bakteryjnego, jak mitozę, rozpad komórki na dwie części. Nie można dać żadnego sensownego wytłumaczenia. Złożoność jest ogromna. Należy rozważyć ewolucję chromosomów, jak DNA się dzieli na dwa, jak każdy kawałek rozchodzi się w swoją stronę komórki, jak wreszcie tworzy się rodzaj podziału między komórkami potomnymi etc. Nikt nie umie wytłumaczyć, jak te wszystkie wydarzenia są kierowane, stabilizowane. Jednakże proszę spojrzeć na struktury syntaktyczne mowy u człowieka. Z punktu widzenia algebraicznego jest to żałośnie proste. Jedną z zdobyczy, z której człowiek jest najbardziej dumny, ma charakter groteskowo prosty pod względem możliwości połączeń.

Czy mutacja dotyczy adaptacji formy do nowych warunków ekologicznych?

Możemy rozważać mutację na różne sposoby. Niektóre mogą mieć aspekt zabawowy. Kiedy jakiś gatunek ma się dobrze, nie przejawia problemów w swoim przeżyciu, może poświęcić

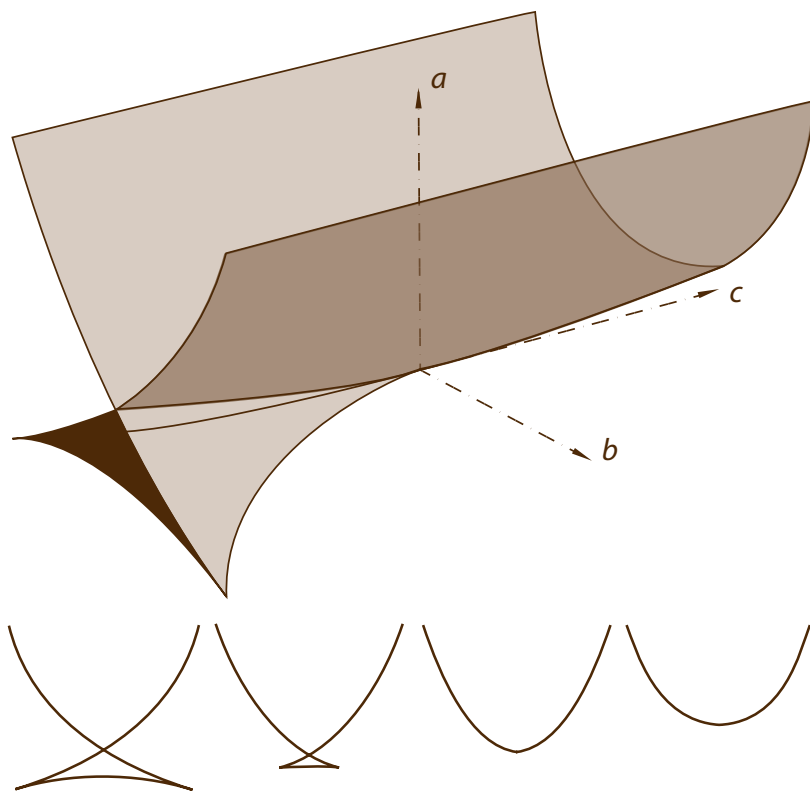
trochę czasu na eksperymenty i próby rozwoju w danym lub innym kierunku. Inne mutacje odbywają się jednak przez przymus przeżycia. W tym przypadku, biorąc pod uwagę pewną strukturę DNA, możliwości mutacji są dyktowane przez środowisko. Nie sądzę, aby DNA było jednostką autonomiczną w gatunku żyjącym. Mutacje biologiczne, które doprowadziły do wielkiego rozwoju ewolucyjnego nam znanego – to, co nazywamy ortogenezą – pociągają za sobą wizję o dużym zasięgu, w której zmiana nukleotydu w DNA jest niemożliwa. Czynić za to odpowiedzialną kombinatorykę molekularną jest wizją czysto teoretyczną. Niedawno odkryto, że kod genetyczny zawiera błędy w zakresie 10 do minus 4. Czyli jednej milionowej. To zdecydowanie więcej, niż sądzono zazwyczaj. DNA było uważane za mechanizm funkcjonujący z niesłychaną skutecznością. To tłumaczyło trwałość i wytrzymałość gatunków. W rzeczywistości, kod genetyczny jest mechanizmem dużo bardziej elastycznym niż sobie wyobrażano.

Jak zatem wytłumaczyć stabilność organizmów żywych?

Uważam, że ta stabilność jest natury kinetycznej. To stabilność turbiny, nie zaś struktur statycznych w organizmie, a DNA szczególnie. Natomiast te struktury są według mnie podległe strukturze kinetycznej, nazywanej metabolizmem. Nieustanny przepływ cząsteczek krąży w organizmie. Co za tym idzie, jego jednostki nie należy szukać na poziomie molekularnym, tylko na poziomie struktury kinetycznej. Współcześni biolodzy dotykają zaledwie powierzchni cząsteczek. Dokonują opisu molekularnego, jak kiedyś naturaliści robili z robakami, ale nie wiemy wiele więcej o cząsteczkach i ich interakcjach niż o robakach. Problem w zrozumieniu, jak globalny porządek rzeczy może wynikać z nagromadzenia lokalnych stabilnych sytuacji, jest ogromny. Wymaga stworzenia nowych teorii. To stary problem regulacji. Norbert Wiener podjął zagadnienie pod kątem cybernetyki. Jednak pozostało to na poziomie programu. Cybernetyka nie istnieje, nie zawiera żadnego twierdzenia.

A teoria systemów?

Ona również nie istnieje. Rozróżnienie między systemem otwartym a zamkniętym nie jest trudne. System zamknięty to skrzynka nieprzemakalna, a system otwarty to skrzynka, której ściany są



## „...matematyka to poszukiwanie ciągłości w sposób dyskretny... ciągłość jest naprawdę jednostką podstawową, obiektem pierwotnych dociekań.”

przejrzyste dla materii i promieniowania. Nie idzie to dalej. Jedyne rozsądne podejście do kontroli będzie się musiało odbyć za pomocą geometrii, uwzględniając struktury wielowymiarowe. Niemniej idea, że tylko struktury cztero-, pięcio- lub sześciowymiarowe pozwolą na zrozumienie figury regulującej istotę żywą, jest daleka do przyjęcia. Kiedy próbuję wytłumaczyć moje modele biologom, mówię im: mamy system dynamiczny, którego obszar fazy jest zmienną  $M$  z obszarem wektorowym  $X$ . Nagle przestają słuchać. Powiedziałem dwa słowa, których znaczenie im umyka. Uważam, że każdy dzisiaj powinien wiedzieć, czym jest system dynamiczny ogólny. We wszystkich dyscyplinach nauki może okazać się to niezbędne.

Pana podejście wydaje się podważać fundamenty wielu nauk, od biologii po fizykę.

Należałby nieco zniuansować zagadnienie. W fizyce Wiener świetnie mówił o niedorzecznej słuszności praw fizycznych. Te prawa stanowią cud. Należy to uwzględnić i wykorzystać, co ludzkość zrobiła zresztą kompetentnie i skutecznie. Ale fundamentalny błąd polega na przekonaniu, że cud będzie się powtarzał. Fizyka musi być czymś więcej niż zbiorem dobrych rad. W sytuacji kiedy te recepty już nie działają, trzeba się ograniczyć do prób zrozumienia.

Jakie są dziedziny, w których fizycy są ograniczeni?

W fizyce wysokich energii, cząstek elementarnych. Żadna nowa koncepcja nie pojawiła się praktycznie od 1930 r. i kręcimy się wciąż wokół tych samych idei, z tym samym typem technik. Za każdym razem kiedy nowa cząstka jest odkryta, tworzy się nowy parametr ją opisujący i nie widać, dlaczego miałyby się to zatrzymać. Jesteśmy świadkami targu cząsteczkami. Próbuje się wprowadzić nieco ładu za pomocą technik przypominających majsterkowanie, powiedzmy majsterkowanie

intelektualne. Ale żadna spójna koncepcja nie pojawia się. Wciąż jest otwarte kluczowe odwieczne pytanie, natury filozoficznej, o zrozumienie natury relacji pomiędzy przestrzenią, materią i promieniowaniem. Według poglądu kartezjańskiego materia jest chorobą przestrzeni. To przekonanie Einsteina w ogólnej teorii względności. Jednostką podstawową jest przestrzeń, zaś materia ogranicza się do osobliwości przejawiających się mniej lub bardziej poprzez lokalne przekształcenia geometrii przestrzeni lub jej topologii. Według postawy bardziej fizycznej Ernesta Macha, przestrzeń nie istniałaby, jeśli materia i promieniowanie nie byłyby po to, aby ją wypełniać i tworzyć. Wciąż są wątpliwości pomiędzy tymi dwoma punktami widzenia. Jest to sytuacja bardzo uciążliwa, niemniej nie na poziomie technicznym.

Słuchając Pana, odnosi się wrażenie, że nauka w swojej całości, staje się mocno podejrzana.

Ogromna większość prac eksperymentalnych, które są realizowane, nie mają praktycznie żadnego znaczenia. Trzeba to powiedzieć brutalnie. Zresztą według Paula Weissa, amerykańskiego biologa, przeważająca większość prac naukowych powinna nosić podpis W.C. - Wipe Clean. Po 15. latach powinny wszystkie być usunięte z bibliotek i wyrzucone. Wszędzie

mówi się, że ogromna ilość odkryć i wiedzy przekracza nasze możliwości. To jedynie prawda z punktu widzenia ilościowego. Gdybyśmy zredukowali każdą dyscyplinę do jej idei podstawowych, wyszłoby - powiedzmy - około 12 stron. Ponadto, wykonując niewielki wysiłek językowy, każdy byłby w stanie je zrozumieć. Mam w zwyczaju przyznawać, że matematyka pozostaje najtrudniejszą z nauk. Kiedy słucham odczytów moich kolegów podczas seminariów, bardzo często nic nie rozumiem. Powiedzmy nawet, że najczęściej nie interesuje mnie to.

Nie jest Pan już tylko matematykiem, ale prawie filozofem. Jaki ma Pan ogólny obraz swojej pierwszej dyscypliny?

Dla mnie matematyka to poszukiwanie ciągłości w sposób dyskretny. Dysponujemy daną ciągłą, którą stanowi przestrzeń, w której działamy. Działanie jest zawsze czymś dyskretnym. Najpierw działaliśmy za pomocą ciał stałych, następnie je rozdzieliliśmy. W ten sposób zostały zdefiniowane długości, metryka etc. Cała matematyka zaczyna się od poszukiwania ciągłości w sposób dyskretny. Powstały różne dziedziny w zależności od stopnia dyskretności lub ciągłości, jaką akceptują. Niektóre dziedziny matematyki są czysto dyskretny, np. kombinatoryka, teoria zbiorów, etc. Inne, przeciwnie, pławią się w ciągłości w sposób ekstremalnie płynny i ogólny, jak rachunek wariacyjny, teoria równań różniczkowych cząstkowych. W zależności od temperamentu, każdy matematyk pracuje albo w dyscyplinach bardzo dyskretnych i precyzyjnych albo w dyscyplinach płynnych i szerokich. Trzeba wybrać. Osobiście bliżej mi do płynności. Uważam, że ciągłość jest naprawdę jednostką podstawową, obiektem pierwotnych dociekań.

*Tłumaczenie: Ilona Sadowska*

{ **Profesor René Thom** (1923-2002) – francuski matematyk, obecnie znany głównie jako twórca teorii katastrof (1966), ale popularność przyniosły mu również wcześniejsze dokonania. Za swoje prace z zakresu topologii został nagrodzony medalem Fieldsa w 1958. W latach 1957–1967 był profesorem Uniwersytetu w Strasburgu, od 1963 – Instytutu Wyższych Studiów Naukowych w Bures-sur-Yvette pod Paryżem. Od 1967 członek Francuskiej Akademii Nauk. Jego talent matematyczny ujawnił się już w dzieciństwie, jednak wojna zakłóciła rozwój naukowy i doktorat ukończył dopiero w 1951. Uhonorowany wieloma nagrodami. Jego rozmówcy i słuchacze mówili: „...charakteryzował się subtelnym dowcipem, wielkim sceptycyzmem i cichą wesołością w odniesieniu do szeroko pojętej kondycji ludzkiej. Miał oryginalne poglądy na temat wszystkiego, jego pisma były często prowokacyjne i pobudzały czytelników do szukania prawdy...” }

<http://www.matematycy.interklasa.pl/>

# Rysunek - obraz myśli

O roli rysunku odręcznego w pracy architekta, urbanisty, projektanta etc., ale także jego znaczeniu w rozwoju inteligencji wizualno-przestrzennej

Rysowanie u większości z nas budzi przede wszystkim skojarzenia z doznaniem estetycznymi, mającymi wydawałoby się stanowić cel jego powstania. Walory estetyczne, będące kwestią wtórną w stosunku do koncepcji powstałej w wyobraźni autora, wybijają się na pierwszy plan. Dzieje się tak z oczywistych względów - większość z nas bowiem jest wrażliwa na piękno. Wiele dzieł dodatkowo niesie ze sobą olbrzymi ładunek symboliczny. W moich rozważaniach chciałabym jednak skupić się na użyteczności rysowania. Co ciekawe, ów wymiar estetyczny często stanowi również o użyteczności rysunku - wspomnę o tym aspekcie w dalszej części artykułu. Przede wszystkim jednakże chciałabym skupić się na przedstawieniu rysunku jako narzędzia umożliwiającego projekcję myśli.

## Rysunek a inteligencja

Na pewno narzędzie, jakim jest rysunek, spełnia ogromną rolę w pracy projektantów: architektów, urbanistów, grafików, projektantów wzornictwa przemysłowego, mody, ilustratorów

etc. Wymienione zawody stawiają na kreatywność, będącą składową współczesnej definicji inteligencji. Obejmuje ona już nie tylko myślenie logiczne, a więc tzw. zdolności intelektualne, lecz wiele innych elementów tworzących spektrum pojęć opisujących zakres ludzkich zdolności. Warto przyrzeć się im bliżej, bowiem w ich charakterystyce odnajdujemy odniesienia do umiejętności zarówno towarzyszących projektantom, jak i sprawnym rysownikom.

Według koncepcji Charlesa Spearmana największą kreatywnością powinniśmy odznaczać się około 30 roku życia. Wtedy właśnie jesteśmy (jeszcze) w dobrej formie w odniesieniu do tak zwanej inteligencji płynnej (w uproszczeniu: ujmującej zdolności intelektualne i myślenie). Równocześnie wiedzę większości 30-latków można określić już jako dość rozbudowaną - Spearman określił ją jako inteligencję skryształizowaną. Gdzieś pomiędzy obydwojma przytoczonymi rodzajami inteligencji (składającymi się wg Spearmana na „czynnik g” - inteligencję

ogólną) zachodzą oddziaływania, stanowiące twórcze przetwarzanie informacji - zwane właśnie kreatywnością - czyli to, co dzieje się, gdy z gmatwaniny twórczych myśli zmieszanych z naszym zapleczem wiedzy wyłania się na kartce papieru rysunek koncepcyjny budynku, planu miasta, przedmiotu, ubioru etc.

Powyższa koncepcja inteligencji wskazuje na wzajemną zależność czynników ją tworzących. W opozycji do niej powstały inne teorie, w których wyszczególnione elementy są odrębne, choć ze sobą współpracują. Jedną z nich jest koncepcja inteligencji wielorakich Howarda Gardniera. Wyróżnił on osiem rodzajów inteligencji: językową, logiczną, wizualno-przestrzenną, muzyczną, społeczną, interpersonalną, ruchową i przyrodniczą. Warto zauważyć, że tylko jedną z nich (logiczną) odnosimy do IQ - symbolu często utożsamianego z inteligencją jako całością. Stąd spojrzenie Gardniera stanowiło rewolucję w myśleniu

(15)

→



↑ Rys. 1. Odręczna perspektywa ukazująca projektowaną ulicę, powstała podczas warsztatów *charrette* | Autorka: Joanna Pętkowska

o jej zakresie. Dodatkowo określił on poszczególne rodzaje inteligencji mianem potencjałów, które można rozwijać. W odniesieniu do inteligencji wizualno-przestrzennej to właśnie rysunek odręczny stanowi znakomite medium umożliwiające jej rozwój, na równi z wszelkimi przejawami aktywności manualnej (malarstwem, rzeźbą czy konstruowaniem modeli). Optymizmem napawa fakt, że również osoby obdarzone słabszym potencjałem w danej dziedzinie mogą poprzez aktywność na danym polu powiększyć swoje możliwości. Dlatego właśnie tak istotna jest edukacja rysunkowa studentów kierunków związanych z projektowaniem. Stymuluje inteligencję wizualno-przestrzenną, a więc w dużej mierze wyobraźnię przestrzenną, która stanowi element niezbędny w pracy każdego projektanta.

Sprawność wyobraźniowa pojawia się jako jedna z siedmiu pierwotnych zdolności umysłowych według Louisa Thurstone'a. Wraz z rozumieniem informacji, płynnością słowną, zdolnościami numerycznymi, pamięciowymi, spostrzegawczością i rozumieniem indukcyjnym stanowi ona, wprowadzone przez tego psychologa, pojęcie „bazy inteligencji”. Co ciekawe, zdolności wyobraźniowe, zwane inaczej wizualizacją przestrzenną, są bardzo rozwinięte u dzieci. Z czasem przestają one skupiać się na budowaniu obrazu, koncentrując się na tym, co widzą, tracając w pewnym stopniu zdolności wyobraźniowe, z drugiej strony jednak zyskując umiejętność odtwarzania trójwymiarowego obrazu przedmiotu na dwuwymiarowej płaszczyźnie kartki papieru. Poprzez rysunek możemy zatrzymać proces cofania się w zakresie umiejętności wizualizacji – w której biegłością wykazują się dzieci – tak istotną w projektowaniu lub innym procesie wymagającym unaocznienia czegoś, czego jeszcze materialnie nie ma.

### Charrette

Aby przybliżyć czytelnikom wyżej opisane procesy obrazowania myśli na tle pojęcia inteligencji oraz wykazać w praktyce przydatność rysowania odzwierciedlającego umiejętności wizualno-przestrzenne, pozwolę sobie przytoczyć obserwacje poczynione

→ Rys. 2.

Fragment przykładowego rysunku planu, czyli języka graficznego przedstawienia, jakim postępują się urbaniści. Propozycja wytycznych do miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego, będąca wynikiem warsztatu *charrette*

przeze mnie podczas udziału w kilkunastu warsztatach architektoniczno-urbanistycznych prowadzonych metodą *charrette*, w kraju i za granicą.

Ciekawa wydaje się sama metoda *charrette*, powstała i szeroko rozpowszechniona w Stanach Zjednoczonych, w Polsce zaś stanowiąca rzadkie zjawisko, jeśli chodzi o metody projektowe. Warsztaty *charrette* polegają na zebraniu w miejscu, gdzie powstaje projekt, wszystkich stron w niego zaangażowanych (inwestora, architektów, urbanistów, inżynierów komunikacji, architektów krajobrazu i innych specjalistów) w celu zintensyfikowania i przyspieszenia procesu powstawania koncepcji projektu. Trwają one około 3-10 dni i odbywają się w ogólnodostępnej przestrzeni, tak aby wszyscy zainteresowani, a przede wszystkim mieszkańcy, mieli szansę zapoznać się z proponowanymi zmianami przestrzennymi. Mają ku temu okazję dzięki publicznym prezentacjom odbywającym się podczas *charrette*, które również umożliwiają im skomentowanie planów i sformułowanie uwag.

