

## Nieznana przyszłość – nadzieje rewolucja w nauczaniu

Nawet laicy widzą, że żyjemy w czasach niezwykle szybkich zmian, które zachodzą nie w ciągu jednego pokolenia, lecz nawet kilku lat. Prorokowanie o zmianach ekologicznych, klimatycznych czy społecznych jest niczym wróżenie z fusów. To zawsze jest syndrom nadejścia jakiegoś nowego rewolucyjnego przeobrażenia. W tej sytuacji muszą nastąpić zmiany w ustroju szkół, szkolnictwa i metod nauczania. To, które z obecnych już zmian są oznakami nowego, a które – jak to bywało w przeszłości – są np. przedwczesne, wkrótce zostanie poddane próbie. Nie ulega wątpliwości, że rola nauczycieli (szeroko pojętych) będzie nadal kluczowa, bo i natura ludzka pozostaje w swej istocie niezmienna.

Jeśli tak, to jak kształcić nauczycieli, edukatorów i popularyzatorów? Jedno jest pewne – nie tak jak dotychczas. Nauczyciele to z jednej strony bardzo twórcze i kreatywne środowisko, a z drugiej konserwatywne. Uczą swoich wychowanków, tak jak sami byli uczeni i taki model się multiplikuje. Raczej należy postawić problem: jak wykorzystać potencjał twórczy nauczycieli. Kogo będziemy uważać za mistrza dla uczniów? Jacy będą nasi uczniowie, jak będą wykorzystywać nowe środki komunikacji, jak się będą zachowywać w obliczu radykalnych zmian środowiska? Wsłuchujmy się bardzo uważnie w nauczycieli i uczniów propozycje.

W bieżącym zeszycie zamieściliśmy artykuły na temat modelowania układów społecznych oraz historii rozwoju FRET – jednej z metod badań procesów biologicznych; proponujemy także podróż w Kosmos na płatku Kocha. Opisujemy również pilotażowy kurs dydaktyczny dla doktorantów WFAIS UJ i jego odbiór przez dwa roczniki kursantów. W krótkim artykule przyglądamy się, w jaki sposób uczymy obecnie o sprężystości. Zamieszczamy także recenzję dwóch popularnych książek rodzinnego tandemu Hawkingów. A na koniec przedstawiamy interaktywną wystawę w centrum WOMAI w Krakowie.

Zapraszamy do lektury!

*Z.G.-M.*



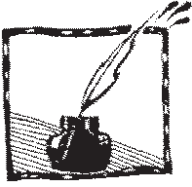
## Contents

Editorial	
<i>Zofia Gołqb-Meyer</i> .....	1
Information spreading and social alignment	
<i>Bartłomiej Dybiec</i> .....	4
From mercury to biological membranes – a history of FRET	
<i>Anna Drożdż</i> .....	17
A trip to the Moon and the Sun on Koch curve	
<i>Marek Berezowski</i> .....	25
A piloting course on Academic Didactics for PhDs at WFAIS UJ	
<i>Dagmara Sokołowska</i> .....	28
Problems (not only) with a restoring force	
<i>Ludwik Lehman</i> .....	37
Review of the books: <i>George's Secret Key to the Universe</i> and <i>George's Cosmic Treasure Hunt</i> by Lucy and Stephen Hawking	
<i>Leszek M. Sokołowski</i> .....	41
What to read. ....	43
WOMAI – interactive science center in Krakow	
<i>Małgorzata Lebica</i> .....	44



## Spis treści

Nieznana przyszłość – nadejdzie rewolucja w nauczaniu <i>Zofia Gołąb-Meyer</i> .....	1
Modelowanie układów społecznych: akceptować czy dyskutować? Czy może nasłuchiwać? <i>Bartłomiej Dybiec</i> .....	4
Od rtęci do błon biologicznych – historia rozwoju teorii FRET <i>Anna Drożdż</i> .....	17
Podróż na Księżyc i Słońce na krzywej Kocha <i>Marek Berezowski</i> .....	25
Podstawy Nauczania Dydaktyki Akademickiej – pilotażowy kurs dla doktorantów <i>Dagmara Sokołowska</i> .....	28
Kłopoty (nie tylko) ze sprężystością <i>Ludwik Lehman</i> .....	37
Recenzja powieści autorstwa Lucy i Stephena Hawkingów: <i>George i tajny klucz do Wszechświata</i> oraz <i>George i poszukiwania kosmicznego skarbu</i> <i>Leszek M. Sokołowski</i> .....	41
Co czytać .....	43
WOMAI – naukowa perełka turystycznego Krakowa. Świat moich wszystkich inspiracji <i>Małgorzata Lebica</i> .....	44



## Modelowanie układów społecznych: akceptować czy dyskutować? Czy może nasłuchiwać?

*Bartłomiej Dybiec  
Zakład Fizyki Statystycznej,  
Instytut Fizyki Teoretycznej UJ*

### Wstęp

Układy społeczne zbudowane są z wielu różnych osobników. Pomimo mikroskopowej różnorodności grupy społeczne mogą wykazywać zachowania kolektywne. Socjofizyka [1, 2] stosuje różne koncepcje i modele wywodzące się z fizyki statystycznej w celu opisanie zachowania układów społecznych. Zaproponowano wiele modeli, opisujących powstawanie konsensusu i badających proces uzgadniania opinii, które były badane przez fizyków oraz socjologów. W niniejszym artykule omówię wybrane modele rozprzestrzenienia się informacji oraz uzgadniania opinii.

Ilościowe modelowanie układów społecznych staje się możliwe dopiero po skwantyfikowaniu opinii. Skwantyfikowane opinie pozwalają na zbudowanie formalnych modeli wyboru społecznego [3] poprzez określenie „odległości” między opiniami, a w dalszej kolejności na modelowanie procesu wymiany opinii i ich rozprzestrzeniania. Można założyć, że osobniki o zbliżonych poglądach będą częściej wchodzić ze sobą w interakcje, a osoby mające takie same poglądy (w jakiejś kwestii) można potraktować jako grupę społeczną. Socjofizyka pozwala na badanie dynamiki zachowań społecznych, a w szczególności trwałości i wielkości grup społecznych. Problemy te są szczególnie interesujące dla socjologów i psychologów, a także dla fizyków zajmujących się socjofizyką [4]. Do badania własności układów składających się z wielu podobnych, oddziałujących ze sobą jednostek szczególnie dobrze nadają się narzędzia i metody fizyki statystycznej w połączeniu z automatami komórkowymi [5, 6], modelowaniem agentowym oraz metodami Monte Carlo [7]. Metody te szczególnie chętnie stosuje się w socjofizyce i w obliczeniowych naukach społecznych.

Fizyka statystyczna znajduje zastosowanie w badaniu wielu układów, które typowo nie były obiektem zainteresowań fizyków. Pośród tych układów można wymienić badanie sieci złożonych [8], modeli epidemiologicznych [9] oraz socjofizycznych [1]. Modele sieciowe odgrywają coraz większą rolę w badaniu układów złożonych. Znajdują one naturalne zastosowanie w sytuacjach, gdy układy składają się z wielu jednostek oraz połączeń między nimi. W takich sytuacjach agenci tworzący układ stają się węzłami sieci, a istniejące powiązania między nimi reprezentowane są jako linki [8]. Najprostszą strukturą oddziaływań między osobnikami jest regularna siatka, ale obserwacja realnych układów po-

kazuje, że struktura oddziaływań jest bardziej złożona (sieci typu małego świata i sieci bezskalowe oraz ich kombinacje).

Modele uzgadniania opinii zakładają, że jednostki na postawie dostępnej im informacji podejmują decyzje o zmianie lub zachowaniu dotychczasowej opinii. Odpowiednio wykorzystana lokalna informacja może prowadzić do powstania konsensusu i globalnego porządku, czyli do sytuacji, w której wszystkie osobniki posiadają takie same poglądy. Jeśli przyjmiemy, że osoby posiadające takie same opinie tworzą grupę społeczną, to modele opisujące proces uzgadniania opinii są modelami mogącymi opisywać także powstawanie grup społecznych, rozumianych jako zbiorowość jednostek posiadających taką samą opinię czy stanowisko w określonej kwestii. W rzeczywistych sytuacjach tak jednak być nie musi, ponieważ wspólne stanowisko nie zawsze prowadzi do powstania wyraźnie wyodrębnionej grupy, np. ze względu na błahość kwestii lub inne czynniki niepozwalające na jej powstanie. Dzieje się tak dlatego, że o przynależności do danej grupy decyduje nie tylko zgodność poglądów, ale także ich ranga, tradycja lub inne uwarunkowania społeczno-historyczne. Niektóre z możliwych mechanizmów uzgadniania opinii zostały sformalizowane w postaci modeli opisujących lokalną adaptację istniejących opinii, która w sprzyjających okolicznościach może zostać rozciągnięta na cały układ. Uzgadnianie opinii opisywane jest między innymi przy pomocy modeli wyborcy [10], teorii wpływu społecznego [11], modeli większościowych [12], modeli Sznajdów [13], Deffuanta [14] oraz modeli ograniczonego zaufania [15].

## Modele

Modelując układy społeczne zakładamy, że każdy osobnik (agent) jest scharakteryzowany poprzez swój stan, w rozważanych tutaj przypadkach – opinię. W najprostszych sytuacjach zakładamy, że opinia jest zmienną binarną (dwustanową), której różne stany utożsamiamy z dwoma możliwymi wyborami: za/przeciw lub tak/nie. Dzięki temu modele typu Isinga [16] grają szczególnie ważną rolę w teorii układów socjofizycznych [2]. Możliwe jest także dopuszczenie większej liczby stanów, ciągłych opinii, a także utworzenie wielowymiarowych (wektorowych) opinii. Dlatego w bardziej złożonych sytuacjach opinia może być zbiorem binarnych, całkowitych lub ciągłych zmiennych odpowiadających stanowiskom w elementarnych kwestiach. Dzięki temu możliwe jest opisanie skomplikowanych sytuacji, np. takich, w których ta sama jednostka ze względu na stanowisko w określonej kwestii należy do więcej niż jednej grupy. Sposób uzgadniania opinii w połączeniu ze sposobem ich reprezentowania determinuje wielkość możliwych grup oraz ich trwałość.

Techniki oparte na automatach komórkowych [5, 6, 17] pozwalają na badanie rozprzestrzeniania się opinii. Dzięki nim możliwe jest tworzenie wirtualnych społeczeństw, które mogą być wykorzystane do weryfikacji różnych hipotez oraz badania różnorodnych scenariuszy. Zbudowanie modelu wymaga doprecyzowania poszczególnych jego elementów: możliwych stanów, w jakich mogą znaleźć

się agencji, topologii oddziaływań (struktury połączeń), reguł przejść między stanami i sposobu uaktualniania układu. Zwykle agenci umieszczeni są w pewnym środowisku, które może być regularną siatką lub siecią złożoną [8]. Połączenia między węzłami, na których znajdują się agenci, określają, kto może z kim oddziaływać. Dla regularnej siatki odległość między jednostkami ma przełożenie na odległość geograficzną: niewielka odległość oznacza geograficzną bliskość. W przypadku sieci złożonych, ze względu na bezpośrednie połączenia dalekiego zasięgu, interpretacja geograficzna traci sens. W przypadku badanych modeli podstawową topologią będzie regularna siatka. Dzięki temu powstałe grupy społeczne będą reprezentowane przez agentów będących ze sobą w bezpośrednim kontakcie, a grupy społeczne będą tworzyły połączone klastry.

Zakładamy, że grupy społeczne oznaczają agentów posiadających te same opinie – zgodność opinii będzie interpretowana jako przynależność do tej samej grupy. W przedstawionych modelach możliwe stany będą określone przez zmienne dyskretne lub wektorowe (o dyskretnych składowych). Dzięki temu łatwo można określić, które osobniki należą do tej samej grupy. Dla skalarnej zmiennej dyskretnej zgodność opinii oznacza taką samą wartość zmiennej reprezentującej opinię. W przypadku opinii wektorowej o dyskretnych składowych, agenci są w takim samym stanie, gdy wszystkie składowe wektora reprezentującego ich opinie są takie same. Wraz ze zwiększającą się liczbą takich samych składowych wzrasta podobieństwo między osobnikami.

Na przykładzie dwóch wybranych modeli socjofizycznych: modelu Axelroda [18, 19] oraz modelu rozprzestrzeniania się kultur [20] zostanie pokazane, jak wielkość i trwałość grup społecznych zależy od sposobu uzgadniania opinii [19] oraz kierunkowości przepływu informacji i jej wartościowania [20].