Podstawę warsztatów – ale również i całego procesu projektowego – stanowi wzajemne porozumiewanie się stron, a niezastąpionym językiem komunikacji jest właśnie rysunek odręczny.

### Rysunek jako obraz myśli

Zanim jednak nastąpi proces przekazywania myśli projektanta drugiej stronie, musi zostać ona przekształcona w formę – rysunek. Szkice odręczne poprzez swoistą lapidarność i niezobowiązujący charakter ułatwiają dochodzenie do finalnego rozwiązania samemu projektantowi, równocześnie stanowiąc zachętę dla odbiorców do wyrażenia opinii i ewentualnej krytyki, co jest niezwykle cenne podczas *charrette*. Szkice odręczne powstają szybko, więc można je również w prosty sposób

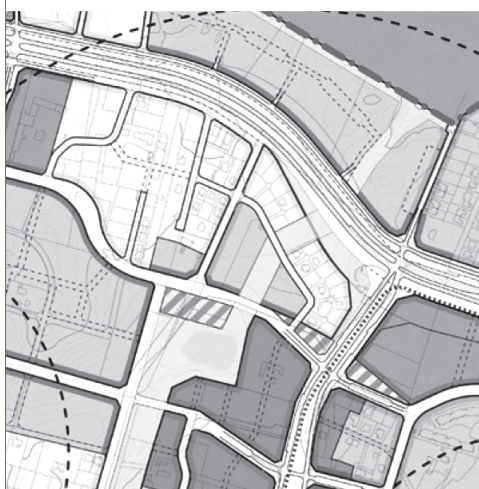
zmodyfikować, nawet w całości, bez żalu nad czasem straconym na zbyt daleko idące wdawanie się w szczegóły, jak to ma miejsce często przy rysunkach komputerowych. Często już na tym najwcześniejszym etapie projektu pojawia się użycie technik cyfrowych, co może nieść ze sobą niebezpieczeństwo uzależnienia rozwiązania projektowego od możliwości programu, nie zaś od uzdolnień i nieskrępowanej wyobraźni projektanta (wg Thurstone'a byłaby to właśnie owa wizualizacja przestrzenna – sprawność wyobraźniowa). Ołówek i kartka czy też model fizyczny również niosą ze sobą ograniczenia, ale są one widoczne dopiero na późniejszym etapie projektowania, gdy wymagana jest już znaczna dokładność przedstawienia. Siła technik cyfrowych, zawarta w ich nieskończonej precyzji, staje się równocześnie słabością właśnie na etapie koncepcyjnym. Dzieje się tak dlatego, iż ważniejszy jest wtedy charakter projektowanej przestrzeni aniżeli poprawność i dokładność rozwiązania. Swoista dynamika związana z „burzą mózgów” i ciągłe zmiany pomysłów na *charrette* w zasadzie wykluczają użycie komputera w pierwszych dniach warsztatów, bowiem wprowadzanie zmian w programie wymagałoby wyraźnie większego nakładu czasu niż szybkie naszkicowanie kolejnego wstępnego wariantu rozwiązania.

Nie dysponując w początkowym etapie konkretnymi danymi co do szczegółów planu i detali architektonicznych, projektanci potrzebują jednocześnie do prezentacji i dyskusji perspektyw sygnalizujących specyfikę i atmosferę projektowanej przestrzeni. Wtedy właśnie, dla potrzeb przedstawienia pierwszych idei w formie trójwymiarowej (np. widok projektowanej ulicy czy placu), sprawny rysownik o sporej świadomości architektonicznej i urbanistycznej potrafi stworzyć widok perspektywiczny bez szczegółowych informacji (rys. 1). Dostępne obecnie programy komputerowe nie potrafią obejść się bez czasochłonnego modelowania opartego na zadanych parametrach.

To właśnie wyobraźnia projektanta czerpiąca z pokładów wiedzy i emocji (wg Spearmana byłaby to więc kooperacja między inteligencją płynną a skryzalizowaną), wyrażona najpełniej w autorskim rysunku, jest elementem nie do zastąpienia przez żaden program komputerowy.

### Rysunek jako przekaz myśli

Rysunek nie tylko pozwala projektantowi na dojście do rozwiązań projektowych i uporządkowanie





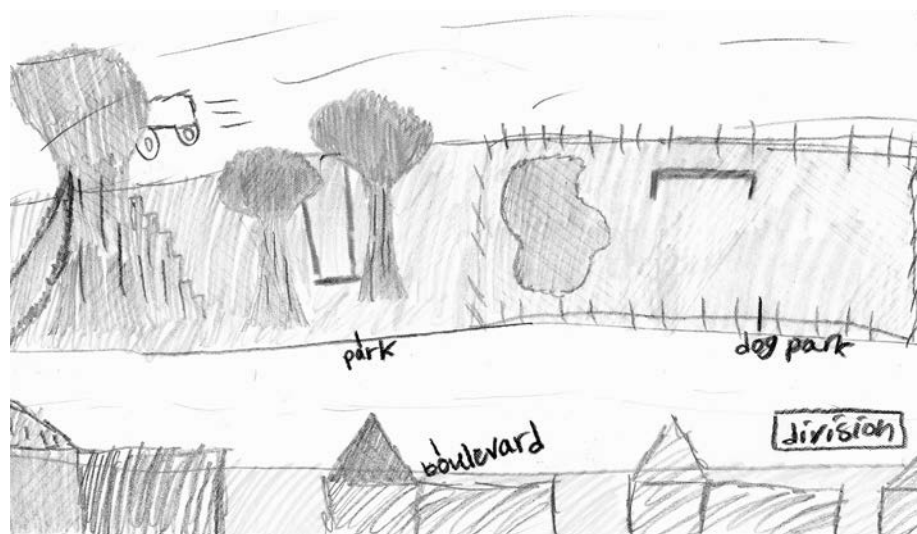
myśli w sposób graficzny, ale również stanowi środek porozumiewania się, zarówno z innymi projektantami, jak i osobami niezwiązanymi zawodowo z branżą projektową. Jest środkiem przekazu informacji „na zewnątrz” – uniwersalnym językiem, zrozumiałym niezależnie od kręgu kulturowego. Od ręczne perspektywy znacznie dobitniej tłumaczą projekt niż nierzadko bardzo skomplikowane plany, rzuty i przekroje, często nieczytelne dla osób spoza kręgu zawodowego, w którym rysunki techniczne są codziennością (rys. 2).

Język porozumiewania się, jakim jest rysunek, stanowi również dla osób najmłodszych najłatwiejszy nośnik przekazu ich myśli i potrzeb. Podczas *charrette* w Chicago, w którym miałam okazję uczestniczyć, inwestor postanowił zorganizować warsztaty rysunkowe dla mieszkańców: rodziców i dzieci. Dzieci dostały za zadanie narysowanie, jak według nich powinna wyglądać projektowana okolica, w której mieszkają. Często niewypowiedziane spostrzeżenia dzieci odnośnie ich środowiska zamieszkania znalazły ujście w pełnych treści i emocji rysunkach, stanowiących silnie nacechowany treścią przekaz wyobrażeniowy (rys. 3). Znacznie trudniej byłoby otrzymać od dzieci informację werbalną, również ze względu na nieśmiałość osób w najmłodszym wieku. Już sama czynność rysowania stanowiła dla dzieci atrakcję, nie trzeba więc było ich zmuszać do podzielenia się własnymi spostrzeżeniami odnośnie miejsca zamieszkania – od razu po zajęciu miejsca zaczynały rysować. Rysunek stanowił zatem swoisty katalizator umożliwiający otrzymanie informacji zwrotnej od dzieci.

Wartym podkreślenia jest również fakt ułatwienia poprzez rysunek porozumiewania się między uczestnikami warsztatów, niejednorodnymi kulturowo i etnicznie, dla których często angielski nie stanowił ojczystej mowy. Zanikła zarówno ta bariera, jak i bariera wieku: kreska i plama stała się językiem uniwersalnym dla wszystkich.

### Estetyka a użyteczność

Podczas publicznej prezentacji projektu, która zamyka warsztat *charrette*, można zauważyć jeszcze jedną ważną zaletę ręcznych wizualizacji. Prócz klarowności przekazu wyróżniają się również atrakcyjnością dla odbiorcy. Rysunek przykuwa wzrok i uwagę, dlatego też ma bardzo dużą siłę oddziaływania – znacznie większą niż przekaz słowny. Stanowi to istotny aspekt marketingowy w momencie „sprzedaży” projektu



↑ Rys. 3. Rysunek dziecka uczestniczącego w warsztatach rysunkowych podczas *charrette*, ukazujący propozycję zmian w dzielnicy | Autor: Elliot Dickinson

szerszej publiczności i przekonania jej o pięknie przyszłej realizacji. Oczywiście, tak jak wspominałam na początku artykułu, wizualna atrakcyjność rysunku w projektowaniu jest jedynie dodatkiem do jego warstwy merytorycznej.

### Nietypowe źródła rozwoju naukowego

Na koniec, pamiętając o odbiorcach niniejszego tekstu, chciałabym zadumać się nad wykorzystaniem rysunku odręcznego w aspekcie różnorodnych wydziałów politechnicznych. Po krótkim rozpoznaniu w grupie doktorantów i doktorów innych specjalności niż architektura i urbanistyka, okazuje się bowiem, że właściwie w każdej dyscyplinie naukowej jest on obecny bądź nawet określany jako „niezbędny”. Rysowanie podczas pracy naukowej ułatwia krystalizację myśli, ich przekaz, tłumaczenie innym zawiłych zagadnień, usystematyzowanie ich czy też spojrzenie na problem z nowej perspektywy. W kwestii zależności między inteligencją wizualno-przestrzenną i związanym z nią wykorzystaniem

rysunku przez naukowców ciekawe wydaje się pytanie, czy rozwijanie wyobraźni przestrzennej poprzez rysowanie mogłoby wpłynąć na większą kreatywność u uczonych wszystkich specjalności, a co za tym idzie na nowe odkrycia? Podążając za sposobem myślenia Howarda Gardnera, można spodziewać się, że rozwinięcie jednego potencjału (rodzaju inteligencji) może stymulować rozwój innego. Wyjście poza krąg zdolności matematyczno-logicznych w kierunku rozwoju zdolności pozornie nie mających bezpośredniego związku z naukami ścisłymi (jak inteligencji ruchowej – np. tańca, muzycznej – np. gry na instrumencie czy też właśnie wizualno-przestrzennej – np. rysunku czy malarstwa) mogłoby w moim przekonaniu przynieść bardzo wartościowe rezultaty.

Do takich niestandardowych działań rozwojowych serdecznie zachęcam czytelników z kręgów politechnicznych i uniwersyteckich, życząc przełomowych i jak najciekawszych wyników w pracy naukowej.

{ Joanna Pętkowska, doktorantka Wydziału Architektury. Za dyplom magisterski została nagrodzona w międzynarodowym konkursie PKN ICOMOS im. Profesora Jana Zachwatowicza na najlepsze prace dyplomowe podejmujące problematykę ochrony dziedzictwa kulturowego. Nauczaniem rysunku architektonicznego i malarstwa akwarelowego zajmuje się od 8 lat. Jest współzałożycielką Szkoły Rysunku „Lineare” (www.lineare.pl). Ponadto zasiada w zarządzie Stowarzyszenia Akwarelistów Polskich (www.sap-art.pl). W 2014 roku została laureatką konkursu na naukowe stypendia wyjazdowe Centrum Studiów Zaawansowanych PW, które zrealizowała na Technische Universität Berlin. W ramach współpracy z Centrum w 2015 r. odbył się jej wernisaż pod tytułem „Warszawa-Berlin”, a w 2016 r. ukazał się album „Akwarele” prezentujący wybrane prace z lat 2005-2015\* }

\* Album „Akwarele” Joanny Pętkowskiej można nabyć w księgarniach Oficyny Wydawniczej PW

## KOSMOS PITAGORASA

Wyróżnienie Centrum Studiów Zaawansowanych PW „*Laus tibi, non tuleris qui vincula mente animoque*”

Wyróżnienie Centrum Studiów Zaawansowanych Politechniki Warszawskiej *Laus tibi, non tuleris qui vincula mente animoque* – „Chwała Ci za to, że nie pozwoliłeś nałożyć więzów na swój umysł i swego ducha” zostało ustanowione przez Radę Programową CSZ PW w 2014 roku. Jest przyznawane na wniosek przewodniczącego Rady za szczególne zasługi dla środowiska naukowego – osiągnięcia w budowaniu efektywnych przestrzeni badawczych i przełamywanie granic poznania. Przy nominacji do wyróżnienia brane są pod uwagę cechy indywidualne kandydata. Przyznanie wyróżnienia jest związane z nadaniem tytułu Mistrza Centrum Studiów Zaawansowanych. Pamiątkowa statuetka w ręczna laureatom jest kryształowym dwunastościanem symbolizującym osobowość Mistrza, ponieważ jedynie Mistrz wie, jak wypełnić pustkę i nie jest więźniem materii, tylko Mistrz słyszy harmonię, wie skąd przychodzi, gdzie się znajduje i dokąd zmierza. W dwunastościan został wtopiony zarys Akademii Platona symbolicznie ustawionej na akronimie angielskiej nazwy Centrum – Center for Advanced Studies (CAS).

Po raz pierwszy wyróżnienie przyznano w grudniu 2014 roku i otrzymał je profesor Krzysztof Maurin, twórca Katedry Metod Matematycznych Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Bez wątplenia cały dorobek życia profesora Krzysztofa Maurina czyni Go Mistrzem, ale najcelniejszym potwierdzeniem nominacji do tego wyróżnienia, wydają się słowa św. Jana Pawła II, przypomniane przez profesora Stanisława Janeczko: „Kiedy profesor Maurin mówił o pięknie matematyki, można było pomyśleć, że transcendentalia: *verum, bonum et pulchrum* – charakteryzują ludzką działalność bez względu na to, jaką się wybierze specjalizację” (16-19 sierpnia 1980 roku, Castel Gandolfo) → *więcej informacji: <http://goo.gl/eLoZ8I>*

Drugie wyróżnienie zostało przyznane niezwykle wielowymiarowej osobowości – profesorowi Markowi Abramowiczowi. Uroczystość temu poświęcona odbyła się w grudniu 2015 roku. Uświetnili ją swoją obecnością przedstawiciele kadry naukowej Politechniki Warszawskiej, Polskiej Akademii Nauk oraz Uniwersytetu Warszawskiego – profesorowie: Leszek Adamowicz, Rajmund Bacewicz, Jerzy

Banaszek, Katarzyna Chałasińska-Macukow, Leon Gradoń, Marian Grynberg, Mirosław Karpierz, Jerzy Kijowski, Andrzej Kolasa, Franciszek Krok, Małgorzata Lewandowska, Zbigniew Lonc, Alina Maciejewska, Józef Modelski, Rafał Moderski, Joanna Pijanowska, Piotr Przybyłowicz, Kazimierz Stępień, Jan Szmidt, Jerzy Tafel, Stanisław Wincenciak, Władysław Włosiński, Piotr Życki oraz przewodnicząca Samorządu Studenckiego Żaneta Krześniak.



Uroczystość zainaugurował i poprowadził prof. Stanisław Janeczko, dyrektor Centrum Studiów Zaawansowanych, który przypomniał idee przyświecające ustanowieniu Wyróżnienia CSZ oraz uzasadnił przyznanie nagrody laureatowi. Profesor Janeczko podkreślił znaczenie relacji mistrz-uczeń w kontekście procesu kształcenia rozumianego nie jedynie jako zdobywanie „warsztatu”, lecz przede wszystkim kształtowanie osobowości w paradygmacie dążenia do prawdy, mądrości, poszerzania granic poznania. W realizacji tych dążeń niezbędne są autorytety, współcześni duchowi i intelektualni Mistrzowie. Celem Rady Centrum Studiów Zaawansowanych jest wyłuskiwanie takich Mistrzów, niezwykłych osobowości, których postawa i działalność stanowią wzór i inspirację dla innych, a pitagorejskie i platońskie inspiracje statuetki Wyróżnienia CSZ, przywołujące tradycje Akademii Platonskiej z ideałami mądrości, męstwa, umiarkowania i sprawiedliwości wysoko stawiają poprzeczkę przyszłym laureatom. Profesor Marek Abramowicz, ze swoim szerokim wachlarzem zainteresowań, w pełni zasługuje na miano współczesnego człowieka renesansu, którego

intelekt swobodnie meandruje szlakami racjonalistycznego dyskursu, jak i humanistycznego zainteresowania sztuką, literaturą. Licznym osiągnięciom naukowym na niwie astrofizyki, ogólnej teorii względności, teorii akrecji, czarnych dziur czy figur równowagi gwiazd towarzyszy równoczesne zaangażowanie w działalność nieszablonową dla naukowca, jak: tworzenie poezji, stały kontakt ze środowiskiem artystycznym, reżyseria nagrodzonego przez Andrzeja Wajdę amatorskie-

go filmu, adaptacja i współtworzenie sztuki teatralnej, działalność społeczna i edukacyjna popularnonaukowa, pisanie artykułów do prasy o różnorodnej tematyce pozanaukowej. Profesor Marek Abramowicz, będąc głęboko świadomy europejskich korzeni naszej kultury i cywilizacji, w tym nauki, czuje się kontynuatorem tej fundamentalnej tradycji, a o zaangażowaniu w przekazywanie wiedzy, krzewienie szeroko rozumianej prawdy w duchu doktorskiej przysięgi *spondeo ac polliceor* świadczą wypromowani przez niego liczni doktorzy, a wśród nich późniejsi profesorowie renomowanych uczelni na całym świecie, między innymi: prof. Ewa Szuszkiewicz, prof. Piero Madau, prof. Omer Blaes.

Słowa motta Wyróżnienia „Chwała Ci za to, że nie pozwoliłeś nałożyć więzów na swój umysł i swego ducha” doskonale odzwierciedlają dotychczasowy dorobek życia laureata przedstawiony w laudacji przez profesora Kazimierza Stępnia z Obserwatorium Astronomicznego Wydziału Fizyki UW. → *więcej informacji: <http://goo.gl/12aJfn>*

Jowita Krakowiecka

# Na progu kwantowej rewolucji w informatyce

*Profesor Van Cao Long, autor jednego z wykładów inspirowanych Nagrodą Nobla w dziedzinie fizyki, który odbył się w ramach cyklu Scientia Suprema*

Informatyka i teoria kwantowa niewątpliwie są dwoma największymi trendami intelektualnymi XX wieku, które diametralnie zmieniły naszą cywilizację. Informatyka, czyli nauka o komputerach, chociaż jej początki sięgają czasów Charlesa Babbage'a (początek XIX wieku), dopiero w latach czterdziestych XX wieku zyskała solidną podstawę matematyczną. Stało się to dzięki pracom wybitnego matematyka pochodzenia węgierskiego, Johna von Neumanna. Był on również twórcą matematycznej podstawy teorii kwantowej, która stanowi jeden z dwóch filarów fizyki współczesnej i ma przełożenie na zastosowania praktyczne. Największe z nich to energia jądrowa (rozbicie jądra atomowego przez Ernesta Rutherforda w 1919 roku) i technologia półprzewodnikowa (opracowanie tranzystora przez Waltera Brattaina i Williama Shockleya w 1948 roku, za które otrzymali Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki w 1956 roku). Można śmiało powiedzieć, że dla ludzkości odkrycie tranzystorów jest dużo ważniejsze niż odkrycie energii jądrowej. Energia jądrowa, chociaż dała nowe ważne źródło energii, to do tej pory nie odegrała kluczowej roli w energetyce – a tego się spodziewano. Było wręcz odwrotnie, ponieważ niektóre kraje, ze względów bezpieczeństwa, całkowicie zrezygnowały z tego źródła energii. Natomiast odkrycie tranzystorów, a w 1959 roku układów scalonych przez Jacka Kilbyego (Nagroda Nobla w dziedzinie fizyki w 2000 roku), doprowadziło do niewyobrażalnej kiedyś miniaturyzacji komputerów, które przyczyniły się do rozwoju całej ludzkości w niesamowitym tempie. Implementacja półprzewodnikowa idei von Neumana doprowadziła do powstania coraz szybszego, mniejszego i tańszego komputera.