### Sposób uzgadniania opinii

Załóżmy, że każdy z osobników tworzących wirtualne społeczeństwo jest scharakteryzowany wektorową opinią, która ma  $F$  składowych (cech, zagadnień), a każda ze składowych przyjmuje  $q$  dyskretnych wartości (elementarnych opinii). Każda ze składowych wektora oznacza jakieś zagadnienie, w stosunku do którego należy określić stanowisko, a każda cecha przyjmuje jedną z  $q$  dyskretnych wartości  $\sigma \in \{1, 2, \dots, q\}$ . Dla ustalonych  $F$  i  $q$  istnieje  $q^F$  możliwych stanów, w jakich mogą znaleźć się agenci. Jeśli przyjmiemy, że kultura jest zbiorem wierzeń i praktyk, które można przyjąć lub przekazać innym, możemy próbować ją opisać i modelować. Co więcej, tak rozumiana kultura może być reprezentowana jako zbiór zagadnień, w stosunku do których należy zająć jakieś stanowisko. Dzięki temu można próbować opisać (przybliżyć) ją przy pomocy wektorowej opinii. Takie podejście zostało zastosowane przez Roberta Axelroda do opisanie rozprzestrzeniania się kultur [18]. Zaproponowany przez niego model zakłada, że agenci mogą lokalnie przyjmować (adaptować) stanowiska swoich sąsiadów, przez co się do nich upodabniają. Agenci podejmują swoje decyzje niezależnie – nikt nie wywiera scentralizowanego/sformalizowanego wpływu na nich. Wy-

miana opinii – uzgadnianie stanowisk – następuje tylko pomiędzy najbliższymi sąsiadami. Odbiorca  $A$  oddziałuje z jednym ze swoich losowo wybranych sąsiadów  $B$  (źródło informacji) z prawdopodobieństwem zależnym od podobieństwa między nimi

$$P^{AB} = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^F \delta_{\sigma_i^A \sigma_i^B}. \quad (1)$$

Konkretniej, osobnik  $A$  spośród wszystkich swoich sąsiadów wybiera jednego, nazwijmy go  $B$ , a następnie oddziałuje z nim z prawdopodobieństwem  $P^{AB}$ . W powyższym równaniu,  $\sigma_i^A, \sigma_i^B$  są wartościami cechy  $i$  dla agentów  $A$  i  $B$ , a  $\delta_{\sigma_i^A \sigma_i^B}$  jest deltą Kroneckera

$$\delta_{\sigma_i^A \sigma_i^B} = \begin{cases} 1 & \text{dla } \sigma_i^A = \sigma_i^B \\ 0 & \text{dla } \sigma_i^A \neq \sigma_i^B \end{cases}. \quad (2)$$

Suma w równaniu, z którego obliczono prawdopodobieństwo oddziaływania  $P^{AB}$ , zlicza liczbę kwestii, w których sąsiedzi  $A$  i  $B$  mają takie same opinie. Wraz ze wzrastającą liczbą wspólnych cech wzrasta podobieństwo między sąsiadami, które przekłada się na rosnące prawdopodobieństwo oddziaływania między nimi. Jeśli sąsiedzi  $A$  i  $B$  nie mają żadnych wspólnych cech, to  $P^{AB} = 0$  i uzgadnianie poglądów między nimi nie jest możliwe, zaś dla dokładnie takich samych osobników  $P^{AB} = 1$ . Na skutek wymiany opinii zwiększa się podobieństwo między oddziałującymi osobnikami, ponieważ podczas każdego oddziaływania odbiorca  $A$ , w losowo wybranej kwestii, w której różni się z  $B$ , dopasowuje swoją opinię do jego stanowiska. Przykładowo, jeśli  $\sigma_i^A \neq \sigma_i^B$ , to po oddziaływaniu  $\sigma_i^A = \sigma_i^B$ . Oznacza to, że prawdopodobieństwo dalszego uzgadniania poglądów między nimi wzrasta o  $1/F$ . Uzgodnienie stanowisk między dwoma osobnikami  $A$  i  $B$  może nastąpić tylko wtedy, gdy istnieje co najmniej jedna kwestia, w której mają oni dokładnie taką samą opinię. Jeśli  $A$  i  $B$  nie zmieniają opinii ze względu na oddziaływanie z innymi sąsiadami, pełne uzgodnienie wszystkich stanowisk wymaga co najwyżej  $F - 1$  kolejnych interakcji między nimi. W obserwowanych sytuacjach tych oddziaływań zwykle potrzeba więcej, ponieważ kolejne oddziaływania nie muszą zachodzić pomiędzy tymi samymi sąsiadami, przez co mogą one prowadzić do zmniejszania podobieństwa między  $A$  i  $B$ . Uzależnienie prawdopodobieństwa oddziaływania od podobieństwa między osobnikami sprawia, że jednostki podobne kontaktują się częściej. Osobniki nieposiadające żadnych wspólnych cech tworzą trwałe, nieprzenikalne granice między obszarami scharakteryzowanymi różnymi ideami (domenami kulturowymi). Dlatego z jednej strony w modelu Axelroda obserwujemy lokalne uzgadnianie opinii, a z drugiej strony – różnicowanie się osobników. Dzieje się tak dlatego, że upodabnianie się do sąsiada  $B$  może zwiększać liczbę różnic z sąsiadem  $C$ . Dzięki temu w stanie końcowym powstałe domeny kulturowe oddzielone są nieprzenikalnymi granicami. Wzrastająca liczba możliwych elementarnych opinii  $q$  prowadzi do większej fragmentacji, ponieważ trudniej jest znaleźć kwestię, w której sąsiedzi są zgodni. W przeciwieństwie do zwiększania  $q$ , wzrost liczby zagadnień  $F$  zmniejsza liczbę



bę domen kulturowych w stanie końcowym, ponieważ większa liczba kwestii, w których należy przyjąć jakieś stanowisko, zwiększa szansę na znalezienie choć jednej zgodnej opinii, w oparciu o którą można uzgadniać stanowiska w pozostałych kwestiach.

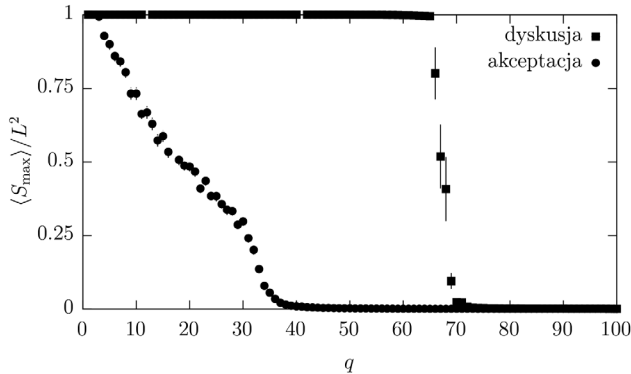
Podstawowa wersja modelu Axelroda zakłada, że agenci umieszczeni są w węzłach regularnej siatki kwadratowej i każdy z nich ma czterech najbliższych sąsiadów. Topologia regularnej siatki kwadratowej o rozmiarze  $L \times L$  i okresowych warunkach brzegowych jest także wyjściową strukturą połączeń w badaniach zmodyfikowanego modelu Axelroda. W stanie początkowym w każdym węźle siatki znajduje się jeden agent, a jego opinia jest losowa – w każdej z  $F$  kwestii przyjmuje on losowo jedno z  $q$  dopuszczalnych stanowisk. W tak przygotowanym układzie agenci zaczynają oddziaływać według reguł opisanych w poprzednim paragrafie. Dlatego spośród  $L^2 = L \times L$  osobników wybieramy jednego, nazwijmy go  $A$ , a następnie spośród czterech jego najbliższych sąsiadów losujemy kolejnego, nazwijmy go  $B$ . Po wybraniu oddziałujących osobników  $A$  i  $B$  obliczamy  $P^{AB}$  i z takim to prawdopodobieństwem dochodzi do wymiany opinii między  $A$  i  $B$ . Procedura losowania oddziałujących agentów jest kontynuowana do momentu powstania klastrów kulturowych oddzielonych nieprzenikalnymi granicami. Taki stan końcowy nie ulega dalszym zmianom, ponieważ w obrębie klastrów agenci są w takim samym stanie, a w różnych klastrach są zupełnie inni.

Uzgadnianie opinii w oryginalnym modelu Axelroda jest powolne, ponieważ podczas każdej interakcji między  $A$  i  $B$  uzgadniana jest tylko jedna kwestia, dodatkowo uzgodnienie zachodzi z prawdopodobieństwem  $P^{AB}$ . Ze względu na brak pamięci, w kolejnych interakcjach agent  $A$  może wymieniać opinie z innym sąsiadem niż  $B$ , co w konsekwencji może prowadzić do zmniejszenia podobieństwa agentów  $A$  i  $B$ . Celem przyspieszenia procesu uzgadniania opinii i formowania się granic między domenami kulturowymi rozważmy dwa schematy, które prowadzą do pełnego uzgodnienia opinii w czasie jednej interakcji [19]. Jeśli podczas uzgadniania opinii agent  $A$  wylosuje sąsiada  $B$ , to z prawdopodobieństwem  $P^{AB}$  następuje pełne uzgodnienie ich opinii na zasadzie (i) zaakceptowania przez odbiorcę  $A$  całej opinii wylosowanego sąsiada  $B$ :  $\sigma_i^A = \sigma_i^B$  lub (ii) dyskusji (wymiany poglądów) – z takim samym prawdopodobieństwem:  $\sigma_i^A \rightarrow \sigma_i^B$  lub  $\sigma_i^B \rightarrow \sigma_i^A$ . Oba schematy zmieniają stanowiska agentów tylko w kwestiach  $i \in \{1, \dots, F\}$ , w których agenci  $A$  i  $B$  różnią się.

Stan końcowy dla modelu Axelroda składa się z domen kulturowych oddzielonych nieprzenikalnymi granicami. Stopień fragmentacji stanu końcowego najlepiej scharakteryzować poprzez parametr porządku. Parametr porządku jest to wielkość, która jest równa 1, gdy w układzie panuje doskonały porządek (wszyscy agenci posiadają taką samą opinię – brak fragmentacji), natomiast w przypadku zupełnego nieporządku (każdy agent posiada inną opinię – pełna fragmentacja) jest równy 0. Przykładowo parametrem porządku może być rozmiar maksymalnego klastra (wielkość największej grupy osobników posiadających taką samą opinię)  $S_{\max}$  podzielony przez całkowitą liczbę agentów  $L^2 = L \times L$ .



Model Axelroda oraz jego zmodyfikowana wersja są modelami stochastycznymi, dlatego dla każdej realizacji modelu wartość parametru porządku będzie inna. Losowe zachowanie modelu jest konsekwencją probabilistycznych reguł oddziaływania oraz losowych stanów początkowych. Dlatego analiza własności stanu końcowego opiera się na badaniu średniego rozmiaru maksymalnego klastra  $\langle S_{\max} \rangle / L^2$ .



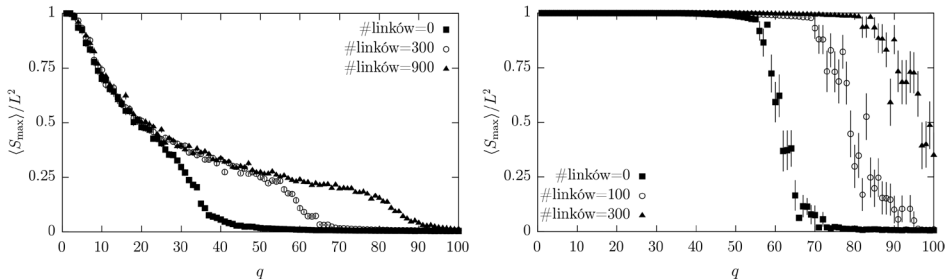
Rys. 1. Zależność parametru porządku, średniego rozmiaru maksymalnego klastra  $\langle S_{\max} \rangle / L^2$ , dla obu scenariuszy uzgadniania opinii [19] w funkcji maksymalnej liczby opinii  $q$ . Różne krzywe odpowiadają różnym sposobom lokalnego uzgadniania opinii: dyskusja „■” i akceptacja „●”.

Układ składa się z  $L \times L = 200 \times 200$  agentów, a liczba cech  $F = 10$

Rys. 1 pokazuje zależność parametru porządku od liczby wartości  $q$ , jaką może przyjmować każda z  $F$  cech ( $F = 10$ ). Dla niewielkich wartości  $q$  został osiągnięty globalny konsensus i wszyscy lub prawie wszyscy agenci należą do dominującego klastra. Wraz ze wzrastającą liczbą wartości, jaką może przyjmować każda cecha, wartość parametru porządku zmniejsza się. Scenariusz zanikania porządku zależy jednak od sposobu uzgadniania opinii. W przypadku (i) akceptacja – obserwujemy stopniowy zanik uporządkowania prowadzący do stanów o większej fragmentacji. Natomiast w przypadku (ii) dyskusja – stan końcowy w szerokim zakresie zmienności  $q$  jest doskonale uporządkowany. Niemniej jednak dla dostatecznie dużego  $q$  także i on jest zatomizowany. Przejście między stanem uporządkowanym a nieuporządkowanym przypomina nieciągłe przejście fazowe. Dla odpowiednio dużych  $q$  stany końcowe są silnie sfragmentowane, a parametr porządku  $\langle S_{\max} \rangle / L^2 \approx 0$ . W sytuacji, w której podczas każdego oddziaływania opinie oddziałujących agentów uzgadniają się w pełni, prawdopodobieństwo  $P^{AB}$  określa tempo dochodzenia do stanu końcowego, ponieważ z prawdopodobieństwem  $1 - P^{AB}$  nie następuje uzgodnienie opinii.

Wyniki przedstawione na rys. 1 odpowiadają sytuacji, gdy agenci umieszczeni są w węzłach regularnej siatki kwadratowej  $L \times L$  z periodycznymi warunkami brzegowymi. Każdy osobnik ma dokładnie czterech sąsiadów, z którymi może uzgadniać poglądy. W rzeczywistych sieciach społecznych wymiana informacji zachodzi nie tylko między najbliższymi sąsiadami, ale także osobnikami znaj-

dującymi się w znacznej odległości geograficznej. Dzieje się tak ze względu na obecność nielokalnych połączeń. Po dodaniu nielokalnych połączeń regularna siatka kwadratowa zamienia się w dwuwymiarowy mały świat [8, 21]. Dla sieci typu małego świata odległość mierzona liczbą linków oddzielających jest o wiele mniejsza niż dla regularnej siatki. W takiej sieci oprócz oddziaływania z najbliższymi sąsiadami zachodzą oddziaływania nielocalne poprzez dodatkowe linki (skrótły).



Rys. 2. Zależność parametru porządku, średniego rozmiaru maksymalnego klastra  $\langle S_{\max} \rangle / L^2$ , dla obu scenariuszy lokalnego uzgadniania opinii: akceptacja (z lewej) oraz dyskusja (z prawej) w funkcji maksymalnej liczby opinii  $q$ . Różne krzywe odpowiadają różnej liczbie nielokalnych połączeń dalekiego zasięgu. Układ składa się z  $L \times L = 50 \times 50$  agentów, a liczba cech  $F = 10$

Zamiana regularnej siatki na dwuwymiarowy mały świat zmienia własności zmodyfikowanego modelu Axelroda. Kolejny rysunek (rys. 2) przedstawia średni rozmiar maksymalnego klastra dla obu przedstawionych sposobów uzgadniania opinii. Lewa kolumna pokazuje wyniki dla pierwszego scenariusza – akceptacja, zaś w prawej kolumnie znajdują się wyniki dla drugiego scenariusza uzgadniania opinii – dyskusja. Poszczególne krzywe pokazują wartości parametru porządku  $\langle S_{\max} \rangle / L^2$  dla różnej liczby nielokalnych połączeń (linków). Wraz ze wzrastającą liczbą połączeń krytyczna liczba elementarnych opinii  $q$ , dla której następuje zupełna fragmentacja układu, wzrasta. Nie zmienia się natomiast charakter przejścia między stanem uporządkowanym a nieuporządkowanym. Powyższe zachowanie spowodowane jest tym, że wzrastająca liczba połączeń zmniejsza liczbę opinii występujących w stanie końcowym. Dla modelu Axelroda można także pokazać, że średni czas potrzebny na osiągnięcie stanu końcowego rośnie wraz ze spadkiem liczby opinii w stanie końcowym. Stany końcowe o większej fragmentacji są osiągnane szybciej niż lokalny lub globalny konsensus. Ustalanie opinii na zasadzie dyskusji prowadzi do powstania większych grup niż w przypadku akceptacji opinii, ale wymaga jednocześnie nieznacznie dłuższego czasu.