Tempo rozwoju miniaturyzacji komputerów najlepiej opisuje empiryczne prawo Gordona Moore'a (jednego z założycieli firmy Intel), który na podstawie obserwacji wzrostu liczby tranzystorów w układzie scalonym wywnioskował, że ekonomicznie optymalna liczba

tranzystorów w układzie scalonym podwaja się co 12 miesięcy. Później to korygowano i obecnie przyjmuje się, że liczba tranzystorów w mikroprocesorach od wielu lat podwaja się co około 24 miesiące. Zgodnie z tym prawem, coraz więcej tranzystorów umieszcza się w coraz mniejszym obwodzie scalonym. Zachowując te tendencje, dążymy do granic technologicznych i ekonomicznych wyznaczonych przez samą fizykę – i prawdopodobnie coraz częściej je osiągamy. Procesy fotolitograficzne, nawet te uznane za nowoczesne, zawodzą. Nie tylko rozmiar tranzystorów się zmniejsza, ale także połączenia między nimi. Niestety, to powoduje, że duże gęstości prądu niszczą ścieżki przewodzące. Drugim problemem jest odprowadzenie wydzielonego ciepła z takiego małego obwodu. Ciepło jest wydzielone zarówno z powodu niskiej wydajności energetycznej tranzystorów włączających się i wyłączających w układzie scalonym, jak i (zgodnie z prawem Landauera) przy każdym „wymazaniu” jednego bitu energii (wtedy strata energii w postaci wydzielonego ciepła jest mniej więcej równa energii kinetycznej cząsteczki gazu w temperaturze pokojowej). Podstawowe klasyczne bramki logiczne (jak AND, OR) działają właśnie w ten sposób, że na wejściu mamy dwa bity, a na wyjściu jeden, zatem jeden bit jest „wymazany” i spowoduje wydzielanie ciepła. Mówimy, że takie bramki są nieodwracalne. Efekt jest taki, że w wyniku wielu miliardów obliczeń miniaturyzowane układy scalone mogą zostać „ugotowane we własnym sosie” i zniszczone w bardzo krótkim czasie.

Poza tym istnieje klasa problemów nierozwiązywalnych przez obecne komputery, które już od kilkunastu lat nazywamy klasycznymi. Należy tu zaznaczyć, że pojęcie klasyczności jest względne i zależy od tempa rozwoju w danej dziedzinie – na co zwrócił uwagę Roy Glauber w swoim wykładzie noblowskim w 2005 roku. Tam, gdzie dana dziedzina wiedzy czy sztuki szybko się rozwija, „klasyka” jest stosunkowo młoda. Dla przykładu,

muzyka klasyczna liczy ponad dwieście lat, fizyka klasyczna ponad sto lat, a komputer klasyczny jeszcze działa! W wielu przypadkach nawet niektóre teoretycznie rozwiązywalne problemy stają się niewykonalne ze względu na ogromną złożoność realizujących je algorytmów. Typowym przykładem jest problem faktoryzacji dużej liczby pierwszej na czynniki pierwsze. Dla faktoryzacji liczby o 400 cyfrach przy obecnej mocy obliczeniowej trzeba byłoby czasu obliczeń równego prawie wiekowi Wszechświata. Ten problem matematyczny jest istotnym elementem słynnego szyfru RSA (skrót od pierwszych liter nazwisk jego odkrywców R. L. Rivest, A. Shamir, L. Adelman), który jest używany obecnie w internecie i bankach. Jak przekonamy się dalej, komputer kwantowy to zagadnienie rozwiązywałby w ciągu kilku minut, co oznacza, że taki szyfr wcale nie jest bezpieczny. W ramach tzw. kryptografii kwantowej stworzono kilka bezpiecznych systemów, które nie zostały złamane ani podsłuchane. Jest to bardzo szybko rozwijająca się dziedzina, a jej opracowania są już na etapie wejścia na rynki handlowe. Pod tym względem kryptografia kwantowa wyprzedza rozwój komputerów kwantowych, a dzieje się tak głównie dlatego, że do przekazu informacji wystarczy niewiele tzw. kubitów (zdefiniowanych niżej).

Jest to zadziwiające, że teoria kwantowa opracowana w latach dwudziestych ubiegłego stulecia na podstawie dość „sztywnej” ramy matematycznej odpowiadającej naszemu „zdrowemu rozsądkowi”, ma swoje konsekwencje w rzeczach jak najbardziej sprzecznych z tym rozsądkiem. Dzięki temu też obserwujemy niesamowity postęp cywilizacji świetnie widoczny np. w rozwoju elektroniki, zwłaszcza w dziedzinie komputerów. Wystarczy przypomnieć, że ponad 80% dochodu światowego powstaje z udziałem teorii kwantowej. Tajemniczy świat kwantowy, dziwny, ale niewątpliwie użyteczny, wciąż dostarcza zaskakujących rezultatów, takich jak rozwój kwantowych

technologii informatycznych w latach dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia. Powstały one z połączenia fizyki kwantowej z inżynierią komputerową opartą na najnowszych osiągnięciach fizyki ciała stałego, fizyki atomowej i molekularnej, optyki oraz elektroniki kwantowej. To wszystko doprowadziło do stworzenia nowej dziedziny badań naukowych przyjętych powszechnie pod nazwą informatyki kwantowej. Pierwsze pomyslnie przeprowadzone eksperymenty przyczyniły się do budowy prototypów komputerów kwantowych, które pozwalały sądzić, że jesteśmy u progu nowej rewolucji technologicznej porównywalnej do tej, jaka miała miejsce ponad sześćdziesiąt lat temu, kiedy wynaleziono tranzystory.

Idea liczenia kwantowego pochodziła od „skarbnicy” oryginalnych pomysłów, jednego z najpotężniejszych umysłów XX wieku, znakomitego amerykańskiego fizyka, laureata Nagrody Nobla Richarda Feynmana. Zauważył on w roku 1982, że przy symulacji dynamiki układu dużej liczby cząstek za pomocą klasycznego komputera, czas obliczeń wzrasta wykładniczo przy wzroście liczby cząstek, co wymagałoby zbudowania maszyny liczącej zgodnie z prawami kwantowymi. Trzy lata później brytyjski matematyk Dawid Deutsch stworzył matematyczne podstawy działania takiej maszyny, którą nazywamy komputerem kwantowym.

Wcześniej, bo już w latach czterdziestych ubiegłego wieku, Feynman akcentował zasadę dodawania amplitud prawdopodobieństwa, a nie samych prawdopodobieństw, gdy istnieją różne realizacje (drogi) danego procesu. Amplitudy te są liczbami zespolonymi (mówiono, że przestrzeń stanów danego układu jest przestrzenią Hilberta, która jest przede wszystkim przestrzenią wektorową nad ciałem liczb

zespolonych), czyli mogą być przedstawione za pomocą modułu i fazy. Dzięki Leonhardowi Eulerowi, który wniósł wkład w rozwój właściwie wszystkich, jemu współczesnych, dziedzin matematyki, mamy te słynne *sinusy* i *cosinusy*. Wszyscy wiemy ze szkoły średniej, że *sinusy* i *cosinusy* reprezentują fale. Jeśli są odpowiednio dodane, to mamy konstruktywne lub destruktywne interferencje. Można też, z zastosowaniem samej definicji liczb zespolonych, przedstawić udział każdej z tych dróg za pomocą dwóch liczb rzeczywistych, które z kolei są interpretowane jako składowe pewnego wektora o stałej długości, lecz o dowolnym kierunku. Dodawanie udziałów różnych dróg polega na dodawaniu tych wektorów. W ogólnym przypadku tych dróg jest nieskończenie wiele, co wymaga znajomości analizy funkcjonalnej stworzonej przez Stefana Banacha i innych. Wtedy stosujemy teorię „całek po drogach” Feynmana. W niektórych przypadkach liczba dominujących dróg jest skończona a dodawanie skończonej liczby wektorów nie jest sprawą trudną. Algorytmy kwantowe to nic innego jak procedura manipulacji tymi amplitudami, czyli działania na głębszym poziomie niż same prawdopodobieństwa. Trzeba wymyślić taką procedurę, która doprowadziłaby do konstruktywnych interferencji kwantowych, które pozwolą na uzyskanie zamierzonych rezultatów, a niechciane wyniki będą wyeliminowane przez interferencje destruktywne.

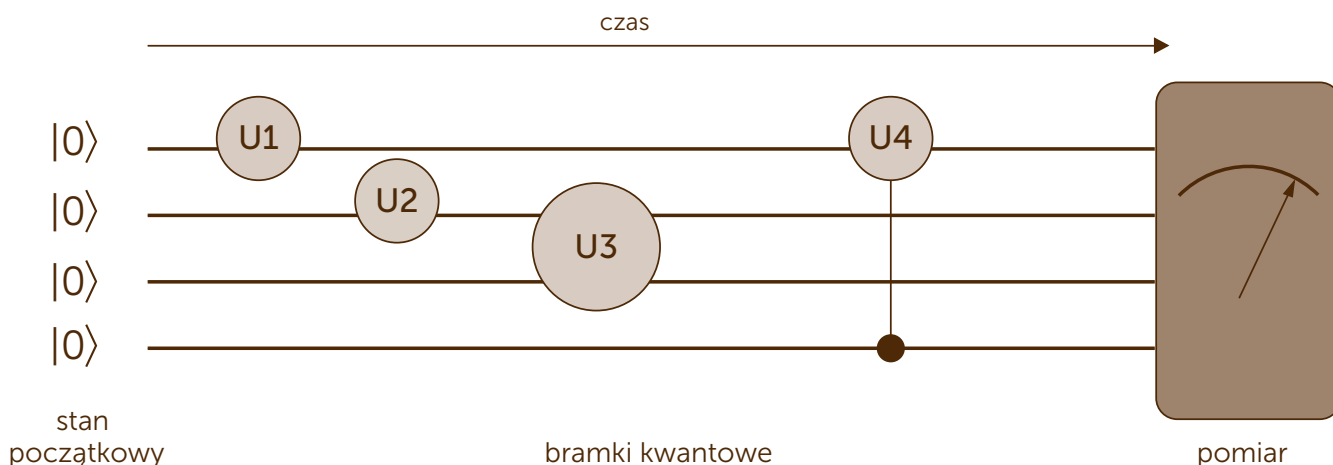
Oczywiście opracowanie takich algorytmów jest bardzo trudnym przedsięwzięciem, ponieważ badacz, poza doskonałą znajomością informatyki klasycznej musi wykazać się perfekcyjnym opanowaniem teorii kwantowej, która często daje wyniki sprzeczne ze zdrowym rozsądkiem. Jednak praktyka pokazała, że nie jest to *mission impossible*,

gdyż udało się znaleźć kilka algorytmów kwantowych. Najśłynniejszymi z nich są: algorytm teleportacji (zrealizowany fizycznie) i algorytm Shora dla faktoryzacji dużej liczby naturalnej na czynniki pierwsze (zrealizowany przez procesor siedmiokubitowy do rozkładu  $15 = 3 \cdot 5$ ). Okazało się, że konstruktywne interferencje kwantowe doprowadzą do par liczb bliskich poprawnego rozwiązania z dużym prawdopodobieństwem. Możliwość manipulacji na poziomie amplitud prawdopodobieństwa, a nie samych prawdopodobieństw, leży u podstaw każdej technologii kwantowej, a nie tylko w budowie komputerów kwantowych. Komputer klasyczny nie ma bezpośredniego dostępu do amplitud wektora stanu będącego superpozycją wektorów stanów tzw. bazy obliczeniowej, o której będzie mowa niżej.

Żeby zrozumieć, na czym polega przewaga komputerów kwantowych nad komputerami klasycznymi, przyjrzymy się bliżej, jak działa komputer kwantowy. Schemat komputerów kwantowych przedstawia rysunek 1.

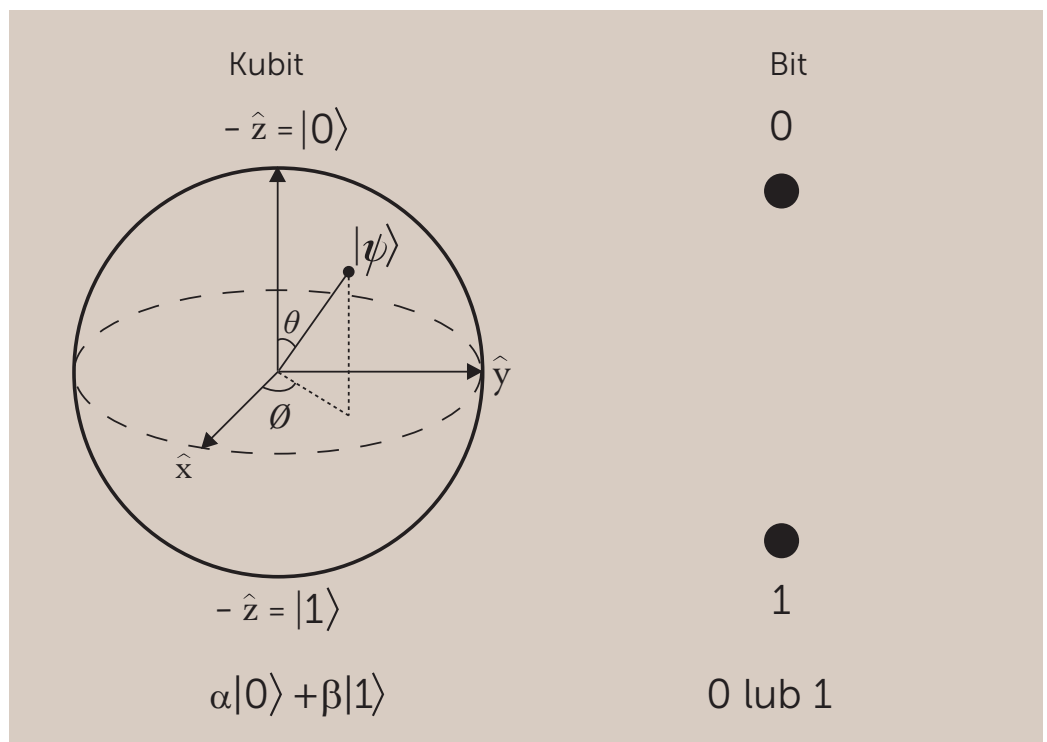
Na wejściu jest stan początkowy układu fizycznego realizującego obliczenia kwantowe z zastosowaniem praw fizyki kwantowej. Najprostszym układem jest kubit jako najmniejsza jednostka informatyki kwantowej, będąca odpowiednikiem bitu klasycznego, którego stany mogą być tylko 0 lub 1. Bit jest podstawowym elementem dowolnego komputera klasycznego i może być implementowany fizycznie przez dowolny układ fizyczny mający dwa stany. We współczesnych komputerach tym układem jest tranzystor, o czym była mowa na początku artykułu. W odróżnieniu od bitu, stany kubitu należą do kontinuum sfery dwuwymiarowej o promieniu 1 zwanej sferą Blocha (rys. 2). Jest tak, ponieważ kubit może znajdować

↓ Rys. 1. Schemat komputera kwantowego



się nie tylko w dwóch różnych stanach, lecz również w ich dowolnej (zespolonej) superpozycji, co jest konsekwencją faktu, że przestrzeń Hilberta stanów kubitów jest przede wszystkim wektorowa, w której dowolny wektor może być przedstawiony w postaci superpozycji wektorów bazy zwanej bazą obliczeniową. Może on być implementowany przez dowolny kwantowy układ dwustanowy, na przykład przez cząstkę o spinie  $\frac{1}{2}$  jak elektron lub foton o różnych polaryzacjach.

Tak więc jeden kubit może znajdować się w dwóch stanach: 0 lub 1, lub w dowolnej ich superpozycji, czyli może równocześnie reprezentować zero i jedynkę. Fakt ten jest konsekwencją postulatu o stanach, który leży u podstaw formalizmu kwantowego i do tej pory nie znaleziono żadnego faktu doświadczalnego, który by zaprzeczał temu postulatowi. Postawmy zatem pytanie: co oznacza równoczesność „przechowania” zera i jedynki? Zgodnie z interpretacją, powszechnie przyjętą przez fizyków szkoły kopenhaskiej, jeśli dokonujemy pomiaru takiego kubitów, stan superpozycji ulega tzw. kolapsowi do jednego ze stanów 0 lub 1 (tzn. kubit znajdzie się albo w stanie 0, albo w stanie 1) z prawdopodobieństwem odpowiednio równym  $|\alpha|^2$  lub  $|\beta|^2$  (oczywiście  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ ). Widać stąd, że układ kwantowy jest bardzo „skąpy”. Z ogromnego bogactwa (kontinuum) swojego zasobu informacji pozwala poznać tylko skończoną ilość informacji i to w sposób przypadkowy! Jednak, jak zobaczymy dalej, taki „kwantowy skąpiec” pozwala przechować ogromną ilość informacji w porównaniu z pamięcią klasyczną. Ponadto, pozwala dokonać obliczeń przed pomiarami, to znaczy obliczeń na superpozycjach (mając jeden kubit można równocześnie wykonywać dwa równoległe obliczenia). W konsekwencji kubity spełniają jednocześnie rolę pamięci operacyjnej i jednostki obliczeniowej. Zestaw skończonej ilości takich kubitów nazywamy rejestrem. Jeden z kolejnych postulatów mechaniki kwantowej głosi, że stan rejestru jest iloczynem tensorowym wszystkich dwuwymiarowych przestrzeni stanów kubitów wchodzących w skład danego rejestru. Proste obliczenia algebraiczne pokażą, że rejestr dwukubitowy reprezentuje dowolną superpozycję czterech stanów (00, 01, 10, 11), a rejestr trójkubitowy – dowolną superpozycję ośmiu stanów (000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111) itd. Jeśli przygotujemy stan początkowy pojedynczego kubitów jako  $\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$ , to rejestr dwukubitowy przechowuje



↑ Rys. 2. Wartości kubitów przedstawione na sferze Blocha

jednocześnie cztery liczby 0, 1, 2, 3, a rejestr trójkubitowy – osiem liczb 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7. Ogólnie, rejestr N-kubitowy przechowuje  $2^N$  liczb. Ponadto, liczenie na superpozycjach przed pomiarami daje możliwość liczenia równoległego: jeden krok kwantowy działa na całym rejestrze, czyli nawet działania na jednym lub kilku kubitach rejestru (typu  $U_1, U_2, U_3, U_4$  na rys. 1) spowodują zmianę wszystkich liczb zapisanych w danym rejestrze. Zgod-

działaniem na odległość”, gdyż wynika z nielokalności mechaniki kwantowej. Einstein razem ze swoimi młodszymi współpracownikami, Borysem Podolskim i Nathanem Rosenem, wykorzystał to w 1935 roku jako argument przeciwko interpretacji szkoły kopenhaskiej (na czele której stał Niels Bohr). Rozważmy przykład ze słynnym kotem Schrödingera. Zgodnie z zasadą superpozycji złożony układ atom+kot może znajdować się w stanie opisanym

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \left| \begin{array}{c} \bullet \\ \text{---} \end{array} \right\rangle, \text{ kot żywy} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} \text{---} \\ \bullet \end{array} \right\rangle, \text{ kot martwy} \right\rangle$$

nie z kolejnym postulatem mechaniki kwantowej takie działania są unitarne i co ważniejsze, takie bramki kwantowe są odwracalne, co prowadzi do tego, że wydzielenie ciepła w wyniku wymazania informacji, czyli bitów, nie miałyby miejsca (twierdzenie Landauera). Jeden procesor N-kubitowy jest równoważny  $2^N$  równoległym procesorom klasycznym, czyli rozwiązuje dany problem w czasie zbliżonym do czasu liczenia tylu równoległych procesorów klasycznych.

Układ złożony z dwóch lub większej liczby podukładów ma jeszcze ważną własność, mianowicie jego podukłady mają korelacje kwantowe, które istnieją nawet wtedy, kiedy te podukłady znajdują się bardzo daleko od siebie, czyli gdy nie istnieją praktycznie żadne powiązania w sensie klasycznym. Albert Einstein nazwał to „widmowym

równaniem:

Wyobraźmy sobie teraz, że dwie osoby, np. Alice i Bob, mają układ przygotowany w takim stanie. Pewnego razu Bob podróżuje bardzo daleko, np. do sąsiedniej galaktyki, zabierając ze sobą kota i zostawiając Alice na Ziemi z atomem. Pewnego dnia Alice dokonuje obserwacji w swoim laboratorium. Otrzymuje dwa możliwe wyniki z równym prawdopodobieństwem: atom rozpada się lub nie. Gdy wynikiem jej obserwacji jest rozpad atomu, wie, że w tej samej chwili u Boba kot nie żyje, a kiedy jej atom nie uległ rozpadowi, kot żyje. Schrödinger w liście do Einsteina określił to „widmowe działanie na odległość”, podobne do korelacji między dwoma cząstkami jak w eksperymencie EPR, splątaniem (po niemiecku *verschränkung*). Zgodność obu uczonych w krytyce nad mechaniką

kwantową skomentował Niels Bohr w marcu 1936 roku jako fakt „bulwersujący”, który można uznać za „zdradę stanu”. Doświadczenia wykonane w 1982 roku przez Alaina Aspecta i jego współpracowników pokazały, że teoria kwantowa w interpretacji kopenhaskiej jest słuszna, a krytyka Einsteina i innych błędna. Mówiąc matematycznie, w przestrzeni Hilberta stanów układu złożonego będącej iloczynem tensorowym przestrzeni stanów podukładów istnieją takie wektory stanu, które nie mogą być przedstawione jako iloczyn tensorowy wektorów poszczególnych podukładów. Zatem we wcześniejszym przykładzie mamy

$$|\Psi\rangle \neq |\Psi_{atom}\rangle \otimes |\Psi_{kot}\rangle$$

Nielokalne splątanie stanowi jeden z głównych zasobów informatyki kwantowej. Służy ono np. do teleportacji stanów kwantowych. Pary splątanych cząstek (atomów czy fotonów) zwane parami EPR, stają się ważnymi elementami różnych algorytmów (protokołów) kwantowych. Wydawałoby się, że dzięki splątaniu można stworzyć system natychmiastowego przekazu informacji. Jednak, jak wynika z przykładu podanego wcześniej, Bob mógłby być przekonany bez obserwacji, czy jego kot jest żywy, czy martwy tylko wtedy, gdyby Alice przez konwencjonalne kanały, jak telefon czy internet, przekazywała mu informacje o wyniku swoich obserwacji, tak więc granica prędkości światła jest nadal zachowana. Tak samo byłoby w teleportacji, gdy bez informacji uzyskanych od Alice drogą konwencjonalną, Bob nie byłby w stanie przerobić stanu swojej cząstki z par EPR, tak aby uzyskać stan wyjściowego kubitu. Zatem dwa filary fizyki współczesnej (teoria kwantowa i teoria względności) znowu mogą „współlistnieć”. Teorią je łączącą jest kwantowa teoria pola, która z sukcesem opisuje wszelkie zjawiska w przyrodzie.

Pod względem matematycznym liczenie kwantowe jest w zasadzie bardzo proste. Odbywa się ono w przestrzeniach Hilberta o skończonych wymiarach, tak, że wektory (rejstry) i operatory liniowe (bramki) są wyrażone odpowiednio przez kolumny i macierze. Znikają wszelkie trudności związane z nieskończonością.

Wydawałoby się, że wadą komputerów kwantowych może być przypadkowe odczytywanie wyników przez pomiary dokonane na stanie końcowym jak na rys. 1. Na szczęście, ilość możliwych

## „... Jesteśmy głęboko przekonani, że za kilkanaście lat będziemy mieli już pierwsze komputery kwantowe, które zmieniają całkowicie oblicze naszej cywilizacji”

wyników jest skończona i można sprawdzić szybkimi algorytmami, który z nich jest właściwy, jak w przypadku wspomnianego algorytmu Shora - mnożenie dwóch uzyskanych liczb pierwszych jest zadaniem bardzo łatwym, niebotycznie łatwiejszym niż rozłożenie danej liczby na dwa czynniki pierwsze.

Natomiast trudność w budowie komputerów kwantowych leży głównie w sprzeczności wymagań, jakie są stawiane dla liczenia kwantowego. Mianowicie, komputery te muszą być izolowane od otoczenia, aby zachować swoje potrzebne koherencyjne własności, czyli superpozycje stanów, które są bardzo delikatne i kruche. Otoczenie nieustannie mierzy i je niszczy. Wyciek informacji na zewnątrz układu kwantowego nazywamy dekoherencją. Jest to główna przyczyna występowania dziwnych kwantowych zachowań w życiu codziennym. Jednocześnie kubity muszą być gotowe do manipulacji (ewolucji) i szczytowania (pomiarów). Zadaniem konstruktorów komputerów kwantowych jest znalezienie „złotego środka”, który spowoduje, że dekoherencja będzie działać pozytywnie, to znaczy spowoduje redukcję (kolaps) potężnej superpozycji stanów

komputera kwantowego, wraz z jej subtelnymi własnościami interferencyjnymi, do pojedynczego stanu reprezentującego właściwą odpowiedź.

W dążeniu do tego celu ostatnio osiągnięto niebywałe wyniki w manipulacji pojedynczymi układami kwantowymi, które były nagrodzone kilkoma Nagrodami Nobla: Claude Cohen Tanoudji, Steven Chu, Williams Phillips (1997), Eric Cornell, Wolfgang Ketterle, Carl Wieman (2001), Roy Glauber (2005) i wreszcie Serge Haroche, David Wineland (2012). Również w tym roku nominację do tej nagrody uzyskała teleportacja. Można przewidzieć, że prędzej czy później, uzyska ona tę prestiżową nagrodę.

Sytuację w informatyce kwantowej można porównać z sytuacją energii atomowej w latach trzydziestych ubiegłego stulecia. Jesteśmy głęboko przekonani, że tak jak w energetyce jądrowej, za kilkanaście lat będziemy mieli już pierwsze komputery kwantowe, które zmieniają całkowicie oblicze naszej cywilizacji.

**Profesor Cao Long Van** urodził się 15 października 1952 r. w Hanoi, w Wietnamie. Ukończył studia na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, uzyskując tytuł magistra Fizyki Teoretycznej pod kierunkiem prof. Iwo Białynickiego-Biruli. Tam również pod jego kierunkiem uzyskał stopień doktora nauk fizycznych w 1980 roku. Habilitował się w Zakładzie Fizyki Teoretycznej (obecnie Centrum Fizyki Teoretycznej) Polskiej Akademii Nauk w 1987 roku. Obecnie jest profesorem w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Zielonogórskiego. Był Prodziekanem Wydziału Fizyki i Astronomii UZ w latach 2008-2012. Jego zainteresowania naukowe dotyczą optyki kwantowej i nieliniowej, jest autorem ponad 100 doniesień i artykułów naukowych z tych dziedzin.

## PRZYCZYNOWOŚĆ ZJAWISK NIELOKALNYCH

Dokładnie 100 lat temu Albert Einstein przedstawił światu ogólną teorię względności, ukazując zaskakujące, głębokie związki między grawitacją, czasem i przestrzenią oraz rewolucjonizując nasze spojrzenie na Wszechświat. Niedawna bezpośrednia detekcja fal grawitacyjnych przez eksperyment LIGO w spektakularny sposób potwierdziła kolejne przewidywania tej teorii. Zachwyt fizyków nad teorią Einsteina nie bierze się jednak wyłącznie z jej zadziwiającej mocy predykcyjnej – chodzi również o względy estetyczne. Ogólna teoria względności jest piękna od strony matematycznej.

### Geometria czasoprzestrzeni

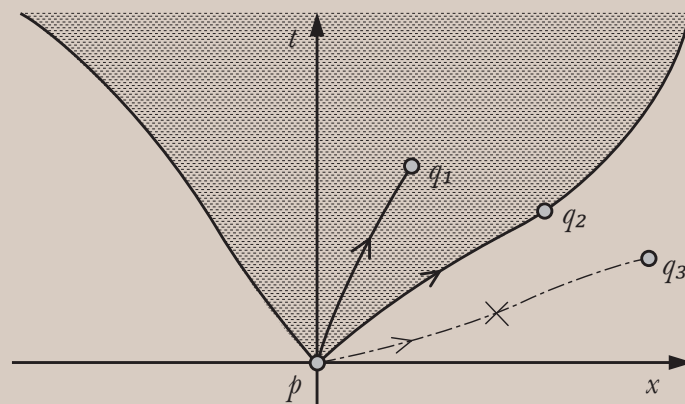
Działem matematyki, na którym opiera się formalizm teorii Einsteina, jest geometria lorentzowska. Choć jako abstrakcyjna teoria matematyczna pojawiła się na kilkanaście lat przed pierwszą, szczególną wersją teorii względności, to zrosła się z tą ostatnią tak ściśle, że prawie cała jej terminologia jest zaczerpnięta z fizyki relatywistycznej.

I tak, z matematycznego punktu widzenia czasoprzestrzeń  $M$  jest 4-wymiarowym obiektem geometrycznym zwanym rozmaitością lorentzowską. Stanowi ona arenę, na której rozgrywają się wszelkie zjawiska fizyczne zarówno w trzech wymiarach przestrzennych, jak i w pojedynczym wymiarze czasowym. Poszczególne punkty  $M$  nazywa się sugestywnie zdarzeniami. Może to prowadzić do nieporozumień, ponieważ potocznie rozumiane zdarzenie jest czymś dziejącym się w określonym miejscu i czasie, czyli w określonym punkcie czasoprzestrzeni, ale nie jest samym tym punktem. Dalej będę rozumieć zdarzenie właśnie w potoczny sposób, odróżniając je od punktu  $M$ , w którym owo zdarzenie następuje. Za proste przykłady tak rozumianych zdarzeń niech posłużą: emisja oraz absorpcja cząstki.

A jak w  $M$  jest reprezentowana sama cząstka? Chwila namysłu pozwala stwierdzić, że musimy w tym celu posłużyć się krzywą, niejako zbudowaną z obrazów tej cząstki we wszystkich chwilach jej istnienia, od emisji aż do absorpcji lub rozpadu. Krzywa ta, nazywana linią świata rozważanej cząstki, odzwierciedla, jak ta ostatnia się porusza. Przykładowo, jeśli w jakimś układzie odniesienia cząstka spoczywa, jej linia świata jest w tym układzie

równoległa do osi czasu. Z kolei jeśli się w tym układzie porusza, jej linia świata będzie odchyłona od kierunku osi czasu o kąt tym większy, im większa jest prędkość cząstki.

Czy dowolna krzywa, jaką poprowadzimy w czasoprzestrzeni, może stanowić linię świata jakiejś cząstki? Oczywiście nie! Jedną z fundamentalnych zasad teorii względności głosi, iż nic nie może poruszać się szybciej od pewnej granicznej prędkości  $c$ , równej prędkości światła w próżni (299792458 m/s). W każdym układzie odniesienia istnieje zatem maksymalny dopuszczalny kąt odchylenia linii świata od osi czasu. W podręcznikach zwyczajowo skaluje się osie tak, by kąt ten wynosił 45 stopni, aczkolwiek ze względu na to, że czasoprzestrzeń może być silnie zakrzywiona, wartość tego kąta może się zmieniać w miarę, jak oddalamy się od początku wybranego układu odniesienia (rys. 1.).



↑ Rys. 1. Zaznaczony na szaro obszar czasoprzestrzeni zawiera te punkty, do których da się dotrzeć z punktu  $p$  wzdłuż krzywej przyczynowej (obszar ten nazywa się przyszością punktu  $p$ ) Takimi punktami są na przykład  $q_1$  oraz  $q_2$ , ale już nie  $q_3$ . Oś  $x$  reprezentuje tu jeden z wymiarów przestrzennych (dwa pozostałe pominięto), natomiast oś  $t$  - wymiar czasowy.

### Teoria przyczynowości

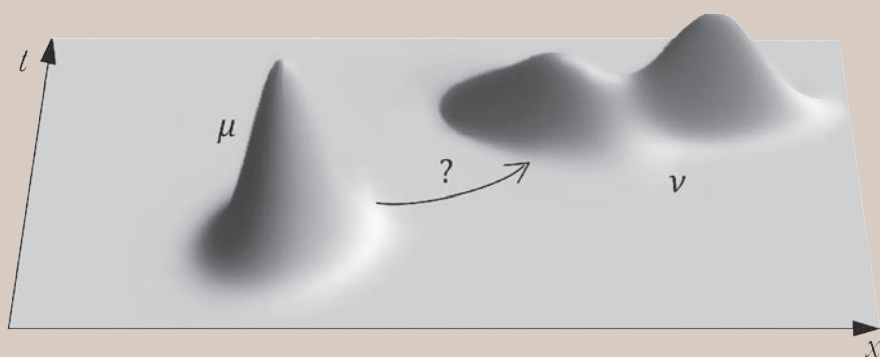
Wspomniane bezwzględne ograniczenie prędkości dotyczy nie tylko ruchu cząstek, ale także rozchodzenia się oddziaływań oraz dowolnych związków przyczynowo-skutkowych.

Rozważmy następujący przykład. Odległość Ziemia-Słońce wynosi 150 mln km. Gdyby Słońce eksplodowało w chwili, gdy czytasz te słowa, spokojnie zdążyłbyś jeszcze przeczytać ten artykuł do końca, albowiem pierwsze oznaki tego, że z naszą dzienną gwiazdą stało się coś złego, dotarłyby do nas dopiero po 8 minutach i 19 sekundach. Innymi słowy, zdarzenie pod nazwą „eksplozja

Słońca” nie mogłoby stanowić przyczyny zdarzenia pod nazwą „skończyłeś czytać ten artykuł”.

Podkreślmy, że brak związku przyczynowo-skutkowego między powyższymi zdarzeniami wynikał wyłącznie z ich wzajemnego umiejscowienia w czasoprzestrzeni. Jakie zatem pary punktów  $p, q$  czasoprzestrzeni  $M$  dopuszczają takie związki?

Odpowiedź: jeśli tylko  $p$  daje się połączyć z  $q$  linią świata jakiejś cząstki, to zdarzenie zachodzące w  $p$  może stanowić przyczynę zdarzenia zachodzącego w  $q$ . Mówimy, że punkt  $p$  przyczynowo poprzedza  $q$ , co zapisujemy jako  $p \leq q$ . Trzeba podkreślić, że ów związek przyczynowy nie musi wcale polegać na emisji i późniejszej absorpcji jakiejś rzeczywistej cząstki. Chodzi o to, że między  $p$  a  $q$  w zasadzie może nastąpić „przesył informacji”, który nigdy nie przekraczałby granicznej prędkości  $c$ .



↑ Rys. 2. Jak zdefiniować relację poprzedzania przyczynowego między rozkładami  $\mu$  i  $\nu$ ?

pod wpływem prac M. Ecksteina (UJ) i N. Franco (Univ. Namur) [3,4].

### Zdarzenia nielokalne

Moje badania biorą początek z pewnego dość zasadniczego problemu z pojęciem punktowego zdarzenia. Jest ono mianowicie idealizacją, całkowicie niedostępną empirycznie, i to z kilku powodów. Po pierwsze (i zgoła banalne), urządzenia pomiarowe mają skończoną rozdzielczość, toteż nigdy nie da się dokładnie wyznaczyć miejsca i czasu badanych zdarzeń. Po drugie, uczeni spostrzegli [1], że coraz dokładniejsze określanie, gdzie i kiedy zaszło jakieś zdarzenie, wiąże się z używaniem sygnałów o coraz większej energii, skupianej w coraz mniejszym obszarze. To jednak w końcu musi doprowadzić do wytworzenia małej czarnej dziury, pod której horyzontem zdarzeń przepada interesująca nas informacja. Po trzecie wreszcie, mechanika kwantowa uczy, że fizyczne obiekty i zdarzenia są immanentnie nielocalne; w przyrodzie po prostu nie istnieje coś takiego jak punktowa cząstka czy punktowe zdarzenie.

Na szczęście, zarówno fizyka klasyczna jak i kwantowa posługują się obiektami matematycznymi zdolnymi modelować takie nielocalne, rozciągnięte byty. Należą do nich rozkłady probabilistyczne, nazywane też przez matematyków miarami probabilistycznymi. Takie „zdarzenie-rozkład” możemy sobie wyobrażać jako „chmurę” rozciągniętą nad  $M$ , gdzie indziej gęstsza, a gdzie indziej rzadsza lub całkowicie nieobecna.

Taka nielocalna natura zdarzeń sprawia oczywiście trudności interpretacyjne, analogiczne do tych w mechanice kwantowej. Tu jednak skupię się na kwestii przyczynowości. Konkretnie pytanie brzmi: zastępując zdarzenia punktowe „zdarzeniami-rozkładami”, jak opisać związki przyczynowe między nimi? Innymi słowy, czy relację  $\leq$ , standardowo definiowaną między punktami czasoprzestrzeni  $M$ , da się rozszerzyć na

rozkłady probabilistyczne na  $M$  w matematycznie rygorystyczny sposób? Tym właśnie zagadnieniem zajęliśmy się wspólnie z M. Ecksteinem.

### Od przenoszenia piachu do przyczynowości i kwantów

Spójrzmy na rys. 2, na którym przedstawiono dwa rozkłady prawdopodobieństwa na  $M$ , oznaczone przez  $\mu$  oraz  $\nu$ . Chcąc zastosować do nich standardową definicję relacji  $\leq$ , mielibyśmy problem, bo co by właściwie miało znaczyć, że „dwa rozkłady są połączone krzywą przyczynową”? Należałoby tu raczej szukać całej rodziny krzywych przyczynowych, wzdłuż których  $\mu$  mógłby „przepłynąć” do  $\nu$ . Jakim obiektem matematycznym można by jednak opisać owo „przepływanie” rozkładu?