## Wartościowanie informacji

W modelu Axelroda agent oddziałuje z jednym ze swoich losowo wybranych sąsiadów z prawdopodobieństwem  $P^{AB}$ . Nie ma w nim także pamięci, w kolejnych oddziaływaniach agent  $A$  może oddziaływać z innym sąsiadem niż poprzednio. Dodatkowo, co najważniejsze, uzyskana informacja (przyjęta elementarna

opinia) nie jest żaden sposób wartościowana. Zobaczmy, jakie znaczenie ma wartościowanie informacji, np. jej wiekiem. W tym celu rozpatrzmy model powstawania centrów kulturowych [20], w którym każdy z agentów będzie posiadał skalarną opinię opisaną dodatnią liczbą całkowitą.

Podczas uzgadniania opinii w modelu Axelroda elementarna opinia osobnika (wartość każdej z cech) jest bezwarunkowo akceptowana, a stanowisko w każdej kwestii jest tak samo ważne. Agent  $A$  dostosowując swoje stanowisko w jakiejś kwestii do stanowiska osobnika  $B$ , nie zastanawia się, czy któreś ze stanowisk jest lepsze. Na dostosowanie stanowiska można spojrzeć jak na proces akceptacji informacji (skalarna opinia) lub jej części (wektorowa opinia) posiadanej przez sąsiada. W przypadku informacji można próbować ją wartościować. Sposobów wartościowania może być wiele, tutaj założymy, że wiek informacji określa jej wartość: informacje nowsze są cenniejsze. W modelu powstawania centrów kulturowych i rozprzestrzeniania się informacji [19], podobnie jak w modelu Axelroda, zakładamy, że  $L^2$  agentów znajduje się na regularnej siatce kwadratowej  $L \times L$  z otoczeniem von Neumanna, czyli każdy osobnik ma czterech (najbliższych) sąsiadów, z którymi może oddziaływać. Dla uproszczenia zakładamy okresowe warunki brzegowe. Każdy osobnik scharakteryzowany jest przez (jedną) posiadaną informację, która jest reprezentowana przez zmienną dyskretną. Dodatkowo każdy agent zna wiek posiadanej informacji, dlatego oddziałując z jakimś z sąsiadów sprawdza nie tylko, czy posiada on inną informację, ale także weryfikuje, czy jest ona nowsza. W przypadku, gdy sąsiad posiada inną informację, która jest nowsza od posiadanej, akceptuje ją. Po każdym przyjęciu nowej informacji, agent pamięta od kogo ją uzyskał. Sąsiad, który dostarczył ostatnią informację staje się preferowanym źródłem informacji. Dlatego w kolejnych oddziaływaniach wybierany jest on z prawdopodobieństwem  $1 - 3p$ , podczas gdy każdy z pozostałych trzech sąsiadów może zostać wylosowany z prawdopodobieństwem  $p$ . Dla  $p \in [0, 1/4)$  sąsiad, który dostarczył ostatnią informację, jest faworyzowany w porównaniu do pozostałych sąsiadów. Mechanizm wyróżniania jednego z sąsiadów wprowadza pamięć do modelu, która dla  $p \rightarrow 0$  prowadzi do bardzo silnego przywiązania do jednego z sąsiadów. Pamięć ta ma kluczowe znaczenie dla własności modelu, to właśnie ona determinuje, który z sąsiadów staje się preferowanym źródłem informacji i jak łatwo zmienia się sieć, przez którą są przesyłane informacje.

Samo wartościowanie informacji oraz pamięć o ostatnim źródle informacji nie wystarcza do nieoczywistego zachowania modelu. Jeśli w układzie zostanie umieszczona jakaś informacja, to po dostatecznie długim czasie zostanie ona zaakceptowana przez wszystkie osobniki, a każdy agent będzie pamiętał, od kogo ją uzyskał. Dlatego w takim przypadku dynamika układu jest w pełni przewidywalna. Ciekawsza sytuacja wystąpi wtedy, gdy pojawi się konkurencja pomiędzy nowymi informacjami pochodzącymi z różnych źródeł. Jeśli takie informacje będą pojawiały się rzadko, to będą przyjmowane przez wszystkich agentów. Preferencja w nasłuchiowaniu sąsiada, który dostarczył ostatnią zaakceptowaną

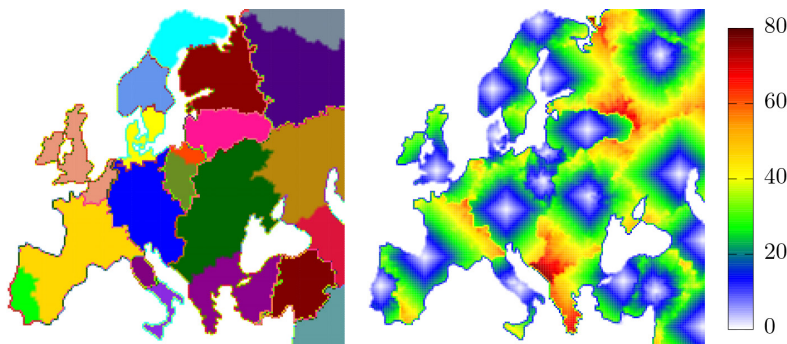
informację, może spowalniać przyjęcie nowej. Z interesującą sytuacją będziemy mieć do czynienia dopiero wtedy, gdy różne informacje będą konkurowały między sobą. Warunkiem prawdziwej konkurencji jest zdolność do ponownego wysyłania nowych informacji przez osobników, którzy w przeszłości już wysyłali informacje. Wysyłanie nowych informacji jest mechanizmem, który zabezpiecza agenta przed przyjęciem konkurencyjnej informacji, zaś takiego agenta możemy nazwać źródłem informacji lub określić go jako centrum kulturowe.

Minimalny model rozprzestrzeniania się informacji i powstawania centrów kulturowych, prowadzący do nietrywialnej dynamiki, jest zdefiniowany przez trzy prawdopodobieństwa:  $p$ ,  $p_{\text{new}}$  oraz  $p_{\text{rep}}$ . Tak jak poprzednio,  $p$  jest miarą asymetrii w wyborze sąsiadów, z którymi dochodzi do interakcji. W każdym kroku symulacji podejmowana jest próba utworzenia jednego nowego centrum kulturowego w losowo wybranym węźle siatki z prawdopodobieństwem  $p_{\text{new}}$ , wysłania nowych sygnałów przez każde z istniejących źródeł informacji z prawdopodobieństwem  $p_{\text{rep}}$  oraz próby uaktualnienia informacji posiadanej przez każdego z  $L^2$  agentów. Próba utworzenia nowego centrum kulturowego jest podejmowana przez jednego, losowo wybranego agenta jednokrotnie na każdy krok symulacji z niewielkim prawdopodobieństwem  $p_{\text{new}}$ . Dodatkowo, każde istniejące centrum kulturowe próbuje uaktualnić, z prawdopodobieństwem  $p_{\text{rep}}$ , wysłaną przez siebie informację poprzez zresetowanie jej wieku. Uaktualnianie informacji jest kluczowe dla trwałości istniejących centrów kulturowych, ponieważ źródło informacji jest aktywne tak długo, jak tworzący je agent nie zaakceptuje nowej informacji, różnej od dotychczas przez niego posiadanej. Ostatnim elementem pojedynczego kroku symulacji jest uaktualnienie stanu każdego z  $L^2$  osobników. Uaktualniana jednostka poszukuje lokalnie nowszej informacji poprzez sprawdzanie, jakie informacje posiadają najbliżsi sąsiedzi. Prawdopodobieństwo  $p$  określa asymetrię w ich nasłuchiowaniu. Agent, który dostarczył ostatnią informację jest wybierany z prawdopodobieństwem  $1 - 3p$ , a każdy z trzech pozostałych sąsiadów z prawdopodobieństwem  $p$  ( $0 \leq p < 1/4$ ). Podczas takiego oddziaływania agent może zaakceptować inną nowszą informację niż posiadana lub zaktualizować wiek już posiadanej informacji, gdyby pojawiła się jej odświeżona wersja. Wiek informacji jest mierzony liczbą kroków symulacji od czasu wysłania informacji lub momentu jej aktualizacji (zresetowania). W przypadku zaakceptowania nowej informacji, faworyzowanym sąsiadem staje się ten, który ją dostarczył. Dlatego, w granicy  $p \rightarrow 0$ , zmiany faworyzowanych sąsiadów zachodzą coraz rzadziej, przez co sieć, przez którą następuje przepływ informacji, staje się bardziej statyczna.

W ramach trójparametrowego modelu powstawania centrów kulturowych i rozprzestrzeniania się informacji możliwe jest (i) określenie mechanizmów gwarantujących trwałość centrów kulturowych i ich odporność na ataki oraz (ii) wyznaczenie optymalnych miejsc na umieszczenie nowych źródeł informacji.

Osobnik stanowiący centrum kulturowe, podobnie jak każdy inny z agentów tworzących układ, może zaakceptować nowszą informację. Dla „normal-

nego” agenta niebędącego centrum kulturowym może to oznaczać znalezienie się w strefie wpływów innego źródła informacji, natomiast jeśli agent będący centrum kulturowym przyjmie nową informację, to przestaje pełnić tę funkcję. Ponieważ nowsza informacja uważana jest za bardziej wartościową, o trwałości istniejących centrów kulturowych decyduje częstotliwość wysyłania nowych sygnałów ( $p_{rep}$ ) oraz łatwość, z jaką może zmieniać się sieć preferowanych kierunków ( $p$ ). Wysyłanie nowych informacji jest kluczowe, aby w okolicach centrum kulturowego nie pojawiła się nowsza, konkurencyjna informacja. Samo wysyłanie nowych sygnałów nie zabezpiecza centrum kulturowego w pełni oraz nie sprawia, że grupa osób czerpiących z tego centrum informacji będzie duża. Dla rozmiaru domen kulturowych i ich trwałości znaczenie ma także, jak łatwo agenci zmieniają swoje preferowane źródła informacji. Statyczna sieć preferencji  $p \rightarrow 0$  połączona z częstym wysyłaniem nowych sygnałów, pozwala na tworzenie trwałych grup agentów posiadających tę samą informację.

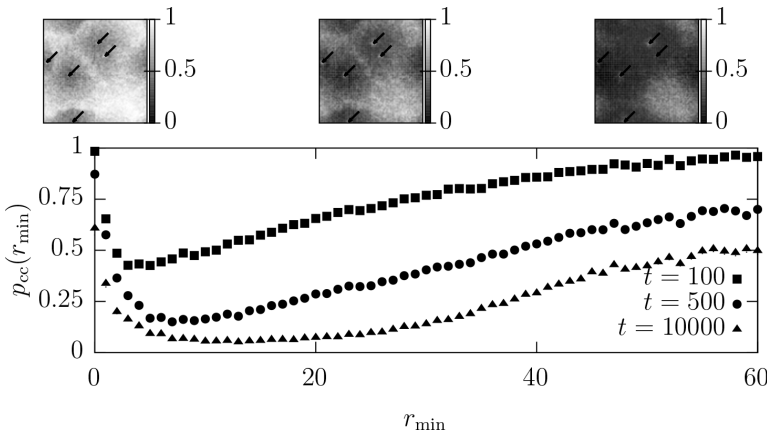


Rys. 3. Przykładowe domeny kulturowe tworzące się w modelu powstawania i rozwoju centrów kulturowych [20]. Rysunek z lewej pokazuje różne domeny kulturowe, a z prawej odległości od odpowiednich źródeł informacji (centrów kulturowych). Domeny kulturowe (rysunek z lewej) oznaczone są różnymi kolorami, a odpowiadające im centra kulturowe znajdują się środkach białych ognisk (rysunek z prawej). Parametry symulacji:  $p = 0,01$ ,  $p_{new} = 2^{-10}$  oraz  $p_{rep} = 2^{-2}$

Omawiany model prowadzi do podziału całego układu na strefy wpływów poszczególnych centrów kulturowych. Obszarem, w którym następuje najsilniejsza konkurencja między różnymi centrami kulturowymi, są granice między kłastami. To osobnicy będący na granicy, mogą najłatwiej zmienić posiadaną informację. Trwałość granic określona jest poprzez parametr  $p$ . Im mniejsze  $p$ , tym granice stają się bardziej statyczne. Znaczenie ma także odległość od centrum kulturowego. Bliższe centrum szybciej dostarcza nowe informacje, ponieważ szlak komunikacyjny: źródło informacji – granica między domenami kulturowymi jest krótszy. W ogólności o trwałości domen kulturowych mogą decydować naturalne przeszkody, utrudniające dostęp do niektórych węzłów siatki. Na przykładzie uproszczonej mapy Europy, numeryczne badanie modelu powstawania centrów kulturowych pokazuje, że trwałe centra mogą istnieć na wyspach i półwyspach [20]. Wyspy i półwyspy jako miejsca izolowane mają krótsze granice z innymi

domenami kulturowymi. Dodatkowo, rozprzestrzenianie się informacji zachodzi na zasadzie dyfuzji, stąd informacjom z zewnątrz trudniej jest je osiągnąć. Rys. 3 pokazuje przykładowe domeny kulturowe na mapie Europy (z lewej) wraz z odległościami do odpowiednich centrów kulturowych (z prawej) [20]. Mapa Europy została umieszczona na siatce  $200 \times 200$ , a odległość między agentami mierzona jest rzędem sąsiedztwa.

Pamięć o poprzednich oddziaływaniach, podczas których została uaktualniona posiadana informacja, buduje korytarze komunikacyjne, którymi efektywnie może być przekazywana informacja z centrów kulturowych. Dla małych  $p$  ścieżki te podlegają niewielkim fluktuacjom i działają bardzo sprawnie. Każde nowe źródło informacji zostaje umiejscowione na jakimś istniejącym już szlaku komunikacyjnym. Dolna jego część zostaje wykorzystana do rozsyłania nowych sygnałów, podczas gdy górna część prowadzi do uprzednio istniejącego centrum kulturowego. Dlatego istnieje realne zagrożenie, że dzięki górnej części ścieżki komunikacyjnej w okolicach nowego centrum kulturowego pojawi się konkurencyjna informacja, która będzie zagrożeniem dla właśnie założonego centrum kulturowego.