Pomoc nadeszła z niespodziewanej strony. W toku badań i wertowania literatury odkryliśmy, że takie obiekty od wielu lat są wykorzystywane w teorii optymalnego transportu. Teoria ta wzięła swój początek od bardzo prozaicznej kwestii. Oto na placu budowy znajduje się hałda piachu o zadanym kształcie oraz doły, które chcemy tym piachem zasypać. Z przenoszeniem każdej porcji piachu w inne miejsce związany jest pewien koszt. Jak znaleźć taki sposób przeniesienia piachu do dołów, by całkowity koszt był minimalny?

Rzecz jasna, teoria optymalnego transportu daje się stosować nie tylko do robót ziemnych – znajduje zastosowanie od ekonomii po przetwarzanie obrazów. Jak jednak łączy się ona z przyczynowością między rozkładami probabilistycznymi na czasoprzestrzeni?

Uproszczony obraz jest następujący. Wyobraźmy sobie, że rozkład  $\mu$  opisuje wyjściowy kształt hałdy piachu, a rozkład  $\nu$  opisuje rozlokowanie i kształt dołów. Umawiamy się teraz, że poszczególne porcje piachu można przenosić tylko wzdłuż krzywych przyczynowych. Innymi słowy, umawiamy się, że koszt przenoszenia piachu między punktami

związanymi przyczynowo jest zerowy, natomiast próba transportu piachu wzdłuż krzywej innej niż przyczynowa wiązałaby się z nieskończonym kosztem.

Przetłumaczenie naszego problemu na język teorii optymalnego transportu było strzałem w dziesiątkę. Teoria ta dostarcza bowiem potężnych twierdzeń, które orzekają, kiedy (przy narzuconych przez nas warunkach kosztowych) transport piachu do dołów jest możliwy, czyli kiedy  $\mu$  przyczynowo poprzedza  $\nu$ . Pozwoliło to ostatecznie stworzyć zrzęby „teorii przyczynowości zjawisk nielokalnych”, które przedstawiliśmy w pracy [2].

Zagadnieniem, w którym próbujemy obecnie wykorzystać zaproponowany przez nas formalizm, jest przyczynowość w teoriach kwantowych. Powszechnie uważa się, że również w świecie kwantów obowiązuje einsteinowskie ograniczenie prędkości na przesył informacji. Obecny stan wiedzy jest tu jednak mocno niepełny – między innymi właśnie dlatego, że brakuje matematycznie rygorystycznego ujęcia relacji przyczynowej między obiektami nielokalnymi.

Jest za wcześnie, by zgadywać, czy „nasze” rozszerzenie teorii przyczynowości przerzuci nowe mosty między fizyką relatywistyczną i kwantową. Jedno jest wszakże pewne: mimo upływu stu lat, genialna teoria Einsteina jeszcze długo nie przestanie inspirować fizyków i matematyków.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] S. Doplicher, K. Fredenhagen, J.E. Roberts. *Spacetime quantization induced by classical gravity*, Phys Lett B, 331(1-2):39-44, 1994.
- [2] M. Eckstein, T. Miller, *Causality for nonlocal phenomena*, arXiv:1510.06386.
- [3] N. Franco, M. Eckstein. *An algebraic formulation of causality for noncommutative geometry*, Classical Quant Grav, 30(13):135007, 2013.
- [4] N. Franco, M. Eckstein, *Causality in noncommutative two-sheeted space-times*, J Geom Phys, 96:42-58, 2015.

{ Mgr inż. Tomasz Miller ukończył fizykę techniczną na Wydziale Fizyki PW oraz matematykę na Wydziale Matematyki i Nauk Informacyjnych PW, gdzie obecnie jest doktorantem. Współpracuje z Centrum Kopernika Badań Interdyscyplinarnych w Krakowie. }



## NOWY INTERFEJS: ZAGADNIENIA ROZSZERZONEJ RZECZYWISTOŚCI WE WSPÓŁCZESNEJ PRAKTYCE ARCHITEKTONICZNEJ

W opinii autora tradycyjny sposób komunikacji pomiędzy użytkownikiem a komputerem oparty na myszy i klawiaturze jest nieefektywny dla procesów kształtowania form przestrzennych, w tym architektonicznych. W artykule przedstawiono propozycje alternatywnych rozwiązań dla interakcji na linii architekt – oprogramowanie CAD; rozwiązań, które pozwalałyby na bardziej intuicyjną wymianę informacji. Autor wysuwa hipotezę, że technologia rozszerzonej rzeczywistości (*Augmented Reality* – AR) może stanowić szansę na zmianę skostniałego dzisiaj podejścia do tych zagadnień.

Rozszerzona rzeczywistość to system łączący w sobie świat realny oraz rzeczywistość wirtualną, która jest interaktywna w czasie rzeczywistym i umożliwia swobodę ruchów w trzech wymiarach (Azuma 1997). Współcześnie przez AR rozumie się interfejsy wykorzystujące renderowanie zawartości cyfrowej za pośrednictwem urządzeń mobilnych (telefony, tablety) lub urządzeń HMD (*Head-Mounted Devices*). Technologia ta wykorzystuje kamerę urządzenia oraz tzw. znaczniki (elementy przestrzeni rzeczywistej, takie jak

obiekty trójwymiarowe czy płaskie obrazy) do rozpoznawania konfiguracji przestrzennej (perspektywa, kąt patrzenia, oświetlenie). Na tej podstawie pozwala wyświetlać na ekranie zawartość cyfrową, taką jak obrazy, filmy, modele cyfrowe. Innym podejściem jest wykorzystanie danych GPS i wbudowanego żyroskopu w celu znalezienia pozycji użytkownika w przestrzeni oraz wyświetlenia rozszerzenia (Zarzycki 2014).

Technologia ta – początkowo stosowana w aplikacjach wojskowych – z czasem znalazła zastosowanie w innych dziedzinach: medycynie, przemyśle, wreszcie w rozrywce (gry komputerowe) i reklamie (ulotki i plakaty rozszerzane o dodatkową informację). Po rozszerzoną rzeczywistość coraz częściej sięgają również architekci – do trójwymiarowej wizualizacji projektów, czy też jako narzędzie służące do wirtualnej rekonstrukcji nieistniejących obiektów w rzeczywistym kontekście, jak w projekcie Colonia 3D (Trapp 2012).

W niniejszym tekście prezentowane są aplikacje opracowane przez autora, które mają na celu połączenie technologii AR z technikami prezentacji architektonicznej, modelowania

form swobodnych oraz projektowania urbanistycznego.

**AR w prezentacji architektonicznej**  
Pierwszym przykładem jest aplikacja wykorzystana w ramach zajęć z modelowania komputerowego prowadzonego na Wydziale Architektury Politechniki Warszawskiej, służąca do prezentacji obiektów architektonicznych. Przedmiotem kursu jest tworzenie modeli historycznych i współczesnych projektów, które miały istotny wkład w rozwój architektury domów jednorodzinnych. Na koniec procesu modelowania studenci przygotowują prezentacje swoich prac w postaci wydrukowanych plansz, które często są niewystarczające, żeby skutecznie zaprezentować pracę opartą na modelu cyfrowym wzbogaconym dodatkowymi mediami. Dzięki technologii AR plansza może być jednak rozszerzona za pomocą tekstu, obrazu, dźwięku, wideo lub dodatkowego modelu cyfrowego (Gajewski 2001).

(25)



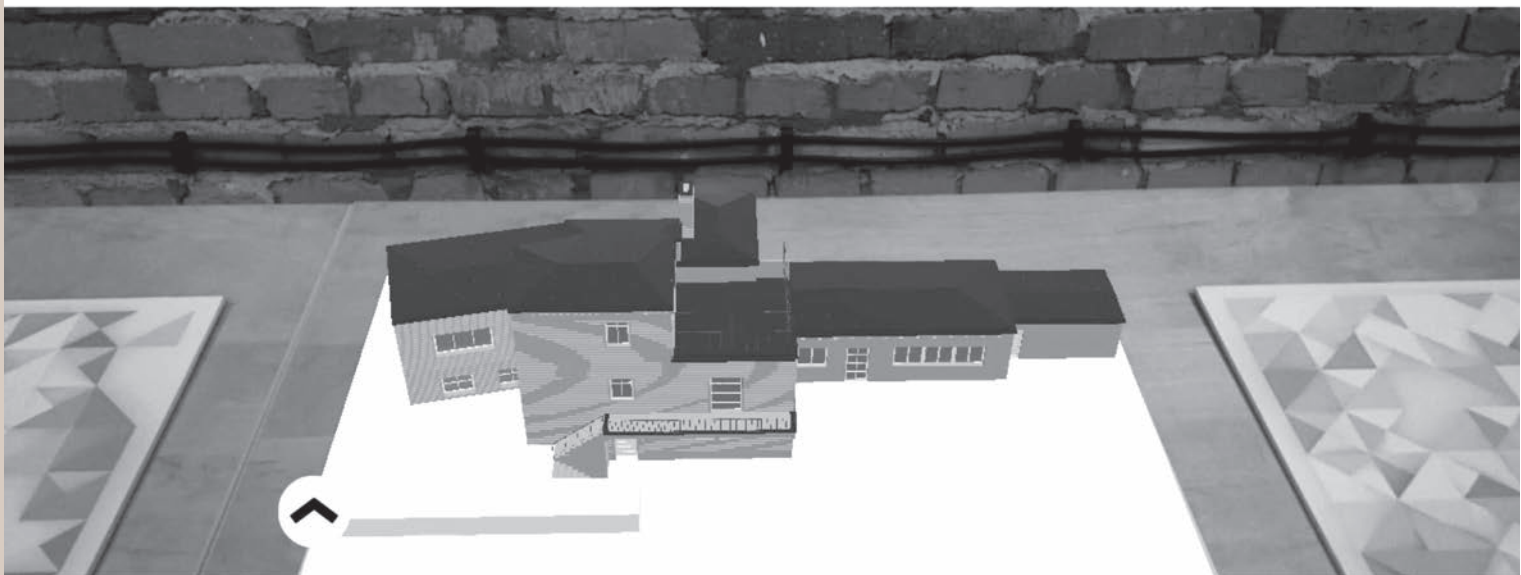
↓ Fot.1. Interfejs autorskiej aplikacji służącej do oglądania modeli studenckich wzbogaconych o interakcję



MODELOWANIE KOMPUTEROWE  
SEM II R.A. 2014/2015

JAN SŁYK  
JACEK MARKUSIEWICZ  
PAWEŁ PRZYBYŁOWICZ

APLIKACJA  
JACEK MARKUSIEWICZ



AUTORZY M. PORCZYŃSKI / A. TRZCIŃSKA / F. ZIENTEK

Romuald Gutt - Dom własny / 1928.  
Dotknij budynku, żeby zobaczyć jego rozbiór funkcjonalny.

Tekst dostępny za pośrednictwem aplikacji AR może dostarczyć użytkownikowi dodatkowych informacji lub jako hipertekst umożliwić dostęp do zasobów zewnętrznych, takich jak strona internetowa zawierająca dane na temat modelowanego obiektu. Obraz zapewnia lepsze zrozumienie budynku poprzez np. ukazanie historycznego kontekstu. Dźwięk jest często używany w celu zaangażowania innych zmysłów odbiorcy. Filmy łączą w sobie charakterystykę obrazu i dźwięku i są przydatne do prezentacji pracy poprzez animację lub zapis symulacji zachowania elementów kinetycznych. Interaktywny model dostępny przy użyciu rozszerzonej rzeczywistości pozwala na swobodne i intuicyjne oglądanie budynku z dowolnej perspektywy. Umożliwia też rekonfigurację oglądanego obiektu przez włączanie i wyłączanie poszczególnych warstw, takich jak elementy architektoniczne (ściany zewnętrzne, dach) lub elementy organizacji (piętra, funkcje).

Na wczesnym etapie wdrażania technologii AR podczas kursu zostały użyte darmowe, proste w obsłudze narzędzia, które w czasach zastąpiono spersonalizowaną aplikacją w celu zapewnienia większej elastyczności programowania oraz niezależnienia się od oprogramowania firm trzecich. Aplikacja została stworzona przez autora za pośrednictwem platformy do tworzenia gier komputerowych Unity 3d z rozszerzeniem Vuforia ułatwiającą implementację rozszerzonej rzeczywistości. Modele cyfrowe przygotowane przez studentów są importowane do projektu Unity i przypisywane do odpowiednich trackerów. Interakcja jest definiowana w języku programowania C#. Platforma zapewnia silnik renderowania w czasie rzeczywistym i umożliwia też kompilację oprogramowania dedykowanego dla wybranej platformy (Markusiewicz i Słyk 2015).

Aplikacja zapewnia studentom i odbiorcom intuicyjną interakcję za pośrednictwem ekranu dotykowego i upraszcza przeglądanie modelu, dając im bezpośrednią kontrolę nad wirtualną kamerą. Tego typu interfejs wydaje się zwiększać efektywność komunikatu w porównaniu ze standardowymi technikami.

#### Modelowanie form swobodnych

Komputerowe odwzorowanie przestrzeni opierające się na matematycznym opisie abstrakcyjnych brył

geometrycznych jest tylko jedną z koncepcji cyfrowego przedstawienia rzeczywistości. Uproszczenie form architektonicznych i przedmiotów codziennego użytku do prostych figur (monitor – płaski prostopadłościan; dach – graniastosłup o trójkątnej podstawie; blat stolika kawowego – walec) ułatwia ich zrozumienie i opis, ale mocno ogranicza stopień dokładności reprezentacji obiektu poprzez pominięcie niewielkich różnic i niedoskona-

przenosić proste informacje (przezroczystość) lub bardziej złożone (kolor, właściwości fizyczne). Sprawia to, że woksele mogą posłużyć do opisu złożonych organizacji przestrzennych i zjawisk fizycznych. Przy obecnym zaawansowaniu powszechnie dostępnych komputerów zarządzanie tak dużymi zestawami danych wydaje się jeszcze dużym wyzwaniem. Jednak historia rozwoju grafiki rastrowej (opartej na pikselach), a w szczegól-



↑ Fot.2. Zdjęcie pokazujące sposób pracy z narzędziem City-AR

łości. Zamiast określać figury geometryczne (punkty, linie, powierzchnie) przestrzeń można podzielić na nieskończoną ilość sześcianów i każdemu z nich nadać inną właściwość. W najprostszej konfiguracji można przypisać mu wartość zerojedynkową – sześcian jest wypełniony materiałem lub nie – określając w ten sposób pustkę i wypełnienie w dowolnym wycinku przestrzeni. Taki sześcian jako podstawowa jednostka reprezentacji przestrzeni nazywa się wokselem (ang. *volume element* – element przestrzeni) (Foley et al. 1995).

Woksel jest próbką przestrzeni – punktem rozszerzonym o dane. Może

ności fotografii cyfrowej, pokazuje, jak szybko urządzenia zostały dostosowane do zoptymalizowanego tworzenia i wyświetlania obrazów w rozdzielczościach przekraczających dostrzeżenie składowych elementów za pomocą ludzkiego oka. Można zatem przewidzieć, że wraz z postępem technologicznym użytkownicy dostaną możliwość zarządzania siatkami przestrzennymi opisującymi relatywnie duże obszary w rozdzielczościach zapewniających naturalne postrzeganie obiektów trójwymiarowych.

Operacje na przestrzeni wokselowej to podstawa działania programu o bocznej nazwie AR-Craft.: programu

służącego do modelowania form swobodnych przy wykorzystaniu teorii wokseli. Program jest narzędziem, w którym użytkownik generuje formy przestrzenne w skali 1:1. Interfejsem programu jest urządzenie mobilne (telefon, tablet) mające rolę dwojaką: z jednej strony jest wirtualną kamerą pozwalającą na nawigację trójwymiarową wokół użytkownika; z drugiej – jest wirtualnym narzędziem (trójwymiarowym pędzlem lub dłutem) służącym do dodawania lub usuwania wokseli w przestrzeni. Przestrzenią roboczą jest otoczenie użytkownika skanowane za pośrednictwem kamery urządzenia.

Swobodna nawigacja zapewniona przez technologię rozszerzonej rzeczywistości pozwala na oglądanie modelu wirtualnego w sposób zbliżony do oglądania fizycznych elementów w przestrzeni rzeczywistej. Użytkownik może poruszać się po przestrzeni roboczej i oglądać zachodzące w niej zmiany przez ekran urządzenia mobilnego.

#### Projektowanie urbanistyczne w AR

City-AR to aplikacja (opracowanie: Jacek Markusiewicz, Łukasz Piątek) służąca do projektowania urbanistycznego, wykorzystująca rozszerzoną rzeczywistość. Praca polega na układaniu fizycznych elementów graficznych reprezentujących elementy zabudowy miejskiej (kwartał zabudowy mieszkaniowej, park miejski, supermarket) oraz odczytywaniu informacji zwrotnej w postaci cyfrowego modelu rozszerzającego o elementy widziane za pośrednictwem urządzenia mobilnego. Ten model ulega zmianie w zależności od otoczenia każdego z elementów i dostępności usług. Program pozwala na śledzenie zmian w czasie rzeczywistym przy jednoczesnym zachowaniu intuicyjnego sposobu pracy nad projektem znanego z interakcji z makietą fizyczną.

Model kwartału zabudowy mieszkaniowej jest modelem parametrycznym i jest sumą modeli cząstkowych zabudowy o różnej skali: od najmniejszego domu jednorodzinnego do wysokiej zabudowy mieszkaniowej wielorodzinnej. Tylko jeden model cząstkowy wyświetlany jest na jednym kwartale, a wybór skali zależy od otoczenia tego kwartału. Im większa liczba sąsiadów i im mniejsza odległość między kwartałem i parkiem, tym większe prawdopodobieństwo powiększenia skali zabudowy. Dodatkowo, warunkiem koniecznym do powstania zabudowy

danej skali jest ustalona dla każdej skali maksymalna odległość od supermarketu. Odległość ta zmniejsza się wraz ze wzrostem skali. Planowane jest także wprowadzenie warunku ilości supermarketów dla dużych skupisk zabudowy wielorodzinnej, rodzaju transportu, możliwość użycia innych funkcji, ustalenie bardziej złożonych zależności między funkcjami, wpływ istnienia funkcji na zużycie zasobów, pozyskiwanie zasobów itd.

#### Podsumowanie

W opinii autora, w systemach wspomagania projektowania architektonicznego, najwięcej pozostaje do zrobienia w obszarze sprzętowych aspektów interakcji człowiek-komputer. Pozostaje on mocno niedoinwestowany na tle rozwiniętych rozwiązań wspomagających numeryczny zapis i edycję form przestrzennych. Sposób, w jaki użytkownik edytuje i przegląda zawartość trójwymiarową za pomocą myszy, klawiatury i ekranu, choć efektywny przy pracy z elementami dwuwymiarowymi (jak obraz lub tekst), jest niedostosowany do potrzeb użytkowników pracujących z elementami trójwymiarowymi. Skuteczność i intuicyjność tych elementów interakcji mogą i powinny zostać poprawione.

Jan Słyk dopatruje się problemu w zjawisku podwójnej projekcji przestrzeni trójwymiarowej na płaszczyznę: projektant sprowadza swoje intencje, powstałe dzięki wyobraźni przestrzennej, do dwuwymiarowych ruchów myszą a trójwymiarowe operacje oraz analizy wykonane przez program CAD wyświetlane są na płaskim ekranie komputera (Słyk 2012). Manipulacje obiektami w świecie rzeczywistym są intuicyjnymi operacjami, takimi jak patrzenie na obiekt z różnych odległości, obracanie głowy. Przełożenie tych operacji na nawigację w programie komputerowym za pomocą myszy skutkuje serią złożonych matematycznych przekształceń,

które muszą być wykonane przez użytkownika.

Rzeczywistość rozszerzona wydaje się przynajmniej częściowo rozwiązywać problemy nawigacyjne, jako że manipulacja urządzeniem przenośnym ma bezpośrednie przełożenie na transformację kamery wirtualnej, dzięki czemu eliminowane jest przesunięcie uwagi użytkownika w kierunku rozwiązywania problemów z narzędziem. Aplikacje AR – dzięki wielowarstwowości i hierarchizacji danych, ich organizacji pod kątem preferencji oraz świadomości przestrzeni użytkownika – zapewniają możliwość lepszego połączenia światów wirtualnego i rzeczywistego. W porównaniu z innymi formami prezentacji mediów cyfrowych, AR ze swoją interaktywną funkcjonalnością angażuje użytkownika w sposób bardziej bezpośredni i znaczący (Zarzycki 2014).

#### BIBLIOGRAFIA

- R. Azuma, *A Survey of Augmented Reality*, Presence: Teleoperators and Virtual Environments, sierpień 1997, 355-385.
- J. Foley, A. van Dam, J. Hughes, S. Feiner, *Computer Graphics: Principles and Practice*, Boston: Addison-Wesley, 1995.
- P. Gajewski, *Zapiski myśli o przestrzeni*, Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2001.
- J. Markusiewicz, J. Słyk, *From Shaping to Information Modeling in Architectural Education: Implementation of Augmented Reality Technology in Computer-Aided Modeling*, Real Time - Proceedings of the 33rd eCAADe Conference. 2, Vienna: Vienna University of Technology, 2015, 83-90.
- J. Słyk, *Źródła architektury informacyjnej*, Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2012.
- M. Trapp, A. Semmo, R. Pokorski, C. Herrmann, J. Dollner, M. Eichhorn, *Colonia 3D - Communication of Virtual 3D Reconstructions in Public Spaces*, International Journal of Heritage in the Digital Era, marzec 2012, 45-74.
- A. Zarzycki, *Teaching and Designing for Augmented Reality*, Fusion - Proceedings of the 32nd eCAADe Conference - Volume 1, Department of Architecture and Built Environment. Newcastle upon Tyne: Faculty of Engineering and Environment, 2014, 357-364.

{ Mgr. inż. arch. Jacek Markusiewicz jest absolwentem Wydziału Architektury Politechniki Warszawskiej (WAPW) oraz Institute for Advanced Architecture of Catalonia (laaC) w Barcelonie. Specjalizuje się w dziedzinach architektury parametrycznej, programowania oraz grafiki interaktywnej. Pracował przy różnych projektach wymagających zastosowania nowych technologii w międzynarodowych biurach w Barcelonie, Warszawie i Bejrucie. Obecnie jest asystentem oraz doktorantem w Katedrze Projektowania Architektonicznego na Wydziale Architektury PW. }

## NOWOCZESNE METODY OBRÓBKI PLASTYCZNEJ MATERIAŁÓW DLA PRZEMYSŁU LOTNICZEGO

Przemysł lotniczy jest jedną z najbardziej innowacyjnych gałęzi gospodarki światowej. Ciągły postęp uwarunkowany jest niezaspokojonym zapotrzebowaniem na materiały lekkie o wysokiej wytrzymałości - niezawodne w ekstremalnych warunkach pracy. Nie można przy tym zapomnieć o silnej konkurencji na rynku. Na całym świecie trwa rywalizacja o to, kto zbuduje lżejszy, większy, szybszy, bezpieczniejszy samolot. Naukowcy z różnych dziedzin pracują zarówno nad modyfikacją już istniejących rozwiązań, jak i nad zupełnie nowymi technologiami, jednak szczególne wyzwania stoją przed inżynierią materiałową.

### Technologia - materiał - konstrukcja

Na świecie istnieje jedynie kilka firm zajmujących się produkcją samolotów. Spowodowane jest to stopniem skomplikowania konstrukcji, długim cyklem produkcyjnym oraz kosztami. Do największych zakładów produkcyjnych należą: Airbus i Boeing. Zazwyczaj za poszczególne elementy konstrukcyjne odpowiedzialni są indywidualni dostawcy, na których spoczywa ciężar wprowadzania nowych rozwiązań technologicznych. By stworzyć nowy wyrób, należy skupić się na dwóch podstawowych elementach konstrukcji - materiale oraz technologii jego wytwarzania. Dzięki połączeniu tych dwóch czynników możliwe jest uzyskanie wyrobu końcowego mającego wymagany kształt i niezbędne właściwości. W przypadku zastosowania konwencjonalnych materiałów dobór techniki kształtowania jest stosunkowo prosty. Zupełnie inaczej sytuacja wygląda w przypadku materiałów niekonwencjonalnych, o wysokich wymaganiach jakościowych, z jakimi najczęściej mamy do czynienia w zastosowaniach lotniczych. Problem jest złożony i wiąże się z koniecznością badań mających na celu optymalizację procesu. Niezbędne staje się wówczas przeprowadzenie wielu testów technologicznych wspomaganych obliczeniami komputerowymi. Wszystko po to, aby uzyskać odpowiednie właściwości materiału, ale także zagwarantować powtarzalność kształtu wyrobu. W praktyce przemysłowej konieczna jest również minimalizacja kosztów i czasu wytwarzania przy zachowaniu jak najwyższej jakości.

### Kształtowanie obrotowe

Jednym z lepiej poznanych procesów obróbki plastycznej jest konwencjonalny proces kształtowania obrotowego, znany już w średniowieczu, a na skalę przemysłową stosowany od początku XX wieku. Obecnie wykorzystywany jest podczas formowania wyrobów cienkościennych z blach o osiowoosymetrycznym kształcie. Obróbka plastyczna oparta jest na prostej koncepcji. Obracająca się rolka wywiera nacisk na blachę, w wyniku działania siły materiał odkształca się i przybiera kształt obracającego się wzornika (mandreli). Niestety proces ten ogranicza się do materiałów metalicznych o wysokiej plastyczności i niskiej wytrzymałości. Dlatego, mając na uwadze wysokie parametry wytrzymałościowe materiałów stosowanych w lotnictwie, konieczne jest wprowadzenie modyfikacji, które umożliwiłyby ich obróbkę plastyczną.

### Modyfikacje procesu

W instytucie Fraunhofera w 2001 roku powstał projekt wykorzystania grzania laserowego do procesu zgniatacia obrotowego. Wiązka lasera podgrzewa niewielki fragment powierzchni, dzięki skoordynowanemu ruchowi rolki zgniatającej możliwe jest formowanie materiału na obracającej się mandreli (rys. 1). Materiał poddany działaniu lasera nagrzewa się do wysokich temperatur, w których jego właściwości wytrzymałościowe gwałtownie spadają, co ułatwia proces formowania.

Tak zmodyfikowany proces obróbki plastycznej pozwoli na wytworzenie części do najbardziej wymagających elementów samolotu, jak turbina, która wykorzystuje przepływ gazu do wytwarzania energii mechanicznej. Panuje w niej skrajnie wysoka temperatura oraz ciśnienie powstające w wyniku spalania gazów. Znajdujące się w niej elementy pracują w ekstremalnych warunkach termicznych i wytrzymałościowych. Najmniejsze wady części mogą być przyczyną katastrofy, zatem wysoka jakość stosowanych elementów jest kluczowa. Materiały otrzymane w procesie kształtowania obrotowego wspomaganego nagrzewaniem laserowym spełniają wszystkie wyżej wspomniane wymagania, a sam proces pozwala na obniżenie kosztów małoseryjnej produkcji.

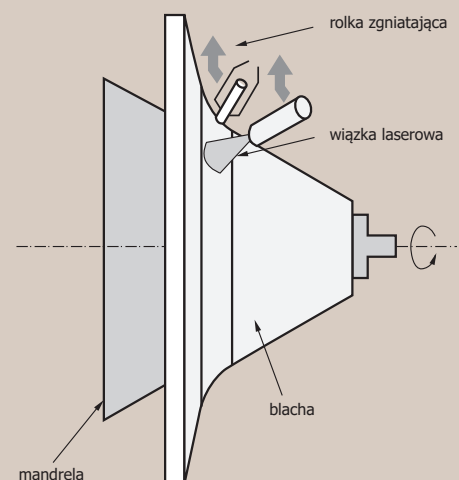
Ponadto, tego rodzaju obróbka ma wiele zalet, m.in.:

- możliwość formowania materiałów trudnoobrabialnych, takich jak stopy niklu i tytanu na gorąco;
- dobrą jakość powierzchni wyrobów o niskiej chropowatości;
- eliminacja procesów nagrzewania międzyoperacyjnego;
- korzystny rozkład naprężeń w materiale (naprężenia ścisające przy powierzchni);
- możliwość formowania skomplikowanych kształtów osiowoosymetrycznych w jednym cyklu, co znacząco zmniejsza czas i koszt.

### Wdrożenie – opracowanie wytycznych

Atuty obróbki plastycznej wspomaganą laserowo zdecydowały o projekcie z Pratt & Whitney Rzeszów, którego celem było opracowanie wytycznych technologicznych procesu kształtowania obrotowego w lotnictwie.

Opracowanie takich wytycznych jest warunkiem koniecznym wdrożenia nowego procesu technologicznego. Wiąże się z wykonaniem wielu badań i analiz. Pociąga to za sobą duże nakłady finansowe oraz długi czas wdrożenia. Dodatkowo, w przypadku nowych rozwiązań należy dostosować technologię do specyfiki zakładu produkcyjnego i charakterystyki otrzymywanych



↑ Rys. 1 Schemat działania zgniatacia obrotowego z wykorzystaniem grzania laserowego

wyrobów. W procesie tym wyjątkowo pomocne okazują się modele numeryczne i symulacje komputerowe. Pozwalają one na wizualizację zjawisk w czasie płynięcia i elastycznego sterowania parametrami procesu. Obecnie większość nowoczesnych zakładów opiera swoją produkcję na metodach numerycznych i symulacji komputerowej. Jest to o tyle praktyczne, że symulacje nie wymagają inwestycji w dodatkowy sprzęt, natomiast pozwalają na dużą kontrolę procesu i jego parametrów. Dlatego też w przyjętym projekcie położono nacisk na taką właśnie metodykę.

Podczas realizacji projektu pojawiły się liczne wyzwania wynikające z rygorystycznych norm stawianych w lotnictwie oraz trudności w obróbce materiału nadstopu niklu typu INCONEL. Przeprowadzono dokładne badania określające reakcje materiału w czasie obróbki plastycznej. Z uwagi na dodatkowe zastosowanie nagrzewania laserowego, stworzenie wytycznych technologicznych nie było proste. Obróbka plastyczna wspomaganą technikami laserowymi jest wciąż rzadko spotykana w przemyśle maszynowym i brakuje ustalonych rozwiązań w zakresie wspomaganego nagrzewania laserowym. W czasie projektu konieczne było przeprowadzenie podstawowych badań, które miały na celu sformułowanie wytycznych technologicznych. W ramach nich przeprowadzono badania wytrzymałościowe (ściskania i rozciągania) w wysokiej temperaturze służące opisowi zachowania materiału w warunkach obróbki plastycznej. Na kolejnych etapach projektu na podstawie badań określano:

- krzywe płynięcia plastycznego (krzywa umocnienia rzeczywista i technologiczna) - w celu wykonania symulacji komputerowych konieczne będą wsadowe dane materiałowe opisujące zachowanie się materiału w warunkach obróbki w zakresie temperatury 500-1000°C;
- współczynnik czułości na prędkość odkształcenia - istotne znaczenie w procesie doboru warunków obróbki będzie miało wyselekcjonowanie optymalnych wartości prędkości obrotowej i posuwu rolki, w tym celu konieczne było określenie czułości materiału na prędkość odkształcenia;
- współczynnik anizotropii blachy - podczas odkształcenia może okazać się, że materiał inaczej odkształca się w poszczególnych kierunkach, w tym celu wykonane zostały badania anizotropii blachy.



↑ Rys. 2 a) model komputerowy elementu, b) wyrób finalny uzyskany w procesie kształtowania obrotowego z nagrzewaniem laserowym

### Opracowanie wyników

Podczas symulacji określono zjawiska zachodzące na granicy: rolka zgniatająca - materiał obrabiany - wzornik. Za pomocą siłowników wykonane zostały pomiary służące do identyfikacji parametrów urządzenia i narzędzi. Równolegle przeprowadzono badania mające na celu określenie podstawowych danych, m.in. współczynnika tarcia między rolką a materiałem obrabianym przy różnych parametrach obróbki plastycznej. Z takim zestawem wyników opisujących parametry procesu i zachowanie materiału możliwe było przejście do kolejnego etapu - tworzenia modelu numerycznego. Przez wyprowadzenie odpowiednich równań zostały uzyskane przybliżone rozwiązania wpływu poszczególnych parametrów na proces. Model ten został opracowany w celu wsparcia symulacji komputerowych. Wszystkie wyniki zostały zweryfikowane doświadczalnie za pomocą metod skanowania 3D oraz badań wytrzymałościowych na elementach otrzymanych w procesie kształtowania obrotowego wspomaganego nagrzewaniem laserowym. Na rysunku 2 przedstawiony model komputerowy oraz wyrób finalny.

Przy wykorzystaniu danych eksperymentalnych oraz dostępnych prac naukowych został stworzony model komputerowy symulujący obróbkę kształtowania obrotowego wspomaganego nagrzewaniem laserowym. W tym celu wykorzystano programy Dynaform z nakładką presses oraz Impetus, korzystający z mocy obliczeniowej karty graficznej. Za pomocą modelu numerycznego określono optymalne warunki obróbki, a wyniki użyto do zaprojektowania wytycznych technologicznych procesu obróbki plastycznej. Do weryfikacji i optymalizacji modelu zastosowano następujące kryteria:

- kontrola i analiza możliwych wad wyrobu,

- określenie zgodności wymiarowej otrzymanego elementu za pomocą skanowania 3D,
- analiza sił działających na narzędzia podczas procesu kształtowania obrotowego.

Równoległe z próbami została przeprowadzona charakterystyka otrzymanych wyrobów. Wykonano następujące badania: analiza mikrostruktury za pomocą mikroskopu świetlnego oraz elektronowego, charakterystyka powierzchni elementu z użyciem profilometru oraz badania wytrzymałościowe materiału po procesie formowania. Efektem końcowym był element spełniający wszystkie wymagania przemysłu lotniczego o znacznie lepszych właściwościach użytkowych w porównaniu z wyrobami otrzymanymi w procesie konwencjonalnym - wytłaczania. Cena jednostkowa wyrobu uległa redukcji o 50% przy jednoczesnym wzroście wytrzymałości o ponad 30%.

*Projekt oraz badania zostały współfinansowane przez Narodowe Centrum Badań w ramach dwóch projektów badawczych: INNOLOT CASELOT - INNOLOT/1/9/NCBR/2013 oraz PBS1/B6/4/2012 realizowanego w ramach Projektu Badań Stosowanych w ścieżce B.*

{ Mgr inż. Piotr Maj, doktorant Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej. Prowadzi badania z zakresu obróbki plastycznej stopów żarowytrzymałych stosowanych w lotnictwie. Jest laureatem zespołowej nagrody rektora, jego dorobek naukowy obejmuje 5 publikacji w czasopiśmie międzynarodowych. }



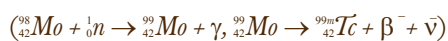
# Współpraca po szwajcarsku

Od badań podstawowych do leczenia pacjenta, czyli o stażu naukowym w Center for Radiopharmaceutical Sciences

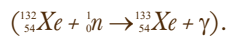
Już sama struktura Centrum Nauk Radiofarmaceutycznych (*Center for Radiopharmaceutical Sciences*) w Szwajcarii świadczy o komplementarnym i interdyscyplinarnym podejściu do prowadzonych w nim projektów naukowo-badawczych. Centrum tworzą trzy ściśle ze sobą współpracujące jednostki: politechnika w Zurychu (ETH), Instytut Paula Scherrera w Viligen (PSI) oraz szpital uniwersytecki w Zurychu (USZ). Co jest takiego szczególnego w radiofarmacji, że wymaga tak szerokiej współpracy? Aby to zrozumieć, prześledźmy długą drogę, jaką przebywa izotop promieniotwórczy od miejsca produkcji do łóżka pacjenta. Miałem okazję przyjrzeć się temu z bliska na stażu realizowanym w Szwajcarii dzięki stypendium wyjazdowemu Centrum Studiów Zaawansowanych Politechniki Warszawskiej.

## Skąd wziąć radioizotopy?

Sama produkcja radioizotopów to kosztowny proces. Potrzebna jest droga infrastruktura, w której będziemy dokonywać aktywacji jąder atomowych. Jeśli mamy do dyspozycji strumień neutronów z reaktora jądrowego - jak w naszym rodzimym reaktorze MARIA w Narodowym Centrum Badań Jądrowych pod Warszawą - możemy przeprowadzić reakcje jądrowe, takie jak produkcja technetu z tarczy molibdenowej



czy otrzymanie radioaktywnego ksenonu



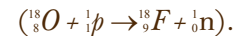
Pierwszy z izotopów wykorzystywany jest w 80% wszystkich procedur medycyny nuklearnej, to fundament dla diagnostyki scyntygraficznej i SPECT (*Single Photon Emission Computed Tomography*). Drugi, będąc gazem szlachetnym, po inhalacji przez pacjenta wykorzystywany jest w obrazowaniu płuc.

Można również korzystać ze spalacyjnego źródła neutronów, jak SINQ: *The Swiss Spallation Neutron Source* w PSI, pierwszej takiej instalacji na świecie o intensywności strumienia neutronów rzędu 10<sup>14</sup> neutronów/cm/s. Wstawiając w taką wiązkę tarczę z gadolinu, otrzymujemy jeden z izotopów terbu



Jest to jeden z izotopów, którym zajmowałem się w czasie pobytu w Szwajcarii - powrócę do niego w dalszej części.

Alternatywą dla neutronów jest wstawianie targetów w wiązki protonów lub cięższych jonów: deuteronów czy cząstek alfa. W przypadku protonów - zwłaszcza przy produkcji izotopów beta plus promieniotwórczych dla obrazowania techniką PET (*Pozytrono-wa Tomografia Emisyjna*) - dzieje się to w komercyjnie dostępnych cyklotronach, które mamy również w Polsce w kilku szpitalach onkologicznych (w Bydgoszczy, Kielcach oraz Gliwicach). Najczęściej produkują one fluor-18 w reakcji z wodą wzbogaconą w izotop tlenu-18:



Fluor-18 wykorzystywany jest np. do najpopularniejszego badania PET jakim jest badanie metabolizmu FDG, fluorodeoksyglukozy. W ETH produkowany jest również węgiel-11, który ze względu na krótki czas życia musi być wytwarzany w miejscu użycia. Prosto z cyklotronu izotopy trafiają do badań na szczurach. Warto w tym miejscu wspomnieć, że radioizotopy są produkowane również w Warszawie, w Centrum Radiofarmaceutyków PET Środowiskowego Laboratorium Ciężkich Jonów UW. Do produkcji w Centrum używa się zarówno wiązek protonów, jak i cząstek alfa.