Rys. 4. Prawdopodobieństwo przeżycia nowo dodanego źródła informacji [20] – prawdopodobieństwo, że źródło informacji umieszczone w określonym punkcie  $(x, y)$  w chwili  $t = 0$  będzie nadal występować w układzie w chwili  $t$ . Mapy w górnym panelu pokazują prawdopodobieństwa istnienia nowo dodanego źródła informacji jako funkcję położenia  $(x, y)$  dla  $t \in \{100, 500, 10\,000\}$ . Dolny wykres pokazuje prawdopodobieństwo przeżycia  $p_{cc}(r_{\min})$  jako funkcję odległości  $r_{\min}$  od najbliższego źródła informacji. Układ składa się z  $100 \times 100$  agentów. Pozostałe parametry:  $p = 0,01$ ,  $p_{\text{new}} = 2^{-10}$  oraz  $p_{\text{rep}} = 2^{-2}$

W celu dokładnego zbadania, które miejsca pozwalają na założenie najtrwałszych centrów kulturowych, określono, jakie miejsca w układzie są najlepsze na umieszczenie nowych, trwałych źródeł informacji. W tym celu na regularnej siatce kwadratowej  $100 \times 100$  przygotowano konfigurację początkową z ukształtowaną siecią preferencji oraz pięcioma centrami kulturowymi, położenie których wskazują strzałki w górnym panelu rysunku 4. Dla tak przygotowanego stanu początkowego, dla każdego z  $L^2 - 5 = 10^4 - 5$  węzłów poprzez kilkudziesięcio-



krotne uśrednienie, wyznaczono prawdopodobieństwo przeżycia źródła informacji umieszczonego w tym punkcie. Górny panel rys. 4 przedstawia dwuwymiarowe mapy demonstrujące, jakie jest prawdopodobieństwo, że źródło informacji umieszczone w węźle  $(x, y)$  istnieje nadal w czasie  $t \in \{100, 500, 10\,000\}$ . Natomiast dolny wykres pokazuje, jakie jest prawdopodobieństwo przeżycia centrum kulturowego  $p_{cc}$  w tych samych chwilach czasu w funkcji odległości  $r_{min}$  do najbliższego istniejącego źródła informacji. Analiza ta wskazuje, że miejscami, które dają największe szanse na założenie trwałego centrum kulturowego, są punkty w bezpośrednim sąsiedztwie istniejących źródeł informacji lub miejsca możliwie najbardziej odległe od istniejących centrów. Pierwszy scenariusz pozwala na przejście znacznej części istniejącej struktury komunikacyjnej, podczas gdy drugi pozwala na znalezienie niszy i zbudowanie własnej sieci połączeń.

## Podsumowanie

Symulacje komputerowe, w szczególności te wykorzystujące techniki automatów komórkowych, pozwalają na badanie wirtualnych społeczeństw. Eksperymenty *in silico* pozwalają na weryfikację różnorodnych hipotez oraz określenie znaczenia przyjętych założeń i uproszczeń. Dzięki nim możliwa jest identyfikacja oraz modyfikacja czynników określających zachowania badanych układów. Wszystko to sprawia, że automaty komórkowe i modelowanie agentowe trwale zagościły między innymi w socjofizyce, obliczeniowych naukach społecznych i modelowaniu epidemiologicznym.

Na przykładzie dwóch wybranych modeli socjoficznych pokazano, jak złożoność opinii i sposób ich uzgadniania wpływa na rozmiar i trwałość grup scharakteryzowanych tą samą opinią. Pokazano także, jakie znaczenie dla wielkości domen kulturowych ma kierunkowość przepływu informacji i jej ocena. Pomimo tego, że przedstawione modele opierają się na szeregu uproszczeń, pozwalają one na wyciągnięcie wielu wniosków, które można skonfrontować z realnymi sytuacjami. W przypadku złożonych (wektorowych) opinii, większe grupy społeczne powstają, gdy wspólne stanowisko ustalane jest na zasadzie konsensusu, a nie jest narzucone lub bezwiednie akceptowane [19]. Dzięki mechanizmowi konsensusu powstałe grupy są trwalsze, niemniej jednak ich rozpad jest możliwy. Jeśli mamy do czynienia z rozpadem grup powstałych w wyniku szerokiej dyskusji, ich rozpad jest bardzo gwałtowny i następuje powyżej krytycznej liczby możliwych stanowisk w kwestiach tworzących opinie. Trwałe struktury społeczne mogą powstać także w układach, w których następuje ciągły przepływ (dopływ) informacji połączony z silnym przywiązaniem (uzależnieniem) od wybranych źródeł informacji [20]. W takich układach trwałość grup społecznych może zostać wzmocniona dzięki przeszkodom o charakterze geograficznym. Dlatego grupy istniejące na wyspach czy izolowanych półwyspach są trwalsze. Uwzględnienie dodatkowych oddziaływań dalekiego zasięgu pozwala na powstanie większych grup społecznych, które ze względu na osłabienie pozycji istniejących centrów kulturowych stają się mniej trwałe.

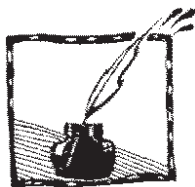


Analizując model rozprzestrzeniania się informacji i powstawania centrów kulturowych [20], można zidentyfikować wiele zjawisk spotykanych w rzeczywistych układach. Utrzymanie dużych domen kulturowych wymaga nieustannego wysyłania nowych informacji (szum informacyjny). Ze względu na rosnącą długość ścieżek komunikacyjnych przesyłanie informacji staje się trudniejsze – to właśnie zwykle granice między obszarami są najbardziej oddalone od centrów kulturowych. Proces przesuwania się granic między domenami kulturowymi zachodzi na zasadzie dyfuzji, zaś faworyzowanie jednego z sąsiadów w granicy  $p \rightarrow 0$  prowadzi do powstawania baniek informacyjnych.

Badane modele, pomimo swojej koncepcyjnej prostoty, pozwalają na obserwację, klasyfikację i kwantyzację wielu interesujących efektów. W badanych modelach struktura połączeń między osobnikami określa, kto z kim oddziałuje. W realnych sytuacjach struktura połączeń nie jest statyczna, ale ewoluuje wraz ze zmianami zachodzącymi w układzie. Wyraźnie widać to w czasie epidemii Covid19, kiedy to sieci kontaktów uległy znaczącym zmianom. Dlatego w ogólności dynamika modeli społecznych czy epidemiologicznych powinna być powiązana z dynamiką struktury połączeń między osobnikami. Dla właściwego określenia związku między dynamiką modelu a dynamiką sieci kontaktów konieczna jest identyfikacja skal czasowych, które określają tempo zachodzących procesów. Badanie dynamicznych sieci społecznych wydaje się szczególnie interesującym zagadnieniem.

## Wybrana literatura

- [1] C. Castellano, S. Fortunato, and V. Loreto, *Rev. Mod. Phys.* **81**, 591 (2009).
- [2] A. Jędrzejewski and K. Sznajd-Weron, *C. R. Physique* **20**, 244 (2019).
- [3] W. Bartkowski and D. Batorski, *Studia Socjologiczne* **1**, 113 (2003).
- [4] W. Weidlich, *Sociodynamics: A systematic approach to mathematical modelling in the social sciences* (Harwood Academic, Reading, 2000).
- [5] S. Wolfram, *A new kind of science* (Wolfram Media, Champaign, IL, 2002).
- [6] K. Kułakowski, *Automaty komórkowe* (Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica. Ośrodek Edukacji Niestacjonarnej, Kraków, 2000).
- [7] M. E. J. Newman and G. T. Barkema, *Monte Carlo methods in statistical physics* (Clarendon Press, Oxford, 1999).
- [8] R. Albert and A. L. Barabasi, *Rev. Mod. Phys.* **74**, 47 (2002).
- [9] H. W. Hethcote, *SIAM Rev.* **42**, 599 (2000).
- [10] R. A. Holley and T. M. Liggett, *Ann. Probab.* **3**, 643 (1975).
- [11] M. Lewenstein, A. Nowak, and B. Latané, *Phys. Rev. A* **45**, 763 (1992).
- [12] S. Galam, *Eur. Phys. J. B* **25**, 403 (2002).
- [13] K. Sznajd-Weron and J. Sznajd, *Int. J. Mod. Phys. C* **11**, 1157 (2000).
- [14] G. Deffuant, D. Neau, F. Amblard, and G. Weisbuch, *Adv. Complex Syst.* **3**, 87 (2000).
- [15] R. Hegselmann and U. Krause, *J. Artif. Soc. Soc. Simulat.* **5**, 2 (2002).
- [16] B. M. McCoy and T. T. Wu, *The two-dimensional Ising model* (Dover Publications, Mineola, 2014).
- [17] S. Wolfram, *Rev. Mod. Phys.* **55**, 601 (1983).
- [18] R. Axelrod, *J. Confl. Resolut.* **41**, 203 (1997).
- [19] B. Dybiec, N. Mitarai, and K. Sneppen, *Eur. Phys. J. B* **85**, 357 (2012).
- [20] B. Dybiec, N. Mitarai, and K. Sneppen, *Phys. Rev. E* **85**, 056116 (2012).
- [21] D. J. Watts and S. H. Strogatz, *Nature (London)* **393**, 440 (1998).



## Od rtęci do błon biologicznych – historia rozwoju teorii FRET

Anna Drożdż

Zakład Fizyki Medycznej WFAIS UJ

Zjawisko znane jako *Förster resonance energy transfer* lub (mniej poprawnie) *Fluorescence resonance energy transfer* (FRET) jest obecnie szeroko stosowane jako narzędzie śledzenia procesów biologicznych, takich jak: oddziaływania typu ligand-receptor, oligomeryzacja, proteoliza czy aktywacja kompleksów białkowych, w których znaczenie ma odległość (w skali  $<10$  nm) pomiędzy poszczególnymi molekułami. Jednak opis tego zjawiska zawdzięczamy nie tylko niemieckiemu fizykowi Thomasowi Försterowi, ale również wielu innym naukowcom, którzy byli dla Förstera inspiracją oraz tym, którzy wykorzystali ten efekt w swoich badaniach.

### Dwa słowa o Theodorze Försterze

Theodor Förster urodził się 15 maja 1910 roku we Frankfurcie nad Menem. W 1929 roku rozpoczął studia matematyczno-fizyczne na uniwersytecie w swoim rodzinnym mieście, tam też w 1933 roku obronił pracę doktorską zatytułowaną *Polaryzacja elektronów poprzez odbicie*. Swoją karierę naukową kontynuował jako asystent na uniwersytecie w Lipsku. Były to prace teoretyczne nad strukturą elektronową atomów węgla oraz absorpcją światła przez związki organiczne, co opisał w swoim późniejszym zbiorze publikacji [1]. Po zakończeniu II Wojny Światowej pracował w Instytucie Maxa-Plancka w Getyndze, gdzie prowadził swoje najważniejsze badania teoretyczne oraz eksperymenty dotyczące transferu energii. W 1946 roku opublikował jedną ze swoich najważniejszych prac zatytułowaną *Migracja energii i fluorescencja* [2].

### Podstawowe założenia FRET

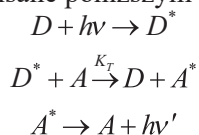
FRET jest to zjawisko, które w największym skrócie polega na nieradiacyjnym przeniesieniu energii ze wzbudzonego *donora* do *akceptora*<sup>1</sup>. Wskutek tego **akceptor** ulega wzbudzeniu i może wyemitować energię w postaci np. fotonu. Aby transfer energii pomiędzy akceptorem i donorem mógł dojść do skutku, muszą zostać spełnione podstawowe warunki:

- **donor i akceptor** muszą posiadać silne przejście elektronowe (ang. *strong electronic transitions*) w UV, świetle widzialnym lub podczerwieni,

<sup>1</sup> Donor i akceptor – w teorii FRET donor jest to wzbudzona cząsteczka, która w sposób nieradiacyjny przekazuje energię do akceptora, a akceptor, wracając do stanu podstawowego, emituje kwant promieniowania obserwowany jako fluorescencja.

- widmo emisji **donora** musi pokrywać się z widmem absorpcji **akceptora**,
- **donor i akceptor** muszą znajdować się w bliskim sąsiedztwie,
- wydajność kwantowa<sup>2</sup> emisji donora musi być wystarczająco wysoka [3].

Transfer energii może wyrażać się np. poprzez zmniejszenie intensywności fluorescencji **donora**, któremu towarzyszy wzrost intensywności fluorescencji **akceptora** [4], co może być opisane poniższym równaniem:



D(D\*) – donor (donor w stanie wzbudzonym)

A(A\*) – akceptor (akceptor w stanie wzbudzonym)

$K_T$  – wydajność transferu energii<sup>3</sup>

Wydajność transferu energii zależy od czasu życia **donora** w stanie wzbudzonym w nieobecności **akceptora** ( $\tau_D$ ), promienia Förstera ( $R_0$ ) oraz odległości pomiędzy **donorem i akceptorem** ( $R$ ).

$$K_T = \frac{1}{\tau_D} \left( \frac{R_0}{R} \right)^6$$

Natomiast promień Förstera ( $R_0$ ) opisuje dystans, w którym prawdopodobieństwo emisji fluorescencji ze wzbudzonego **donora** jest równe prawdopodobieństwu transferu energii do **akceptora**. Zazwyczaj ta odległość przyjmuje wartości od 1 do 10 [nm], a największą wydajność FRET, a co za tym idzie największą jego czułość, obserwuje się, jeżeli **donor i akceptor** znajdują się w odległości od  $0,5 R_0$  do  $1,5 R_0$ .

Dzięki opisanym wyżej zależnościom FRET jest szeroko wykorzystywany do prowadzenia badań, dla których istotna jest odległość lub zmiana odległości pomiędzy molekułami.

### Heisenberg, Förster, Oppenheimer – historia badań nad zjawiskiem FRET

Badania, które stworzyły podwaliny dla rozwoju techniki FRET, rozpoczęto jeszcze pod koniec XIX i na początku XX wieku. Wtedy to, dzięki badaniom Heisenberga, Schrödingera czy Diraca, zjawiska elektromagnetyzmu i fizyki kwantowej zaczęły być coraz bardziej zrozumiałe [5].

W 1922 roku Gunter Cario<sup>4</sup> i James Franck<sup>5</sup> opublikowali kilka prac dotyczących transferu energii na odległości większe niż promienie kolizyjne (*lac. col-*

<sup>2</sup> Wydajność kwantowa emisji – liczba wyemitowanych kwantów promieniowania.

<sup>3</sup> Wydajność transferu energii – ilość energii wymienionej pomiędzy donorem a akceptorem.

<sup>4</sup> Gunter Cario (1897–1984) – niemiecki fizyk, uczeń Jamesa Francka.

<sup>5</sup> James Franck (1882–1964) – niemiecki fizyk, laureat Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki w roku 1925 za odkrycie praw rządzących zderzeniami elektronu z atomem. Wyniki jego badań potwierdziły istnienie dyskretnych poziomów energetycznych.