Innym miejscem produkcji izotopów jest CERN, gdzie wykorzystuje się do tego celu tamtejszą wiązkę protonową i separator ISOLDA. Stąd pochodzą trzy pozostałe izotopy terbu testowane podczas mojego pobytu w PSI: Tb-149, Tb-152, Tb-155, produkowane przez indukowaną protonami spalację targetów tantalowych. Spod skrzydeł fizyków akceleratorowych, inżynierów oraz radiochemików wychodzą rozseparowane, oczyszczone i sprawdzone izotopy. Trafiają do odbiorców w szpitalach, przemyśle lub nauce. W opisywanym przypadku do PSI trafiają m.in. wspomniane izotopy terbu. Po co nam one?

## Izotopy – obrazowanie i terapia

Medycynę nuklearną możemy podzielić na dwie gałęzie - służącą obrazowaniu procesów fizjologicznych oraz służącą terapii, głównie onkologicznej. Pierwsza opiera się na izotopach

emitujących promieniowanie gamma (jak wspomniany Tc-99m dla obrazowania SPECT) lub rozpadające się w przemianie beta plus, gdyż po emisji pozytonu następuje jego anihilacja, mamy zatem dwie wspólniowe gammy (jak wspomniany F-18 dla obrazowania PET). Dla terapii poszukujemy izotopów rozpadających się cząstkami o bardzo małym zasięgu i dużej zdolności do jonizacji ośrodka - czyli izotopów beta lub alfa promieniotwórczych.

Kwartet terbów idealnie nadaje się do tych celów, ponieważ przy identycznym zachowaniu chemicznym poszczególne izotopy oferują nam wszystkie modalności medycyny nuklearnej: Tb-149 rozpada się rozpadem alfa, a w Tb-160 zachodzi przemiana beta minus, mamy więc potencjał terapeutyczny dla różnych typów nowotworów. Tb-152 rozpada się beta plus, czyli możemy obrazować go za pomocą PET, podczas gdy Tb-155 emituje gammę użyteczną w obrazowaniu SPECT. Piękna sprawa, tylko jak sprawić, żeby z fiolki przenieść izotop np. do wnętrza guza nowotworowego?

#### Do gry wkraczają biolodzy i farmaceuci

Musimy przyjrzeć się drugiej części słowa radiofarmaceutyk. Sednem boomu, jaki dzieje się w ostatnich dekadach w medycynie nuklearnej, jest jej specyficzność w obrazowaniu i leczeniu. Wielkie zasługi w tym mają farmaceuci i biochemicy, którzy specjalizują się właśnie w tworzeniu cząstek dla terapii celowanej. To słowo „celowana” słownik wciąż zgłasza jako błąd, ale jak lepiej przetłumaczyć *Targeted Radionuclide Therapy*?

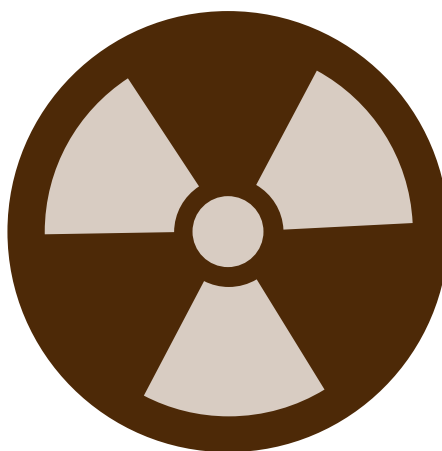
#### Zatem: jak celować?

W przypadku niektórych narządów sprawa jest prosta - np. tarczycy, która naturalnie wychwytuje jod. Podanie jodu promieniotwórczego I-131 lub I-125 w postaci tabletki z jodku sodu NaI, powoduje jego naturalny wychwyt przez tarczycę, tak jak stabilnego jodu. Jednak w większości terapii mechanizm jest bardziej skomplikowany. W poprzednich akapitach została opisana fluorodeoksyglukoza gromadząca się intensywniej w tkankach o szybszym metabolizmie. Jednak nie tylko nowotwory mają większe spożycie glukozy, stan zapalny też „świeci” na obrazie diagnostycznym, a glukoza metabolizowana jest praktycznie przez wszystkie tkanki... Jeśli chcemy przeprowadzić terapię, musimy dokładniej określić miejsce działania.

#### Jak wyróżnić nowotwór spośród innych tkanek?

Zależy jaki - weźmy przykład guzów neuroendokrynych. Ich wspólną cechą jest to, że na swojej błonie komórkowej wykazują nadekspresję niektórych receptorów białek, w tym somatostatyny. Wniosek nasuwa się sam - tak jak użyliśmy FDG jako analogu glukozy, użyjmy teraz analogu somatostatyny. Korzystając z wiedzy farmakologów, stosujemy zatem oktreotyd lub lanreotyd, syntetyczne cykliczne oktapeptydy. Pozostało zatem połączyć je z izotopem... „Linker”, czyli łącznik, to kolejna ważna molekula (taka jak kwas dwuetylenotrójaminopentaoctanowy, znany jako kwas pentetynowy lub w skrócie DTPA czy 1,4,7,10-tetraazacyclododeko-1,4,7,10-tetraoctowy, znany bardziej jako DOTA), która chelatuje atomy radioaktywnego metalu z jednej strony, tworząc wiązania kowalencyjne z cząstką targetującą z drugiej.

„Jeśli chcemy dokonać terapii, musimy być bardziej specyficzni.”



W efekcie uzyskujemy takie twory, jak  $^{111}\text{In}$ -pentetrotide,  $^{90}\text{Y}$ -DOTATOC, Tc-99m-DTPA czy  $^{177}\text{Lu}$ -DOTA-octreotate. W PSI oddzielne grupy zajmują się badaniem poszczególnych metod targetowania [1], np. jedna grupa zajmuje się targetowaniem receptorów kwasu foliowego, inna przeciwciałami monoklonalnymi.

Mamy izotop, linker, molekulę targetującą - pozostało już tylko zrobić myszy zastrzyk...

#### Bolesna droga testów - komórka, mysz, człowiek

Wreszcie mamy gotowy i sprawdzony radiofarmaceutyk, który możemy przekazać biologom molekularnym i radiobiologom do badań na organizmach żywych. Tu przeprowadzane są badania biodystrybucji - sprawdza się, jak izotop rozkłada się w strukturach organizmu. W przypadku hodowli komórkowych zachodzi pytanie, jak dużo gromadzi się przede wszystkim we wspomnianych receptorach na powierzchni komórki. Jeśli farmaceutyci doczepili odpowiednie grupy do radiofarmaceutyku, będzie on wnikał również w głąb do cytoplazmy, a może i dalej do jądra. W szybkiej wirówce można odseparować jądro komórkowe od cytoplazmy i mierzyć ich aktywność niezależnie, sprawdzając, jak dalece skuteczne okazały się ich prace. Na poziomie całego organizmu bada się rozkład w poszczególnych organach - *post mortem* mierząc aktywność skumulowaną w każdym narządzie oddzielnie lub *in vivo* umieszczając zwierzę w SPECT/CT lub PET/CT, stosownie do użytego izotopu.

Gromadzenie się farmaceutyku głównie w nowotworze, z minimalnym gromadzeniem się w innych częściach organizmu, otwiera drogę do skutecznej terapii izotopowej. Przeszczepione myszom ludzkie nowotwory (lub wywołane w nich mysie nowotwory) świecą jasno w obrazach diagnostycznych. Są one następnie leczone świeżo przygotowanymi lekami, radiofarmaceutykami. Wspólnie z fizykami, tworzącymi modele matematyczne, przeprowadzającymi symulacje oceniane są wyniki - gdy są obiecujące, czas przenieść się z Viligen do Zurychu, aby sprawdzić, jak ma się model zwierzęcy do rzeczywistej choroby u ludzi. Rozpoczyna się trwający dekady proces eksperymentów na ludziach, który może doprowadzić do wprowadzenia na rynek nowego leku. Wspaniała perspektywa, wymagająca ścisłej współpracy z firmami farmaceutycznymi, współfinansującymi te badania.

#### Zespół. Kto nad tym wszystkim pracuje?

Jedną z rzeczy, które najbardziej zapadły mi w pamięć z tego stażu było funkcjonowanie zespołu Centrum Nauk Radiofarmaceutycznych.



Krótko można to określić jednym zdaniem – jak w szwajcarskim zegarku.

Po pierwsze od początku uderzyła mnie panująca tam ciepła, przyjazna atmosfera, bardzo żyzna dla współpracy. Złośliwie można by uznać, że codzienne wspólne lunchy całej grupy są koniecznością wynikającą z tego, że Instytut znajduje się na odludziu. Jednak już wspólne wycieczki w góry podczas comiesięcznego „Wandertag” nie są obowiązkowe, a mimo to nie brakuje na nich ani profesorów, ani doktorantów. Również na różnych wydarzeniach, jak Greifenseelauf czyli międzynarodowym biegu organizowanym pod Zurychem, stawiała się liczna reprezentacja doktorantów (z moją skromną osobą włącznie). W samym instytucie formalnie każdy przydzielony jest do którejś grupy, np. badającej targetowanie białkami, ale gdybym nie sprawdził tego na stronie internetowej, nie wiedziałbym kto jest w której – wszyscy ochoczo współpracują, pomagają sobie w eksperymentach i wspólnie dyskutują wyniki. Przypomniała mi się Podróż Ósma Dzienników Gwiazdowych Lema: „Przecież nie przyleciał pan tu prosto z jaskini! Uczni wasi musieli dawno obliczyć, że (...) współpraca jest zawsze korzystniejsza od walki o łupy i hegemonię!”...

I jeszcze jedno – bardzo serio podchodzą do swojej pracy. Podczas

„Doktorandentag”, czyli corocznego seminarium wszystkich doktorantów ze współpracujących instytutów, poziom merytoryczny i techniczny wygłaszanych prezentacji wgniół mnie w fotel. Nie czuję się kompetentny, aby porównywać poziom merytoryczny „ich” i „naszych” studentów i wykładowców, ale rzuciła mi się w oczy przepaść w samym sposobie prezentacji. Dosłownie każdy wygłaszał swoje prezentacje na poziomie, który u nas uchodziłby za konkursowy, a tam był to standard. To samo działo się na wewnętrznych seminariach w instytucie, na które zjeżdżała regularnie większość grupy z Zurychu i PSI. Wspaniałe wystąpienia, a potem

bardzo długa, ożywiona – ale przy tym przyjazna – dyskusja.

### Skąd wziąć taki zespół?

To, co napiszę, nie będzie zaskakujące – żeby dostać się na doktorat w PSI trzeba wziąć udział w rekrutacji, gdzie konkuruje się z magistrantami z całego świata. Nie są promowane osoby „swoje”, nie ma znaczenia czy ktoś robił pracę magisterską we współpracy z PSI, czy w ETH. Znaczenie ma to, jak zaprezentował się na wykładzie rekrutacyjnym, który wygłosił przed całą grupą. Mimo że po kandydatach widać stres, dają wykłady, których od strony technicznej nie powstydziliby się niejeden nasz wykładowca. Na wyższe stanowiska również nie prowadzi się znanego w Polsce „chowu wsobnego”, tylko ogłaszany jest otwarty konkurs na stanowisko naukowe, w którym startują najlepsi specjaliści z całego świata. Przejrzystość procedur, dobre finansowanie, twórcza atmosfera, przemyślana infrastruktura, skuteczne zarządzanie, jasny cel w badaniach, naturalnie wynikająca z tego współpraca z przemysłem. Tylko tyle i aż tyle.

Ostatnią rzeczą wartą wspomnienia jest świadomość u Szwajcarów wagi promocji nauki w społeczeństwie. Przy PSI funkcjonuje spora wystawa stała na temat badań prowadzonych w instytucie. Synchrontron, terapia protonowa, laser na swobodnych elektronach... Jest o czym opowiadać. Regularnie odbywają się tam tematyczne wykłady połączone ze zwiedzaniem instytucie w małych grupach. Wszak 1,2 miliarda złotych budżetu instytucie bierze się w dużej mierze z finansowania rządowego, czyli od podatników, warto więc, żeby wiedzieli na co płacą. Znowu tylko tyle i aż tyle.

[1] <http://www.psi.ch/zrw/tumor-targeting>

**Mgr inż. Dariusz Aksamit**, absolwent Wydziału Fizyki na Politechnice Warszawskiej, ukończył specjalizację w zakresie fizyki medycznej. Obecnie doktorant na Politechnice Warszawskiej i Uniwersytecie Medycznym w Warszawie. Pracował w Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej. Aktywny członek Koła Naukowego Fizyków przy Politechnice Warszawskiej, dawniej Animator w Centrum Nauki Kopernik. Od ośmiu lat pasjonat popularyzacji nauki i dydaktyki na różne sposoby: od pokazów podczas Uniwersytetu Dzieci, przez liczne warsztaty z młodzieżą, po prowadzenie laboratoriów studenckich na Wydziale Fizyki PW. Finalista pierwszej polskiej edycji konkursu FameLab. Gorący zwolennik idei społeczeństwa opartego na wiedzy. Prywatnie kajakarz, głównie górski.



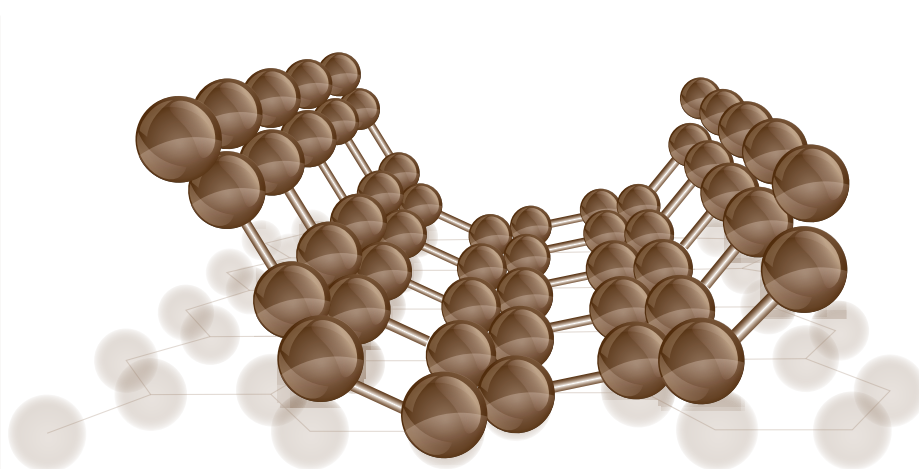
## MATERIAŁY PRZYSZŁOŚCI

Wizyta profesora Rodneya S. Ruoffa, fizykochemika, nanotechnologa, eksperta w dziedzinie materiałów węglowych

Na początku roku Politechnikę Warszawską odwiedził profesor Rodney S. Ruoff, fizykochemik i nanotechnolog, jeden ze światowych ekspertów w dziedzinie materiałów węglowych. Stopień doktora chemii fizycznej uzyskał na University of Illinois-Urbana. Był laureatem stypendium Fundacji Fulbrighta w Max Planck Institute für Strömungsforschung in Göttingen w Niemczech (1988-1989). W latach 2000-2007 pracował w Northwestern University, jako profesor nanoinżynierii i dyrektor NU's Biologically Inspired Materials Institut. W 2014 otrzymał nagrodę MRS Turnbull Lectureship. Obecnie jest dyrektorem Center for Multidimensional Carbon Materials (CMCM) w Institute Basic Science (IBS) należącym do Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST).

Profesor Rodney Ruoff wraz ze swoimi grupami badawczymi ma ogromny wkład w rozwój innowacyjnych technik syntezy oraz zdefiniowanie właściwości nanostruktur i materiałów 2D - zwłaszcza nowych materiałów węglowych tj. grafen, diament, nanorurki, węgiel z hybrydyzacją sp<sup>3</sup>-sp<sup>2</sup>, węgiel o ujemnej krzywiznie, nanopianki węglowe, alotropowa odmiana azotku boru, fule-ry itp.).

Na zaproszenie Centrum Studiów Zaawansowanych Politechniki Warszawskiej profesor Rodney Ruoff wygłosił wykład z cyklu Scientia Suprema



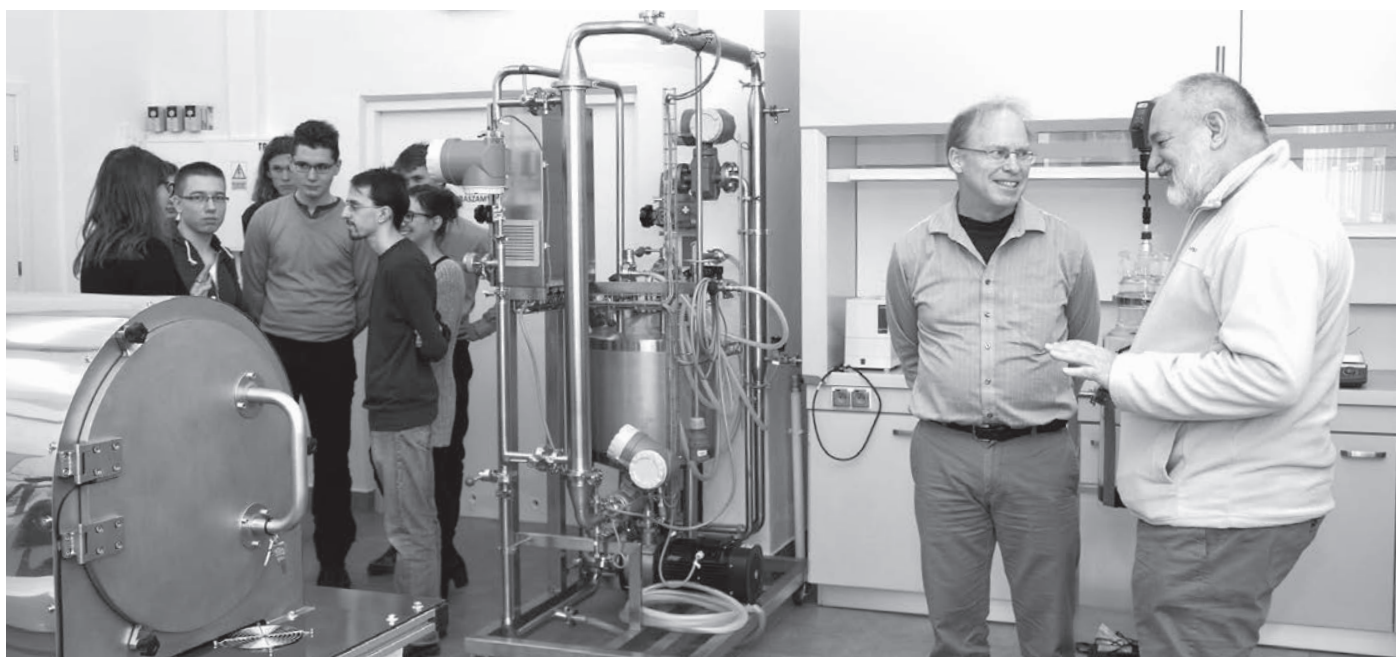
pt. *Carbon Materials for the Future*. W czasie spotkania została przedstawiona perspektywa wykorzystania różnych struktur węglowych do otrzymywania w przyszłości zupełnie nowych materiałów. Profesor skupił się na prezentacji pewnych obliczeń teoretycznych stosowanych przy tego typu układach/systemach, a następnie przedstawił osiągnięcia zarządzanego przez siebie Center for Multidimensional Carbon Materials (CMCM) z zakresu otrzymywania nanomateriałów węglowych.