*lision radii*) w układach zawierających rtęć (Hg). Cairo zaobserwował emisję promieniowania o długości charakterystycznej dla talu (Tl) z oparów mieszaniny rtęci i talu (Hg/Tl), kiedy była ona wzbudzana falą o długości 253,5 [nm], co odpowiada długości fali wzbudzenia atomów rtęci [6]. Cario nazwał to zjawisko fluorescencją sensybilizowaną (ang. *sensitized fluorescence*). W kolejnych eksperymentach Cario i Franck zaobserwowali podobne zjawisko w przypadku par mieszaniny rtęci i wodoru (Hg/H) [7]. Krótco po tym ukazało się też wiele prac opisujących zjawisko fluorescencji sensybilizowanej w mieszaninach par rtęci (Hg) z parami srebra (Ag), kadmu (Cd), ołowiu (Pb) czy cynku (Zn) [8]. Dla teoretycznych prac Förstera podstawą stała się zasada Francka: *Jeżeli ma zajść wydajny transfer energii ze wzbudzonej molekuly do molekuly wygaszającej, stan wzbudzony molekul wygaszających musi być w rezonansie energetycznym z pierwotnie wzbudzonym stanem*<sup>6</sup> [9].

W 1928 roku Hartmut Kallmann<sup>7</sup> i Fritz London<sup>8</sup> zaprezentowali teorię, w której niemal kompletnie udało im się opisać rezonansowy mechanizm transferu energii. Teoria ta może być uznana za prekursorską dla badań Förstera. Opisali oni kwantowy mechanizm transferu energii pomiędzy atomami oddalonymi od siebie o dystans większy niż promień kolizyjny. Jeżeli dane przejście jest dozwolone ze względu na regułę wyboru dipola (ang. *dipole selection rule*), efektywny przekrój czynny przejścia ( $q$ ) jest proporcjonalny do  $\sigma^{-3}$ , gdzie  $\sigma$  oznacza różnicę pomiędzy energią wzbudzenia dwóch oddziałujących systemów. Jeżeli  $\sigma \rightarrow 0$ , to przekrój czynny zbliża się do wartości granicznej, która jest znacznie większa niż promień kolizyjny [10]. Niestety, przyjęte przez nich błędne parametry skutkowały niepoprawnym oszacowaniem dotyczącym odległości.

Kilka lat później Jean-Baptiste Perrin<sup>9</sup> wraz ze swoim synem Francisem Perrinem<sup>10</sup> wyjaśnili proces transferu energii pomiędzy dwoma identycznymi molekułami w roztworze, który zachodzi poprzez oddziaływania międzycząsteczkowe typu dipol-dipol. Oni jako pierwsi zauważyli, że transfer energii jest zależny od odległości pomiędzy molekułami i zachodzi tylko dla specyficznych odległości, które według ich oszacowania wynosiły pomiędzy 15 a 25 nm [11, 12]. Odległość

<sup>6</sup> Tłumaczenie z angielskiego: *If effective energy transfer is to take place from initially excited molecules to quenching molecules, the excited states of the quenchers must be in energy resonance with the primarily excited states.*

<sup>7</sup> Hartmut Kallmann (1896-1978) – niemiecki fizyk, wynalazca liczników scyntylicyjnych do pomiarów promieniowania Gamma.

<sup>8</sup> Fritz London (1900-1945) – urodzony we Wrocławiu polsko-niemiecki fizyk żydowskiego pochodzenia. Zajmował się fizyką kwantową i nadprzewodnictwem oraz teorią wiązania chemicznego i sił międzycząsteczkowych (siły Londona); był pięciokrotnie nominowany do Nagrody Nobla w dziedzinie chemii.

<sup>9</sup> Jean Baptiste Perrin (1870-1942) – francuski fizyk, laureat Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki za prace dotyczące nieciągłej budowy materii, a szczególnie za odkrycie równowagi w procesach osadzania.

<sup>10</sup> Francis Perrin (1901-1992) – francuski fizyk, syn Jean Baptiste Perrina, był francuskim delegatem na konwencji, w trakcie której podpisano porozumienie w sprawie utworzenia CERN, a kolejno przez wiele lat pozostawał francuskim delegatem w radzie CERN.

ta była znacznie większa niż odległość obliczona przez Förstera. Błąd wynikał z niepoprawnego oszacowania, że szybkość transferu energii jest proporcjonalna do  $\frac{1}{R^3}$ , gdzie  $R$  oznacza dystans pomiędzy cząsteczkami. Förster obliczył, że proporcja ta wynosi  $\frac{1}{R^6}$ , co daje odległość od około 1 do 10 [nm] i odpowiada danym uzyskanym na drodze eksperymentalnej.

W 1946 roku Theodor Förster opublikował swoją pierwszą pracę dotyczącą mechanizmów transferu energii [13]. W pracy tej opisał teoretyczne podstawy swojej teorii. Przeprowadził krytyczną dyskusję<sup>11</sup> mechanizmów zaproponowanych przez J.B. Perrina i F. Perrina i kolejno wprowadził trzy podstawowe założenia, które pozwoliły mu w sposób kwantowy wyprowadzić teorię nieradiacyjnego transferu energii [14]: (1) wziął pod uwagę szerokie spektra emisji **donora** i absorpcji **akceptora**, (2) opracował ilościową teorię szybkości transferu energii od wzbudzonej cząsteczki **donora** do cząsteczki **akceptora** w stanie podstawowym, (3) wyprowadził wzór na zależność odległościową pomiędzy interakcjami dipol-dipol oraz wzór na wartość  $R_0$  dla danego układu, która dzisiaj nazywana jest promieniem Förstera<sup>12</sup>.

W rozwój badań nad teorią transferu energii mieli też swój wkład Julius Robert Oppenheimer<sup>13</sup> i William Arnold. W 1950 [15] zaproponowali mechanizm transferu energii z fotocyaniny do chlorofilu w cyjanobakteriach. Mechanizm ten zakładał trzy sposoby transferu energii: (1) przez bezpośrednią kolizję, (2) emisję i reabsorpcję oraz (3) wewnętrzną konwersję. Założyli, że najbardziej prawdopodobny jest trzeci z mechanizmów i obliczyli, że transfer energii z fotocyanin do przypadkowo rozmieszczonego chlorofilu (co jest teoretycznym założeniem na potrzeby obliczeń) jest zależny od odległości.

Po opublikowaniu teorii FRET w roku 1946, przechodziła ona dalszy rozwój oraz była uzupełniana przez kolejnych naukowców. Warto tutaj wspomnieć chociażby o Davidzie L. Dexterze,<sup>14</sup> który rozszerzył teorię Förstera o pojęcia **donora i akceptora** z zachodzącymi na siebie orbitalami elektronowymi [16]. Z kolei Igor Medintz<sup>15</sup> i Hedi Mattoussi<sup>16</sup>, pokazali możliwość wykorzystania teorii FRET, bazującej na kropkach kwantowych w badaniach biologicznych [17].

<sup>11</sup> William Howard Arnold (ur. 1931) – amerykański fizyk jądrowy, zajmował się reaktorami jądrowymi oraz założył pierwsze w Stanach Zjednoczonych prywatne laboratorium wzbogacania uranu.

<sup>12</sup> Dokładny sposób wyprowadzenia wzoru wraz z komentarzem przedstawiony jest chociażby w książce *FRET – Förster Resonance Energy Transfer From Theory to Applications* (Medintz I, Hildebrandt N, editors. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH; 2014. p. 23-59, definicja promienia podana jest w kolejnym podrozdziale.

<sup>13</sup> Julius Robert Oppenheimer (1904-1967) – amerykański fizyk jądrowy, kierownik Projektu Manhattan, nazywany jest ojcem bomby atomowej.

<sup>14</sup> David L. Dexter (1925-1981) – amerykański fizyk, profesor na University of Rochester.

<sup>15</sup> Igor Medintz – kierownik Laboratory of Bio/Nano Science and Technology na U.S. Naval Research Laboratory in Washington D.C.

<sup>16</sup> Hedi Mattoussi – profesor na Florida State University.

## Wykorzystanie FRET w badaniach błon biologicznych

Zastosowanie techniki FRET w badaniach biologicznych najczęściej sprowadza się do pomiaru zmiany w intensywności widma emisyjnego **donora** i **akceptora** lub obserwacji zabarwienia próbek biologicznych. Jak wspomniano wcześniej, widma absorpcji i emisji **donora** i **akceptora** muszą się na siebie nakładać, z tego względu w badaniach stosuje się pary określonych barwników fluorescencyjnych (Tab.1). Dodatkowo barwniki te mogą być przyłączone do określonych cząsteczek np. lipidów, dzięki czemu można je wprowadzić do błon lipidowych.

Tab.1. Przykłady par FRET (donor i akceptor). Opis użytych skrótów:

EGFP – Enhanced Green Fluorescent Protein, FITC – Fluorescein isothiocyanate,

TRITC – Tetramethylrhodamine

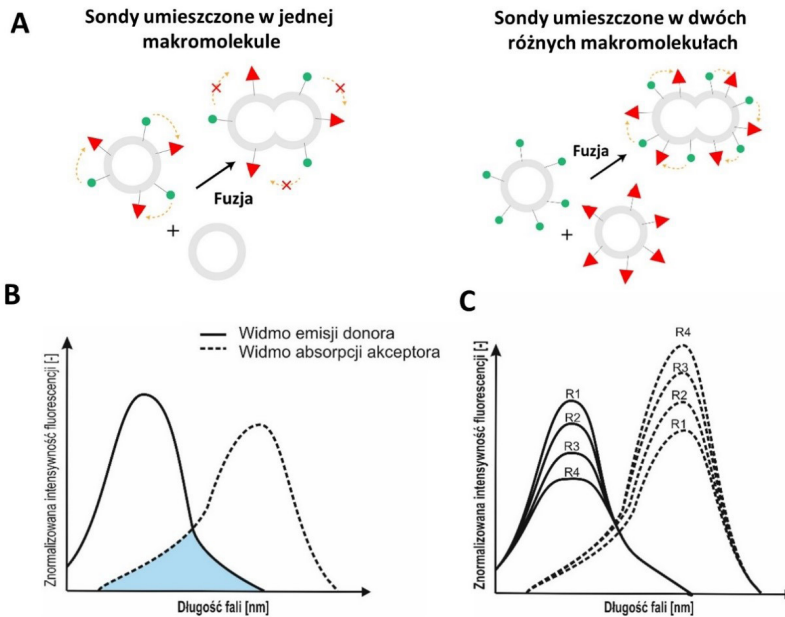
Donor	Akceptor	Maksimum wzbudzenia donora [nm]	Maksimum emisji akceptora [nm]	Promień Förstera [nm]
EGFP	Alexa Fluor 555	484	568	6,3
FITC	TRITC	494	572	5,4
Atto 488	Atto 647N	501	670	5,1

W badaniach nad błonami biologicznymi i wymianą lipidów można stosować dwie strategie eksperymentalne – obserwację zaniku fluorescencji akceptora lub jej wzrost/pojawienie się. Pierwsza strategia polega na wprowadzeniu donora i akceptora do jednej makromolekuły i obserwacji oddalania się od siebie sond wskutek wbudowywania się ich w inną strukturę. Odległości między donorem a akceptorem stają się zbyt duże, aby mogło zajść zjawisko FRET, przez co obserwujemy stopniowy zanik intensywności fluorescencji akceptora. Jedno z pierwszych badań, które wykorzystało taką strategię do śledzenia mieszania się błon biologicznych, przeprowadzone zostało przez Douglasa Strucka [18]. W badaniu tym śledzono mieszanie się błon liposomów zbudowanych z fosfatydyloseryny. Eksperyment został zaprojektowany tak, że do jednej porcji liposomów wprowadzono dwie sondy fluorescencyjne (donora – NBD, ang. *nitrobenzoxadiazole* i akceptora – rodaminę), a kolejno wyznakowane liposomy wymieszano z liposomami nieznakowanymi. W wyniku fuzji doszło do „rozcieńczenia” znakowanej błony lipidami z nieznakowanych liposomów. Przez wzrost odległości pomiędzy donorem a akceptorem znacząco obniżyła się wydajność FRET, co można było obserwować jako spadek intensywności fluorescencji akceptora i wzrost intensywności fluorescencji donora.

W przypadku drugiej strategii, jako wyniku pozytywnego oczekujemy zbliżenia się sond na odległości umożliwiające zajście FRET, co objawia się wzrostem intensywności fluorescencji **akceptora** lub jej pojawianiem się oraz równoczesnym spadkiem intensywności fluorescencji **donora**. Strategia ta polega na wprowadzeniu sondy fluorescencyjnej (np. **donora**) do jednej makromolekuły np. liposomu, a następnie inkubacji ze strukturą, w którą wbudowana jest sonda z **akceptorem**. Jeżeli dochodzi do połączenia się struktur, a co za tym idzie zbliżenia się **donora**



i **akceptora** na wystarczającą odległość, zajdzie FRET, o czym świadczył będzie wzrost wydajności fluorescencji **akceptora** lub jej pojawienie się. W ten sposób zaprojektował swój eksperyment Geert van den Bogaart [19] do badań nad kompleksami proteinowymi znajdującymi się w błonie komórek eukariotycznych (SNARE – *ang. soluble N-ethylmaleimide-sensitive receptors complex*)<sup>17</sup>, które odpowiedzialne są za fuzję błon. W momencie, w którym przeprowadzono badania, nie było wiadomo, czy ilość kompleksów SNARE wpływa na wydajność fuzji błon. Aby to zbadać, zaprojektowano eksperyment, który polegał na sporządzeniu dwóch rodzajów liposomów (1) zawierających jeden barwnik fluorescencyjny oraz kompleks SNARE oraz (2) liposomów zawierających drugi barwnik fluorescencyjny, wymieszaniu ich i obserwacji zmiany fluorescencji – a dokładnie spadku intensywności fluorescencji **donora**. Badania te pokazały, że nawet jedna cząsteczka SNARE wystarczy do zajścia fuzji pomiędzy liposomami oraz że kompleksy SNARE nie działają kooperatywnie, w związku z tym nie jest wymagana współpraca pomiędzy kilkoma kompleksami do tego, aby zaszła fuzja.