Wizyta profesora Rodneya S. Ruoffa została zorganizowana we współpracy Centrum Studiów Zaawansowanych z wydziałami Politechniki Warszawskiej: Chemicznym (prof. Zbigniew Brzózka - Dziekan Wydziału), Inżynierii Chemicznej i Procesowej (dr Leszek

Stobiński - Kierownik LG PW) i Inżynierii Materiałowej (prof. Małgorzata Lewandowska), a także Instytutem Chemii Fizycznej Polskiej Akademii Nauk (prof. Janusz Lewiński). W harmonogramie pobytu znalazły się spotkania z grupami naukowymi tych jednostek, w tym zwiedzanie Laboratorium grafenowego PW - zaplecza wytwarzania standaryzowanego grafenu płatkowego o określonej funkcjonalności. Dr Leszek Stobiński opowiedział o działalności całego laboratorium, jego wyposażeniu. W spotkaniu z profesorem Ruoffem wzięli również udział studenci oraz doktoranci Wydziału Inżynierii Chemicznej i Procesowej.

Małgorzata Zielińska

↓ Profesor Rodney S. Ruoff w Laboratorium grafenowym PW wraz z dr. Leszkiem Stobińskim





↑ Dysputy Pitagorejskie (od lewej): prof. Roman Morawski, prof. Jerzy Bralczyk, prof. Stanisław Janeczko oraz dr Leszek Mellibruda

spotkanie w ramach cyklu „W Centrum Uwagi” z Ministrem Olgierdem Dzierżonem, ówczesnym Sekretarzem Stanu w Kancelarii Prezydenta RP. Omówiono sprawy dotyczące nauki oraz będące żywotnymi dla środowiska naukowego. Została zaprezentowana działalność CSZ. Osobami reprezentującymi Politechnikę Warszawską oraz Centrum byli: Dyrektor CSZ – prof. Stanisław Janeczko, prof. Leon Gradoń, prof. Małgorzata Lewandowska, prof. Tomasz Sosnowski, przedstawiciele młodej kadry naukowej Uczelni oraz najzdolniejsi doktoranci PW – stypendyści CSZ.

Kolejne spotkanie z tego cyklu odbyło się w czerwcu 2015 r. Tym razem wzięli w nim udział: przedstawiciele Stowarzyszenia Studentów PW oraz profesorowie Uczelni: Stanisław Janeczko, Małgorzata Kujawińskiej i Leon Gradoń.

#### ACADEMIA SCIENTIARUM PRINCIPALIAM

12 marca 2015 r. odbyła się sesja wykładów otwartych z matematyki i fizyki w ramach *Academia Scientiarum Principalium*. Wykłady były adresowane do studentów lat I-III, licealistów, nauczycieli i wszystkich innych zainteresowanych. Uczestnicy wysłuchali trzech wykładów:

- Stanisław Janeczko – *Osobliwości i katastrofy*
- Krzysztof Turzyński – *Anioły, demony, fizyka*
- Joanna Jaszuńska – *Kolorowe kropki i kreski*.

#### SPOTKANIE RADY PROGRAMOWEJ

W maju 2015 r. odbyło się kolejne spotkanie Rady Programowej CSZ.

W trakcie spotkania omówiono i zaakceptowano sprawozdanie z roku akademickiego 2014/2015 oraz plany na kolejny rok, w tym Uczelnianą Ofertę Dydaktyczną Centrum Studiów Zaawansowanych i kandydaturę na laureata Wyróżnienia CSZ.

#### SZKOLENIE DLA DOKTORANTÓW PW

W maju 2015 roku odbyło się szkolenie dla doktorantów PW z zakresu metodyki zarządzania projektami. Wzięło w nim udział 12 osób. Uczestnicy zapoznali się z tematyką zarządzania projektami, w tym technikami i różną metodyką w ramach planowania, realizacji i zamykania projektu. W trakcie szkolenia zaprezentowano przegląd dostępnych metod zarządzania projektem m.in.: PMI, PRINCE 2. Zostały omówione zagadnienia projektowe dotyczące: planowania, budżetowania, harmonogramowania, podziału zadań i uprawnień struktury, analizy ryzyk, analizy jakości, monitoringu i analizy wskaźnikowej w zakresie efektów (produktu i rezultatu). Szkolenie było współfinansowane przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

#### XI WARSZTATY NAUKOWE CSZ – LIPNIK PARK

W dniach 19-21 czerwca 2015 roku w Lipniku odbyła się już XI edycja warsztatów naukowych. Przewodniczył jej dyrektor Centrum Studiów Zaawansowanych, prof. Stanisław Janeczko. W malowniczo położonym ośrodku Lipnik-Park doktoranci Politechniki Warszawskiej mieli okazję wygłosić referaty ustne oraz zaprezentować swoje projekty naukowo-badawcze podczas sesji posterowej. Prezentacje zostały

ocenione przez Komitet Naukowy, który wyłonił najlepsze prezentacje ustne i posterowe:

#### PREZENTACJA USTNA

miejsce I – mgr inż. Magdalena Matczuk z Wydziału Chemicznego, *Po nitce do kłębka – jak badać mechanizmy transportu leków przeciwnowotworowych w warunkach fizjologicznych*

miejsce II – mgr inż. Barbara Ostrowska z Wydziału Inżynierii Materiałowej, *Trójwymiarowe rusztowania tkankowe z polikaprolaktynu o zmiennej architekturze wewnętrznej do regeneracji tkanki kostnej, wytworzone metodą przyrostowego kształtowania*

miejsce III – mgr inż. Artur Janicki z Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych PW, *Podnoszenie bezpieczeństwa systemów weryfikacji mówcy*

#### PREZENTACJA POSTEROWA

miejsce I – mgr inż. Emilia Pawlikowska z Wydziału Chemicznego, *Przestrzajalne ferroelektryczne układy kompozytowe do zastosowań mikrofalowych*

miejsce II – mgr inż. Michał Macias z Wydziału Elektrycznego, *Modelowanie analogowe układów niecałkowitego rzędu*

miejsce III – mgr inż. Jan Krzysztoforowski z Wydziału Inżynierii Chemicznej i Procesowej, *Modelowanie zjawisk transportu masy w procesach ekstrakcji z udziałem materiałów porowatych i płynów w stanie nadkrytycznym*.

#### WYKŁADY UOD CSZ PW 2015/2016

W Uczelnianej Ofercie Dydaktycznej Centrum Studiów Zaawansowanych PW w roku akademickim 2015/2016 zorganizowano 10 wykładów podstawowych oraz 11 specjalnych. Nowymi propozycjami są: *Psychologiczny koktajl na lepsze „trawienie” życia*, dr. Leszka

Mellibrudy; *Wolna wola a determinizm i realność przyszłości*, dr. Adriana Kuźniara; *Wybrane współczesne problemy nauk o zarządzaniu*, prof. Janusza Zawily-Niedźwieckiego oraz wykładowców z Wydziałów Zarządzania oraz Administracji i Nauk Społecznych PW; *Czym jest światło? Współczesne poglądy i kontrowersje*, prof. Kazimierza Regińskiego; *Sila nauki – granice poznania*, prof. Stanisława Janeczko; *7 psycho-kregów prostowania mentalnej przestrzeni, czyli monografia siedmiu emocji, które pomagają w życiu*, dr. Leszka Mellibrudy; *Współczesne metody pomiarowe i techniki eksperymentalne w termomechanice*, prof. Tomasza Wiśniewskiego oraz prof. Pawła Pyrzanowskiego.

#### DYSPUTY PITAGOREJSKIE

Dysputy Pitagorejskie to nowy cykl spotkań organizowany przez Centrum Studiów Zaawansowanych Politechniki Warszawskiej z udziałem gości specjalnych. Pierwsze spotkanie pt. *Nadzieje i zagrożenia świata wirtualnego*, odbył się 20 października 2015 r.

Wraz z Dyrektorem Centrum, profesorem Stanisławem Janeczko, dysputę prowadzili znakomici goście: prof. Jerzy Bralczyk, dr Leszek Mellibruda oraz prof. Roman Morawski. W trakcie rozmowy zostały poruszone kwestie: *Kiedy jesteś sobą? Wiarygodność informacji w internecie, Nowe wzorce zachowań, Informacja i człowieczeństwo*. Spotkanie miało charakter interaktywnego kontaktu ze słuchaczami (s. 7).

#### XII WARSZTATY NAUKOWE CSZ – KAZIMIERZ DOLNY

XII edycja Warsztatów Naukowych CSZ odbyła się 23-25 października 2015 roku w Kazimierzu Dolnym nad Wisłą. Warsztatom przewodniczył dyrektor Centrum Studiów Zaawansowanych, prof. Stanisław Janeczko. Uczestnikami spotkania byli doktoranci Politechniki Warszawskiej, którzy w obecności Komitetu Naukowego wygłosili referaty ustne oraz zaprezentowali swoje projekty naukowo-badawcze podczas sesji posterowej. Spośród wszystkich prezentujących zostały wyłonione trzy najlepsze prezentacje ustne oraz trzy najlepsze postery:

#### PREZENTACJA USTNA:

miejsce I – mgr inż. Tomasz Miller z Wydziału Matematyki i Nauk Informacyjnych PW, *Przyczynowość zjawisk nielokalnych*

miejsce II – mgr inż. Jacek Markusiewicz z Wydziału Architektury PW, *Interfejsy we współczesnej praktyce architektonicznej*

miejsce III – mgr inż. Agnieszka Żuchowska z Wydziału Chemicznego PW, *Wykorzystanie trójwymiarowej hodowli sferoidów do określenia cyto- i fotocytotoksyczności badanych związków*

#### PREZENTACJA POSTEROWA:

miejsce I – mgr inż. Piotr Maj z Wydziału Inżynierii Materiałowej PW, *Analiza właściwości mechanicznych elementu turbiny silnika lotniczego wykonanego z nadstopu niklu typu INCONEL625 uzyskanych w procesie kształtowania obrotowego*

miejsce II – mgr inż. Michał Gaczkowski z Wydziału Matematyki i Nauk Informacyjnych PW, *Analiza przestrzeni Sobolewa ze zmiennym wykładnikiem na rozmaitościach riemannowskich*

miejsce III – mgr inż. Łukasz Piątek z Wydziału Architektury PW, *Projekty statków wodnych w dorobku człowieczych architektów XX wieku*

#### WYSTAWA WARSZAWA-BERLIN

22 czerwca 2015 roku odbył się wernisaż Joanny Pętkowskiej, doktorantki Wydziału Architektury PW oraz stypendystki Centrum. Wystawa zestawia akwarele i rysunki powstałe w plenerze podczas pobytu stypendialnego artystki w Berlinie w 2014 roku oraz akwarele ukazujące Warszawę, jej rodzinne miasto.

#### DRUGIE WYRÓŻNIENIE CENTRUM STUDIÓW ZAAWANSOWANYCH PW

3 grudnia 2015 roku po raz drugi nadano wyróżnienie Centrum Studiów Zaawansowanych Politechniki Warszawskiej *Laus tibi, non tuleris qui vincula mente animoque* – „Chwała Ci za to, że nie pozwoliłeś nałożyć więzów na swój umysł i swego ducha”. Otrzymał je profesor Marek Abramowicz z Centrum Astronomicznego im. Mikołaja Kopernika Polskiej Akademii Nauk (s. 18).

#### WIZYTA DR ANETTE FROEHLICH Z EUROPEAN SPACE POLICY INSTITUTE/VIENNA

17 grudnia 2015 r. Centrum Studiów Zaawansowanych gościło dr Anette Froehlich, eksperta naukowego przy Europejskim Instytucie Polityki Kosmicznej. Wizyta została zrealizowana na zaproszenie prof. Piotra Wolańskiego, będącego wieloletnim wykładowcą Uczelnianej Oferty Dydaktycznej CSZ PW. W trakcie swojego pobytu na PW, dr Froehlich wygłosiła dla doktorantów odczyt związany z europejską polityką kosmiczną.

#### SCIENTIA SUPREMA

W styczniu 2016 r. Politechnikę Warszawską na zaproszenie Centrum

Studiów Zaawansowanych, odwiedził profesor Rodney S. Ruoff (Ulsan National Institute of Science and Technology, Republic of Korea), fizykochemik i nanotechnolog, jeden ze światowych ekspertów w dziedzinie materiałów węglowych. W czasie swojego pobytu profesor Ruoff wygłosił wykład z serii Scientia Suprema pt. *Carbon Materials for the Future* (s. ...)

## PLANY

#### DYSPUTY PITAGOREJSKIE

W kwietniu 2016 r. odbędzie się drugie spotkanie w cyklu Dysputy pitagorejskie. Tym razem rozmowa będzie poruszała następujące zagadnienia: *Samodzielność w świecie nauki. Na czym polega samodzielność? W czym się przejawia? Samodzielność badawcza a niezależność życiowa. Odwaga i indywidualizm w nauce.*

#### SEMINARIUM SPECJALISTYCZNE

21 kwietnia 2016 r. odbędzie się seminarium pt. *Nietrywialne zastosowania optycznych zegarów atomowych*, które wygłosi dr hab. Michał Zawada z Instytutu Fizyki Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu

#### FORUM NANOTECHNOLOGICZNE

Tej wiosny coroczne warsztaty naukowe zastąpi Forum nanotechnologiczne, które odbędzie się w dniach 3-5 czerwca 2016. Wezmą w nim udział znakomici naukowcy i specjaliści z wielu dziedzin powiązanych z nanotechnologią oraz doktoranci wybranych wydziałów Politechniki Warszawskiej.

#### SPOTKANIE RADY PROGRAMOWEJ

W czerwcu odbędzie się kolejne spotkanie Rady programowej Centrum Studiów Zaawansowanych, podczas którego zostaną podsumowane działania z ostatniego roku oraz przedstawiony plan na kolejne miesiące.

#### WYDAWNICTWA

W przygotowaniu jest kolejna pozycja z serii *CAS Lecture notes*

#### TRZECIE WYRÓŻNIENIE CENTRUM STUDIÓW ZAAWANSOWANYCH PW

W grudniu 2016 roku planowana jest kolejna uroczystość związana z przyznaniem wyróżnienia Centrum Studiów Zaawansowanych. Szczegóły dotyczące kandydatury oraz przebiegu wydarzenia zostaną omówione w czasie spotkania Rady programowej CSZ.

Celem Uczelnianej Oferty Dydaktycznej Centrum Studiów Zaawansowanych PW (UOD CSZ PW) jest poszerzenie wiedzy w wybranych kierunkach, a także pomoc i inspiracja w planowanej działalności naukowej. Program oferty adresowany jest do całego środowiska akademickiego Politechniki Warszawskiej, a także chętnych spoza Uczelni. Na propozycję UOD CSZ PW składają się m.in. cykle interdyscyplinarnych wykładów podstawowych i specjalnych.

Merytoryczną opiekę nad UOD CSZ PW sprawuje Rada Programowa Centrum, którą tworzą naukowcy z Politechniki Warszawskiej, Uniwersytetu Warszawskiego, Uniwersytetu Jagiellońskiego i Centrum Kopernika Badań Interdyscyplinarnych, a także Polskiej Akademii Nauk.

# Uczelniana Oferta Dydaktyczna Centrum Studiów Zaawansowanych

2015/2016

wykłady podstawowe  
(30 h)



- L1: Teoria automatów i języków formalnych: studium praktyczne - prof. Władysław Homenda (PW)
- L2: Wprowadzenie do teorii ruchu obrotowego Ziemi - prof. Aleksander Brzeziński (PW)
- L3: Elementy Mechaniki Analitycznej - prof. Piotr Przybyłowicz (PW)
- Z1: Nanojonika i przewodniki superjonowe - prof. Jerzy Garbarczyk (PW)
- Z2: My i nasze geny; nadzieje i obawy - prof. Ewa Bartnik (UW)
- Z3: Mini, mikro, nano - laboratorium na chipie - prof. Zbigniew Brzózka (PW)
- Z4: Kosmonautyka - prof. Piotr Wolański (PW)
- Z5: Podstawy mechaniki kwantowej - prof. Franciszek Krok (PW)
- Z6: Modelowanie statystyczne z pakietem R - dr hab. inż. Anna Dembińska (PW)
- Z7: Równania różniczkowe: niezbędne narzędzie nauk przyrodniczych - prof. Jerzy Kijowski (UW)

wykłady specjalne  
(15 h)

- SL1: Analiza danych z pakietem R (grupa I - podstawowa) (30 h) - dr hab. inż. Anna Dembińska (PW)
- SL2: Analiza danych z pakietem R (grupa II - zaawansowana) (30 h) - dr hab. inż. Anna Dembińska (PW)
- SL3: Współczesne metody pomiarowe i techniki eksperymentalne w termomechanice - prof. Tomasz Wiśniewski (PW), prof. Paweł Pyrzanowski (PW)
- SL4: 7 psycho-kręgów prostowania mentalnej przestrzeni, czyli monografia siedmiu emocji, które pomagają w życiu - dr Leszek Mellibruda (Active Business Mind Psychologia Biznesu)
- SL5: Siła nauki - granice poznania (30 h) - prof. Stanisław Janeczko (PW)
- SZ1: Model informacji inżynierskich, BIM - prof. Jan Styk (PW), profesorowie z wydziałów: Architektury, Inżynierii Środowiska (PW)
- SZ2: Wszechświat bliski i daleki - prof. Marek Demiański (UW)
- SZ3: Czym jest światło? Współczesne poglądy i kontrowersje - prof. Kazimierz Regiński (Instytut Technologii Elektronowej)
- SZ4: Wybrane współczesne problemy nauk o zarządzaniu (22 h) - prof. Janusz Zawita-Niedźwiecki (PW), wykładowcy z Wydziałów Zarządzania oraz Administracji i Nauk Społecznych (PW)
- SZ5: Wolna wola a determinizm i realność przyszłości - dr Adrian Kuźniar (UW)
- SZ6: Psychologiczny koktajl na lepsze „trawienie” życia - dr Leszek Mellibruda (Active Business Mind Psychologia Biznesu)

*Uaktualniona lista przedmiotów znajduje się na stronie internetowej Centrum*

Biuletyn Centrum Studiów Zaawansowanych „Profundere Scientiam”  
Pl. Politechniki 1, p.152-154, 00-661 Warszawa; e-mail: [csz@csz.pw.edu.pl](mailto:csz@csz.pw.edu.pl), [www.csz.pw.edu.pl](http://www.csz.pw.edu.pl)

Zespół redakcyjny: Małgorzata Zielińska – redaktor naczelna, Jowita Krakowiecka, Ilona Sadowska  
Opieka merytoryczna: prof. Stanisław Janeczko  
Projekt graficzny: Emilia Bojańczyk / Podpunkt | Opracowanie i skład: Małgorzata Zielińska / CSZ