Rys.1. Doświadczenia z wykorzystaniem FRET. A. Dwa podejścia w badaniach błon biologicznych z wykorzystaniem techniki FRET. B. Przykładowy wykres przedstawiający widmo emisji fluorescencji donora (ciągła linia) nakładające się z widem absorpcyjnym akceptora (przerzywna linia). C. Schematyczny spadek intensywności fluorescencji donora wraz z odpowiadającym mu wzrostem intensywności fluorescencji akceptora. Ze względu na stopniową zmianę odległości (zbliżanie się) obu sond możliwe jest coraz bardziej wydajne zachodzenie transferu energii

Badania z wykorzystaniem FRET można prowadzić nie tylko na błonach modelowych. Technika ta ma również zastosowanie przy obserwacji procesów

<sup>17</sup> SNARE – grupa białek transbłonowych odpowiedzialnych za rozpoznawanie i fuzję pęcherzyków z błoną komórkową. Za ich odkrycie i opisanie James E. Rothman, Randy W. Schekman i Thomas C. Südhof w 2013 roku otrzymali Nagrodę Nobla.



mieszania się błon naturalnych (mikropęcherzyków zewnątrzkomórkowych) z błonami liposomów. Takie doświadczenia były prowadzone przez Sagara Rayamajhi'ego [20]. Badania te miały na celu stworzenie hybrydowego nośnika leku powstałego poprzez fuzję liposomu (wypełnionego lekiem) z mikropęcherzykiem zewnątrzkomórkowym (naturalny nośnik cząsteczek biologicznie aktywnych, np. miRNA, w organizmach żywych). W tym modelu sondy fluorescencyjne były mieszane z lipidami. Poprzez dodanie zawiesiny wodnej mikropęcherzyków dochodziło do utworzenia się struktur liposomów, a dzięki zastosowaniu dodatkowej sonikacji możliwe było obserwowanie fuzji. Pomiarów dokonywano także dla liposomów, do których syntezy nie dodawano pęcherzyków i porównywano je z układem syntetyzowanym w ich obecności. Badania pokazały, że dochodzi do fuzji pomiędzy tymi makromolekułami, a w jej wyniku otrzymuje się stabilne i nietoksyczne dla komórek systemy dostarczania leków.

Poza opisanymi protokołami możliwe jest również prowadzenie obserwacji mikroskopowych z wykorzystaniem sond fluorescencyjnych [21]. Jako przykład można przytoczyć chociażby badania Katarzyny Grymek z Uniwersytetu Jagiellońskiego [22]. Prowadząc eksperymenty dotyczące polimorfizmu receptorów dopaminowych, wykorzystwała FRET do obrazowania, czy dwie ciche mutacje w receptorze dopaminowym D1 wpłyną na jego możliwości oddziaływania z receptorem dopaminowym D2. Receptor D1 został oznakowany **donorem** – białkiem fluorescencyjnym CFP (*ang. cyan fluorescent protein*), natomiast receptor D2 **akceptorem** – YFP (*ang. yellow fluorescent protein*). Obserwacje prowadzono przyżyciowo i mierzono czas życia fluorescencji donora w obecności i nieobecności akceptora, a na ich podstawie dokonywano obliczeń wydajności transferu energii. Badania pokazały, że mutacje receptora D1 obniżają jego zdolność związania się do receptora D2, co może być związane z występowaniem takich chorób jak np. schizofrenia.

Na koniec warto wspomnieć, że metodę FRET można wykorzystywać także do badań nad konformacją białek [23] oraz interakcji oddziaływań pomiędzy białkami [24].

## Podsumowanie i wnioski

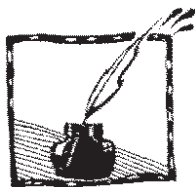
Stworzenie teorii FRET nie jest dziełem jednego naukowca, podobnie jak jej dalszy rozwój czy udoskonalanie technik pomiarowych. Badania z wykorzystaniem FRET pozwalają naukowcom „zajrzeć” do wnętrza błon biologicznych i zrozumieć wiele do tej pory niewyjaśnionych mechanizmów. Pojawienie się nowych barwników, wzrost czułości przyrządów pomiarowych oraz rozdzielczości mikroskopów pozwalają jeszcze dokładniej mierzyć i obserwować zachodzące zjawiska. Technika FRET będzie z pewnością nadal rozwijana i przyczyni się do zrozumienia, w skali nanometrowej, różnorodnych procesów zachodzących w żywych organizmach.

## Podziękowania

Bardzo dziękuję prof. Ewie Stępień za pomoc w przygotowaniu artykułu.

## Bibliografia

- [1] Medintz I, Hildebrandt N, editors. FRET – Förster Resonance Energy Transfer: From theory to applications. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH; 2014.
- [2] Förster T. Energiewanderung und Fluoreszenz. *Naturwissenschaften*. 1946; 6, 166-175. (tłumaczenie na język angielski: Förster T. Energy migration and fluorescence. *J Biomed Opt*. 2012;17(1):011002.)
- [3] Medintz I, Hildebrandt N, editors. FRET – Förster Resonance Energy Transfer: From theory to applications. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH; 2014. p. 23-42.
- [4] Hussain SA. An Introduction to Fluorescence Resonance Energy Transfer (FRET). *Energy*. 2009; 132(6), 4.
- [5] Sun Y, Wallrabe H, Seo SA, Periasamy A. FRET microscopy in 2010: the legacy of Theodor Förster on the 100th anniversary of his birth. *Chemphyschem*. 2011;12(3):462-474.
- [6] Cairo G, Über Entstehung wahrer Lichtabsorption un scheinbare Koppelung von Quantensprüngen. *Z. Physik*. 1922; 10, 185-199.
- [7] Cairo G, Franck J., Über Zerlegugen von Wasserstoffmolekülen durch angeregte Quecksilberatome. *Z. Physik*. 1922; 11, 161-166.
- [8] Geddes C, Lakowicz J, editors. *Reviews In Fluorescence 2005*. New York: Springer;2005.
- [9] Franck J. Einige aus der Theorie von Klein und Rosseland zu ziehende Folgerungen über Fluorescence, photochemische Prozesse und die Electronenemission glühender Körper. *Z. Physik*. 1922; 9, 259-266.
- [10] Kallmann H, London F. Über quantenmechanische Energieübertragungen zwischen atomaren Systemen. *Z. Physik. Chem*. 1928; B2, 207-243.
- [11] Perrin F. Théorie quantique des transferts d'activation entre molécules de même espèce. Cas des solutions fluorescentes, *Ann. Chim. Phys*. 1932. 17, 283-314.
- [12] Perrin F. Interaction entre atomes normal et activité. Transferts d'activation. Formation d'une molécule activée. *Ann. Institut Poincaré*. 1933; 3, 279-318.
- [13] Förster T. Energiewanderung und Fluoreszenz. *Naturwissenschaften*. 1946; 6, 166-75.
- [14] Förster T. Zwischenmolekulare Energiewanderung und Fluoreszenz. *Ann. Phys*. 1948; 2, 55-75.
- [15] Arnold W, Oppenheimer JR. Internal conversion in the photosynthetic mechanism of blue-green algae. *J. Gen. Physiol*. 1950; 33, 423-435.
- [16] Dexter D. A theory of sensitized luminescence in solids. *J. Chem. Phys*. 1953; 21, 836-850.
- [17] Meditz IL, Mattoussi H. Quantum dot-based resonance energy transfer and its growing application in biology. *Phys. Chem. Chem. Phys*. 2009; 11, 17-45.
- [18] Struck DK, 1981Hoekstra D, Pagano RE. Use of resonance energy transfer to monitor membrane fusion. *Biochemistry*. 1981; 20(14), 4093-4099.
- [19] van den Bogaart G, Holt MG, Bunt G, Riedel D, Wouters FS, Jahn R. One SNARE complex is sufficient for membrane fusion. *Nat Struct Mol Biol*. 2010; 17(3),358-64.
- [20] Rayamajhi S, Duong T, Nguyen T, Marasini R, Aryal S. Acta Biomaterialia Macrophage-derived exosome-mimetic hybrid vesicles for tumor targeted drug delivery. *Acta Biomater*. 2019;94, 482-94.
- [21] Wallrabe H, Elangovan M, Burchard A, Periasamy A, Barroso M. Confocal FRET microscopy to measure clustering of ligand-receptor complexes in endocytic membranes. *Biophys J*. 2003; 85(1), 559-71.
- [22] Grymek K, Łukasiewicz S, Faron-Górecka A, Tworzydło M, Polit A, Dziedzicka-Wasylewska M. Role of silent polymorphisms within the dopamine D1 receptor associated with schizophrenia on D 1-D 2 receptor hetero-dimerization. *Pharmacological Reports*. 2009; 61(6), 1024-1033.
- [23] Schuler B, Eaton WA. Protein folding studied by single-molecule FRET. *Curr Opin Struct Biol*. 2008;18(1),16-26.
- [24] Kenworthy AK. Imaging Protein – Protein Interactions Using Fluorescence Resonance Energy Transfer Microscopy. *Methods*. 2001;296:289-96.

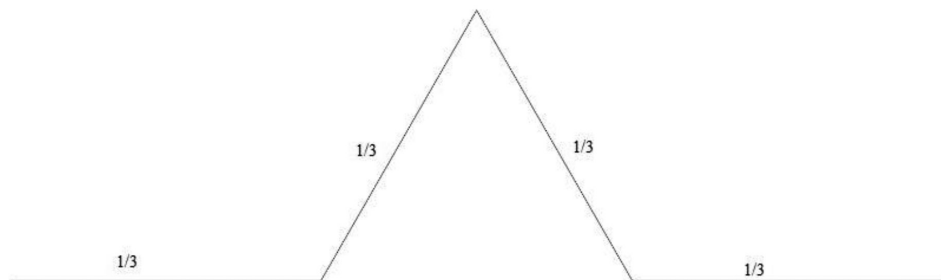


## Podróż na Księżyc i Słońce na krzywej Kocha

*Marek Berezowski*

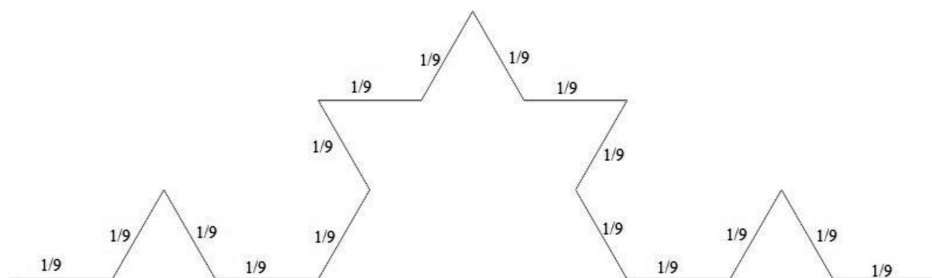
Spróbujmy odbyć podróż na Księżyc i Słońce. Podróż tę odbędziemy jednak w nietypowy sposób, bo na płątku śniegu. W tym celu musimy zbudować taki płatek. Weźmy odcinek o umownej długości równej  $L_0 = 1$ . Następnie podzielmy go na 3 równe części i część środkową usuńmy. W to miejsce wstawmy trójkąt równoboczny o boku równym  $1/3$ , jak na rys. 1. Niech takie postępowanie będzie pierwszym krokiem pewnej iteracji. Każdy następny krok jest identyczny i dotyczy wszystkich aktualnych odcinków.

A zatem, w pierwszym kroku będziemy mieli  $s_1 = 4^1$  odcinków, o długości  $1/3$  każdy,



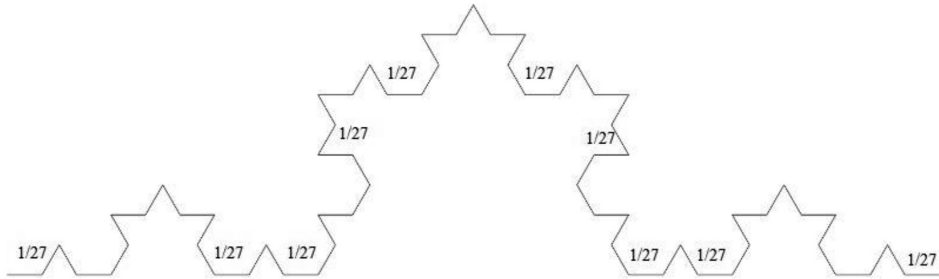
Rys. 1. Pierwszy krok iteracyjny:  $n = 1$

w drugim  $s_2 = 4^2$  odcinków, o długości  $1/9$  każdy,



Rys. 2. Drugi krok iteracyjny:  $n = 2$

w trzecim  $s_3 = 4^3$  odcinków, o długości  $1/27$  każdy, itd.

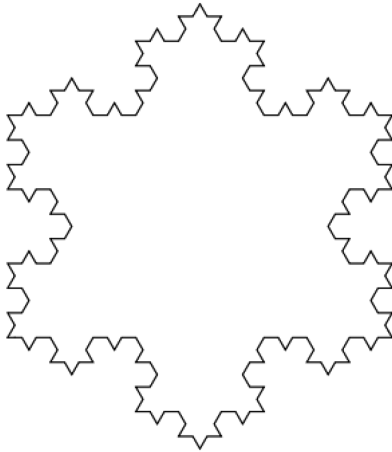
Rys. 3. Trzeci krok iteracyjny:  $n = 3$ 

W  $n$ -tym kroku będziemy mieli

$$s_n = 4^n \quad (1)$$

odcinków, o długości  $1/3^n$  każdy. Powstała w ten sposób linia nazywa się krzywą Kocha i jest fraktalem [1].

Gdybyśmy zbudowali krzywą Kocha, opierając się nie na jednym tylko odcinku, ale na trójkącie o trzech bokach, to otrzymalibyśmy figurę przypominającą płatek śniegu (rys. 4).



Rys. 4. Płatek śniegu

I na takim właśnie płatkach spróbujemy dotrzeć na Księżyc i Słońce. Z tym, że podróż tę odbędziemy nie na całym płatkach, a tylko na jego fragmencie, czyli na wspomnianej krzywej Kocha.

Wróćmy zatem do tej krzywej. Załóżmy, że na początku mamy odcinek o długości jednego metra, czyli  $L_0 = 1$  [m]. Zgodnie z wyżej pokazaną procedurą tworzenia krzywej Kocha, dzielimy go na 3 równe części, usuwamy część środkową i w to miejsce wstawiamy trójkąt równoboczny o bokach równych  $1/3$  [m].

Wobec tego w pierwszym kroku otrzymamy krzywą o długości  $L_1 = (4/3)^1$  [m], złożoną z  $s_1 = 4^1$  odcinków. W drugim kroku otrzymamy krzywą o długości  $L_2 = (4/3)^2$  [m], złożoną z  $s_2 = 4^2$  odcinków. W kroku trzecim otrzymamy krzywą o długości  $L_3 = (4/3)^3$  [m], złożoną z  $s_3 = 4^3$  odcinków, itd. Ogólnie, w  $n$ -tym kroku otrzymamy krzywą o długości

$$L_n = (4/3)^n \text{ [m]}, \quad (2)$$

złożoną z  $s_n = 4^n$  odcinków. Łatwo zauważyć, że gdy liczba kroków dąży do nieskończoności, krzywa Kocha staje się również nieskończenie długa ( $L_n = \infty$ ). I to właśnie spróbujemy wykorzystać do naszych podróży. Stworzymy bowiem krzywe, których długości będą równe odległościom Ziemi od Księżyca i Ziemi od Słońca.

Policzmy zatem, ile należy zrobić iteracyjnych kroków, aby długość krzywej Kocha równa była odległości Ziemi od Księżycy lub odległości Ziemi od Słońca. Załóżmy, że odcinek początkowy ma długość 1[m]. Ze wzoru (2) łatwo wyliczyć, że liczba kroków, to:

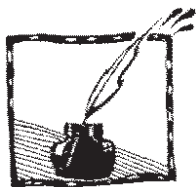
$$n = \frac{\log(L_n)}{\log\left(\frac{4}{3}\right)} \quad (3)$$

Polećmy najpierw na Księżyc. Średnia odległość Ziemi od Księżycy, to ok. 400 000 km, czyli ok.  $4 \cdot 10^8$  m. Korzystając ze wzoru (3), wyliczamy, że aby dotrzeć na Księżyc, trzeba zrobić ok.  $n = 69$  kroków iteracyjnych. To wydaje się niedużo. Wystarczy zatem zrobić zaledwie 69 prostych iteracji i już będziemy na Księżycu. Sprawdźmy jednak, czy jest to fizycznie wykonalne. Przy takiej liczbie iteracji krzywa Kocha będzie miała  $s_{69} = 4^{69} = 3 \cdot 10^{41}$  odcinków. To dużo. Każdy z tych odcinków będzie miał długość ok.  $10^{-33}$  [m]. Średnica atomu wodoru to ok.  $10^{-10}$  [m]. Zatem długość pojedynczego odcinka w takiej krzywej Kocha byłaby aż o 23 rzędy mniejsza od średnicy atomu wodoru. Najmniejsza długość w przyrodzie, tzw. długość Plancka, to ok.  $1,616 \cdot 10^{-35}$  [m]. Oznacza to, że długość pojedynczego odcinka naszej Krzywej Kocha byłaby zaledwie o 2 rzędy większa od długości Plancka. To powoduje, że podróż na Księżyc jest w taki sposób praktycznie niewykonalna.

Mimo, że już wiemy, że podróż na Księżyc na płatku śniegu jest nierealna, to sprawdźmy, jak podobne wyliczenia wyglądają, gdybyśmy chcieli wybrać się na Słońce. Otóż, podobnie jak poprzednio, załóżmy, że początkowy odcinek ma długość 1[m]. Średnia odległość Ziemi od Słońca to ok. 150 000 000 km. Mimo tak dużej różnicy między odległością Ziemi od Księżycy a odległością Ziemi od Słońca, różnica liczby kroków iteracyjnych potrzebnych do wygenerowania tych odległości nie jest już tak znacząca. Okazuje się bowiem, że aby stworzyć krzywą Kocha o długości równej odległości Ziemi od Słońca, wystarczy wykonać zaledwie  $n = 89$  iteracji. W przypadku Księżycy było to ok.  $n = 69$  kroków, a więc zaledwie o 20 kroków mniej. Jednakże liczba odcinków w przypadku podróży na Słońce jest znacząco większa i wynosi aż  $s_{89} = 4^{89} = 7 \cdot 10^{53}$  odcinków. To oznacza, że każdy z tych odcinków ma długość ok.  $2 \cdot 10^{-43}$  [m]. Długość odcinka w takiej krzywej Kocha musiałaby być mniejsza od długości Plancka i to aż o 8 rzędów, co jest oczywiście fizycznie niemożliwe do wykonania.

## Literatura cytowana

- [1] E. Lamb, A Few of My Favorite Spaces: The Koch Snowflake, Scientific American, Nov. 30, 2017.



## Podstawy Nauczania Dydaktyki Akademickiej – pilotażowy kurs dla doktorantów

Dagmara Sokołowska

Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UJ

### Abstrakt

Rozwój zawodowy czynnych nauczycieli (*Continuous Professional Development, CPD*) jest promowany na całym świecie i co roku szeroko badany oraz opisywany w wielu publikacjach dotyczących dydaktyki. Z drugiej strony rozwój nauczycieli akademickich w zakresie dydaktyki niezmiernie rzadko staje się tematem jakiegokolwiek debaty, nie mówiąc już o organizacji szkoleń. Zazwyczaj pracownicy wydziałów nauk ścisłych odznaczają się wiedzą merytoryczną na wysokim poziomie, ale jednocześnie brak im umiejętności interpersonalnych, wiedzy pedagogicznej i autorefleksji nad własnym nauczaniem. Aby zmierzyć się z tym problemem, zaproponowaliśmy kurs Podstaw Nauczania Dydaktyki Akademickiej dla studentów pierwszego lub drugiego roku studiów doktoranckich, czyli dla osób, które rozpoczynają swoją drogę w roli dydaktyków akademickich. Pierwsze, pilotażowe zajęcia zostały wdrożone w roku akademickim 2017/2018 w jednej grupie doktorantów liczącej 11 osób, drugie wdrożenie nastąpiło w roku akademickim 2018/2019 w dwóch grupach studentów: polskojęzycznej (16 osób) oraz anglojęzycznej (22 osoby), w której to większość stanowili studenci z zagranicy przygotowujący prace doktorskie na naszym Wydziale. W niniejszym artykule przedstawiamy zarys kursu oraz wyniki ankiet i obserwacji dotyczące zaangażowania uczestników oraz postrzegania przez nich kursu. Ze względu na niewielką licznosc grup wyniki te należy traktować z należytą ostrożnością, skupiając się jedynie na trendach z nich wynikających.

### WSTĘP

Rozwój zawodowy czynnych nauczycieli przedmiotów ścisłych w postaci szkoleń doskonalących jest promowany na całym świecie i szeroko badany i opisywany co roku w publikacjach, na przykład [1-5]. W ciągu ostatniej dekady wiele europejskich projektów finansowanych przez Unię Europejską w ramach 7. Programu Ramowego [6-8] koncentrowało się na tego typu szkoleniach, zapewniając doskonalenie zawodowe tysiącom nauczycieli w całej Europie. Z drugiej strony rozwój nauczycieli akademickich w zakresie dydaktyki w szkolnictwie wyższym rzadko jest postrzegany jako jedna z głównych potrzeb zawodowych pracowników wyższych uczelni. Rozmawia się o nim sporadycznie, jeszcze rzadziej organizuje się w tym temacie seminaria czy szkolenia, i to pomimo wdrożenia procesu bolońskiego i istnienia nadrzędnych dokumentów określających

ogólne ramy jednolitego szkolnictwa wyższego w Europie [9]. W rezultacie podobne efekty uczenia się są zapewniane w różnych krajach w odniesieniu do uczniów, a spójność nauczania w szkolnictwie wyższym w całej Europie wydaje się pozostawać jedynie zapisem w dokumentach.

Zazwyczaj pracownicy wydziałów nauk ścisłych posiadają bardzo wysoki poziom wiedzy merytorycznej, którą przekazują studentom, ale jednocześnie brak umiejętności interpersonalnych, wiedzy pedagogicznej i autorefleksji nad własnym nauczaniem jest wśród naukowców bardzo powszechny. Czasami wydziały oferują seminaria (np. *Modern Trends in Physics Research*, UAM) lub konferencje dotyczące tych zagadnień (np. *Tydzień Jakości Kształcenia*, UJ), jednak takie działania są raczej sporadyczne, a pracownicy naukowo-dydaktyczni wydziałów nauk ścisłych nie wykazują większego nimi zainteresowania i generalnie nie biorą w nich udziału.

Co więcej, doktoranci rozpoczynający pierwsze zajęcia bez profesjonalnego wsparcia dydaktycznego, wykazują tendencję do kopiowania sposobów nauczania, zarządzania grupami studentów, a nawet relacji międzyludzkich z doświadczeń zdobytych podczas własnych studiów. W ten sposób proces zmiany nawyków nauczania – z frontalnego i skoncentrowanego na nauczycielu na bardziej aktywny i skupiony na studencie – jest bardzo powolny, nieskoordynowany, a zatem nieskuteczny i niezapewniający spełnienia współczesnych standardów ram kwalifikacji absolwentów. W konsekwencji pracodawcy narzekają na zbyt teoretyczną wiedzę absolwentów i obserwowany u nich brak większości kluczowych kompetencji [10], w tym kompetencji praktycznych i społecznych, na niski poziom inicjatywy i przedsiębiorczości, a także na niedostrzeganie przez nich potrzeby uczenia się przez całe życie. Powstaje dysonans polegający na uczeniu metodami z przełomu XIX i XX w. studentów należących do generacji Y.

## STRUKTURA KURSU PILOTAŻOWEGO

Aby zmierzyć się z tym problemem, opracowaliśmy kurs **Podstawy Nauczania Dydaktyki Akademickiej** dla słuchaczy pierwszego lub drugiego roku studiów doktoranckich. Kurs podzielony jest na dwie części: (1) interaktywne warsztaty na temat podstaw dydaktyki szkolnictwa wyższego, prowadzone metodą tutoringu oraz (2) warsztaty na temat ćwiczeń laboratoryjnych i pokazów eksperymentów fizycznych towarzyszących wykładom. Pierwsza część, w wymiarze 30 godzin zajęć, została zainaugurowana w semestrze letnim 2018 i powtórzona wiosną 2019 r. W tym artykule przedstawimy wyniki studium przypadku z implementacji pierwszej części kursu, oparte na naszym dwuletnim doświadczeniu.

Głównym celem zajęć w pierwszym (letnim) semestrze kursu jest podniesienie świadomości doktorantów na temat kluczowego wpływu wymiarów społecznych na szkolnictwo wyższe i zaznajomienie ich zarówno z procesem kształcenia, jak i z całym spektrum towarzyszących mu metod i narzędzi. Semestralny kurs składa się z elementów: (1) zagadnienia systemowe, (2) samorozwój, (3) uczenie się dorosłych, z wyróżnieniem specjalnych przypadków oraz (4) projektowanie



treści i metod kursów wraz z wykorzystaniem nowoczesnych technologii w pracy dydaktycznej (Tab. 1). Każde zajęcia składają się z bardzo krótkiego wprowadzenia, dyskusji na forum całej grupy, pracy w małych zespołach lub parach. Niemal połowa zajęć wiąże się z ewaluacją pracy pozostałych zespołów. Zgodnie z życzeniem doktorantów z pierwszej pilotażowej grupy, wyrażonym w ankietach, w kolejnym roku akademickim zmniejszona została liczba godzin związanych z zagadnieniami systemowymi i pedagogiką - na rzecz dwóch dodatkowych zajęć na temat wykorzystania narzędzi i metod dydaktycznych w praktyce.

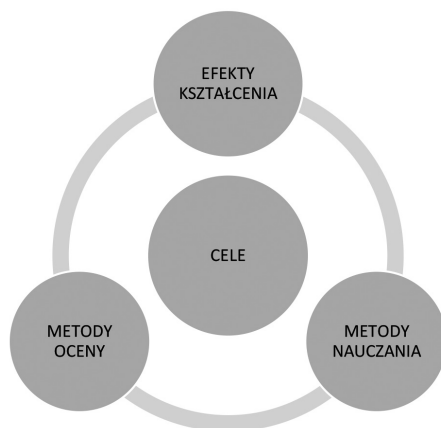
**Tabela 1.** Struktura kursu Podstawy Nauczania Dydaktyki Akademickiej w semestrze letnim (30 h). W dolnych wierszach prezentowany jest wymiar godzinowy poszczególnych elementów kursu w latach akad. 2017/2018 i 2018/2019.

<b>Kurs: Podstawy Nauczania Dydaktyki Akademickiej – semestr letni</b>				
	<b>Zagadnienia systemowe</b>	<b>Samorozwój</b>	<b>Pedagogika</b>	<b>Metody i narzędzia</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efekty kształcenia</li> <li>• Sylabus kursowy</li> <li>• Profil absolwenta</li> <li>• Wewnętrzne regulacje UJ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Profil nauczyciela akademickiego</li> <li>• Dobry/zły mówca/słuchacz</li> <li>• Style uczenia się</li> <li>• Ucieleśnienie nauczania</li> <li>• Ramy czasowe przygotowania do własnego kursu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Motywatory i demotywatory</li> <li>• Różnorodność studentów: mniejszości, studenci niepełnosprawni, studenci bardzo zdolni i wykazujący braki edukacyjne</li> <li>• Społeczny aspekt nauczania</li> <li>• Komunikacja</li> <li>• Zarządzanie grupą studentów</li> <li>• Jak się zachować w sytuacjach specjalnych?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plan zajęć i plan kursu</li> <li>• Metody dydaktyczne</li> <li>• Strategie dydaktyczne</li> <li>• Zasoby multimedialne</li> <li>• Narzędzia oceniania (w tym narzędzia ICT)</li> <li>• Strategie oceniania</li> </ul>
wymiar 2017/2018	4	4	10	12
wymiar 2018/2019	2	4	8	16

Doktoranci zastanawiają się nad stylami uczenia się i nauczania, poznają różne praktyki i metody skoncentrowane na czynnym udziale studentów w zajęciach, a także techniki oceny spójne ze stylami uczenia się i oczekiwanymi efektami kształcenia. Omawiają zarządzanie grupą zajęciową (środowisko, grupy, komunikacja, cele i oczekiwania, studenci specjalnymi potrzebami). Uczą się, jak zaprojektować kurs – jak napisać do niego sylabus, jak opracować i przekształcić treść instruktażową, jak przygotować zadania i jak korzystać z nowych technologii jako narzędzi wspierających. Ponadto zachęca się również doktorantów do prowadzenia badań na niewielką skalę (*Practitioner Inquiry* [11]) w ich własnych grupach zajęciowych oraz do organizowania się w społeczności praktyków (*Professional Learning Communities* [12]) w trakcie ich przyszłej

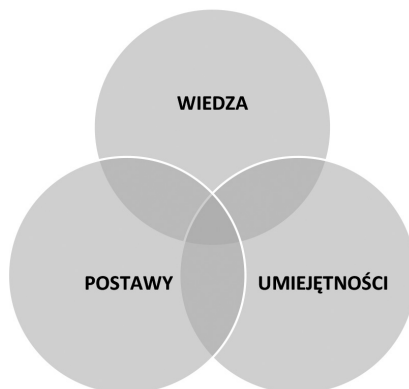
pracy jako nauczycieli akademickich. Doktoranci, współpracując ze sobą w zespołach, projektują elementy zajęć rachunkowych i laboratoryjnych, a następnie, wcielając się w rolę krytycznego przyjaciela (*critical friend*), przekazują swoje spostrzeżenia w odniesieniu do materiałów przygotowanych przez innych. Zespołowa praca podczas zajęć daje im odczuć wartość współpracy akademickiej w obszarze dydaktyki.

Podczas całego kursu przewija się spójny obraz procesu kształcenia, rozpoczynającego się od postawienia nadrzędnych celów, a następnie wytyczenia trzech nieodłącznych, ściśle powiązanych ze sobą elementów: efektów kształcenia, dobranych do ich realizacji metod kształcenia oraz – powiązanych z nimi w spójną całość – metod oceny i ewaluacji (rys. 1).



Rys. 1 Proces kształcenia

Uczestnicy kursu przekonują się, że celem nadrzędnym nowoczesnej edukacji nie jest transfer wiedzy, ale budowanie i rozwój kompetencji indywidualnych studentów. Kompetencje te rozumiane są jako nierozzerwalne połączenie: wiedzy, umiejętności praktycznych i społecznych oraz postaw.



Rys. 2. Kompetencje w procesie kształcenia

Podczas całego kursu w semestrze letnim 2017/18 doktoranci wykonali szereg zadań, zarówno indywidualnie, w parach, jak i w zespołach trzyosobowych. Z części z tych zadań zrezygnowano w kolejnym roku akademickim, zastępując je nowymi (Tab. 2).

**Tabela 2.** Zadania wykonywane przez doktorantów podczas kursu

zadanie	grupowanie	2017/18	2018/19
Uczestnictwo w dyskusjach	forum całej grupy	✓	✓
Przygotowanie prezentacji wylosowanej metody lub strategii dydaktycznej	indywidualnie	✓	✓
Sporządzenie mapy myśli	indywidualnie	✓	
Przygotowanie tabeli kategorii samooceny i oceny wzajemnej w pracy w grupie	zespoły 3-os.	✓	
Uczestnictwo w pracy w grupie wraz z zastosowaniem samooceny i oceny wzajemnej	zespoły 3-os.	✓	✓
Przygotowanie quizu z wykorzystaniem klikerów lub Kahoota	zespoły 3-os	✓	✓
Przygotowanie pełnego sylabusu w odniesieniu do wybranych przez siebie zajęć	indywidualnie	✓	✓
Opracowanie zastosowania czterech narzędzi multimedialnych w modelu SAMR [13]	indywidualnie	✓	
Praca z symulacjami Physlets	zespoły 2-os.		✓
Dodatkowe zadanie (esej) za przekroczenie limitu nieobecności	indywidualnie	✓	
Dodatkowe zadanie (prezentacja i uczestnictwo w sesji prezentacji) za przekroczenie limitu nieobecności	indywidualnie		✓
Przygotowanie planu modułu zajęć i ocena innych	zespoły 3-os.		✓

## PORÓWNANIE KURSÓW W 2017/18 I 2018/19

Kurs Podstaw Nauczania Dydaktyki Akademickiej (PNDA) został wdrożony podczas semestrów letnich dwóch kolejnych lat akademickich, łącznie w trzech grupach doktorantów. W pierwszym roku doktoranci potraktowali ten kurs jako nieobowiązkowy, w drugim – otrzymali jasny przekaz co do obowiązkowości kursu. W zajęciach w grupie PL1 (rok 2017/18) wzięło udział 11 osób, w grupie PL2 (rok 2018/19) – 16 osób, a w grupie EN2 (rok 2018/19) – 22 osoby, z czego przeważającą część stanowili doktoranci zagraniczni przygotowujący swoje doktoraty na WFAIS, UJ. Pod względem struktury płci wszystkie te grupy były grupami mieszanymi. Wszyscy uczestnicy byli studentami I roku studiów III stopnia, reprezentującymi jeden z dwóch kierunków: fizykę lub biofizykę. Większość z nich przed przystąpieniem do kursu nie miała żadnego doświadczenia w nauczaniu studentów i jedynie kilkoro przed rozpoczęciem zajęć uczyło w jednej grupie studentów, głównie w laboratorium dla studentów studiów li-

cencjackich. Dwóch doktorantów z grupy EN2 było wcześniej nauczycielami w szkołach średnich.

W celu ewaluacji kursu i zapewnienia mu dalszego rozwoju, postawiliśmy sobie trzy pytania badawcze:

Q1: W jakim stopniu uczestnicy angażują się w zajęcia i zadania zaproponowane podczas kursu?

Q2: Jak doktoranci postrzegają kurs?

Q3: Jakie różnice można zauważyć pomiędzy trzema grupami doktorantów (PL1, PL2 i EN2) uczestniczącymi w kursie?

Odpowiedzi na te pytania poszukiwaliśmy w rezultatach anonimowej ankiety ewaluacyjnej zastosowanej na koniec kursu i w protokołach obserwacyjnych z zajęć oraz w ewidencji list obecności i wykonania zadań domowych.

## WYNIKI

Analizując listy obecności, protokoły obserwacyjne oraz wykonalność zadań domowych, można stwierdzić, że zaangażowanie doktorantów w zajęcia było wysokie we wszystkich trzech grupach (rys. 3). Zdecydowana większość doktorantów uczestniczyła w kursie w obowiązkowym wymiarze co najmniej 26 godzin zajęć. Wszyscy (poza jednym doktorantem z grupy PL2 i jednym z grupy EN2, okazującymi w większości postawę bierną) chętnie uczestniczyli w przygotowanych zadaniach, wykazując się inwencją.



Rys. 3. Obecność doktorantów na zajęciach PNDA.  
Na osi poziomej wykazano liczbę godzin obecności

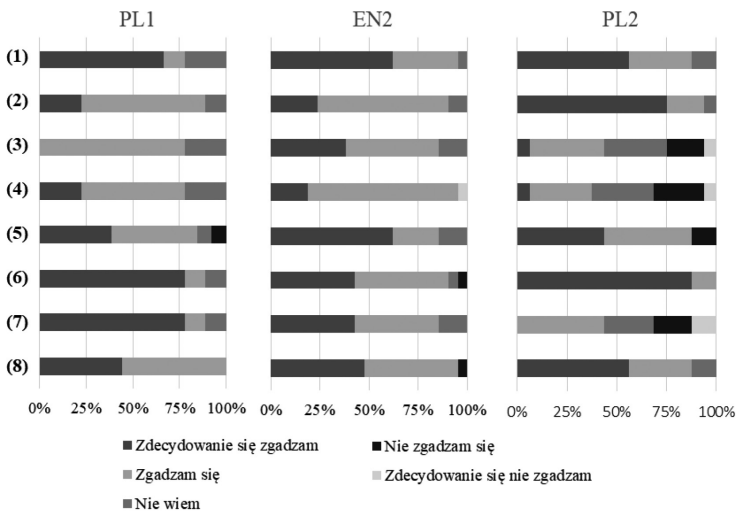
W roku 2017/18 91% zadań domowych zostało wykonane w przewidywanym czasie, a w roku 2018/18 – 75%.

Tuż po zakończeniu kursu przeprowadzono ankietę ewaluacyjną we wszystkich trzech grupach zajęciowych. Przedstawiono w niej między innymi poniższe stwierdzenia, dotyczące postrzegania zajęć, do których uczestnicy mieli się od-

nieść w pięciostopniowej skali Likerta, wybierając stopień zgodności własnej opinii z każdym ze stwierdzeń:

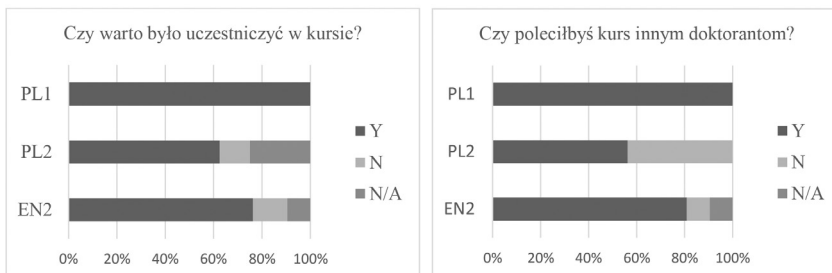
- (1) Atmosfera kursu sprzyjała uczeniu się.
- (2) Kurs zachęcał do niezależnego i krytycznego myślenia.
- (3) Nabyta wiedza poprawi efektywność mojej pracy.
- (4) Treść kursu była adekwatna do celów mojej kariery.
- (5) Obciążenie zajęciami było do zaakceptowania.
- (6) Skutecznie wdrożono różnorodne metody nauczania.
- (7) Zdobyłam/em nowe umiejętności.
- (8) Kurs został przygotowany na poziomie, który mogłem zrozumieć i do którego mogłem się odnieść.

Wyniki porównawcze ankiety z trzech grup: PL1, PL2 i EN2 przedstawiono na rys. 4.



Rys.4. Wyniki ankiety ewaluującej kurs PNDA. Uczestników poproszono o ustosunkowanie się do ośmiu stwierdzeń (1)-(8) z wykorzystaniem pięciostopniowej skali Likerta. Wyniki od lewej do prawej: od *Zdecydowanie się zgadzam*, po *Zdecydowanie się nie zgadzam*

Doktoranci zostali także poproszeni o opinię, czy kurs był wart uczestnictwa oraz czy poleciliby go innym doktorantom. Odpowiedzi przedstawiono zbiorczo na rys. 5.



Rys. 5. Opinia uczestników na temat uczestnictwa i ewentualnego polecenia kursu innym doktorantom

Niektórzy uczestnicy kursu odpowiedzieli także na kilka pytań otwartych, a ich opinie zebrane zostały poniżej.

**A. Co Ci się najbardziej podobało?**

- Dynamika kursu.
- Entuzjazm.
- Sztuka dyskusowania.
- Różnorodność zaprezentowanych metod.
- *Kurs nie był nudny!*

**B. Co Ci się najmniej podobało?**

- Zbyt wiele zadań domowych (PL1), sesja klikerowa (PL2, EN2).

**C. Jakie zmiany, Twoim zdaniem, warto byłoby wprowadzić?**

- Przydałby się ranking uczestników ustalany rosnąco na podstawie punktów otrzymywanych na każdych zajęciach.
- Kurs mógłby być przeniesiony na semestr zimowy.
- Mogłoby być jeszcze więcej zadań praktycznych.

## WNIOSKI

Mając na uwadze ograniczoną celowość wnioskowania na podstawie wyników pochodzących łącznie od ok. 50 doktorantów, można zauważyć jednak pewne tendencje. Zdecydowanie można stwierdzić, że doktoranci ze wszystkich grup wykazali duże zaangażowanie podczas zajęć PNDA, a także przygotowywania zadań domowych. Większość uczestników doceniła sposób przygotowania kursu i jego zawartość merytoryczną. Większość uczestników przyznała także, że atmosfera na zajęciach sprzyjała uczeniu się. Ponad 80% studentów z grup PL1 i EN2 uznało, że podczas kursu zdobyli nowe umiejętności; podobną opinię wyraziła mniej niż połowa doktorantów z grupy PL2. Wszyscy uczestnicy kursu PNDA z grupy PL1 i ponad 75% uczestników z grupy EN2 poleciliby zajęcia innym doktorantom, podczas gdy tego samego zdania była nieco ponad połowa uczestników z grupy PL2. Doktoranci rekomendowali dopracowanie zadań domowych oraz zwiększenie ilości zadań praktycznych; niewielka ich część z grup PL1 i PL2 uznała, że obciążenie zadaniami domowymi było zbyt duże. Słabe rezultaty ankiet w odniesieniu do wpływu kursu na dalszą karierę i efektywność pracy doktoranta, zwłaszcza w grupie PL2, wskazują na potrzebę położenia większego nacisku podczas kursu na uświadamianie doktorantom potrzeby rozwoju w zakresie dydaktyki i wartości dobrego nauczania, opartego na refleksji i samodoskonaleniu się nauczyciela akademickiego w zakresie dydaktyki akademickiej.

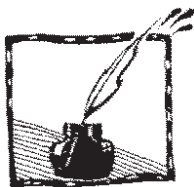
Można generalnie stwierdzić, że dla sporej części polskich doktorantów, którzy wzięli udział w kursie przymuszeni jego obligatoryjnością, kariera akademicka jest tożsama z karierą badawczą. Nie widzą oni szczególnej potrzeby rozwijania umiejętności dydaktycznych lub nie są świadomi formalnych wymagań kontraktowych nauczyciela akademickiego, w których czas poświęcany badaniami naukowym jest zrównany z czasem, jaki powinno się przeznaczyć na

przygotowanie i przeprowadzenie zajęć dydaktycznych. Powielają w ten sposób postawę głęboko zakorzoną na polskich uczelniach, zwłaszcza na kierunkach ścisłych. Doktoranci zagraniczni wydają się być bardziej świadomi konieczności ciągłego rozwoju dydaktycznego. Jeszcze wyższą świadomość w tym względzie prezentują polscy doktoranci, którzy wzięli udział w zajęciach kursu traktowanego jako nieobowiązkowy.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] S. Zehetmeier and K. Krainer., Ways of promoting the sustainability of mathematics teachers' professional development. *Zdm. The International Journal on Mathematics Education*, **43** (2011) 875-887.
- [2] C.A. Fraser, Continuing professional development and learning in primary science classrooms, *Teacher Development*, **14** (2010) 85-106.
- [3] A. Lessing and M. de Witt, The value of continuous professional development: teachers' perceptions, *South African Journal of Education*, **27**(1) 53-67.
- [4] C. Woolhouse and M. Cochrane, Is subject knowledge the be all and end all? Investigating professional development for science teachers, *Improving Schools*, **12** (2009) 160-173.
- [5] N. Mansour, H. EL-Deghaidy, S. Alshamrani and A. Aldahmash, Rethinking the Theory and Practice of Continuing Professional Development: Science Teachers' Perspectives, *Research in Science Education*, **44** (2014) 949-973.
- [6] PROFILES project, <http://icaseonline.net/profiles/> [dostęp: 07.07.2020].
- [7] Fibonacci project, <http://www.fibonacci.uni-bayreuth.de/> [dostęp: 07.07.2020].
- [8] SAILS project, [www.sails-project.eu/](http://www.sails-project.eu/) [dostęp: 07.07.2020].
- [9] European Qualifications Framework, <http://www.ehea.info/cid102842/qualifications-frameworks-in-the-ehea-2009.html> [dostęp: 07.07.2020].
- [10] Key Competences for Lifelong Learning, [https://ec.europa.eu/education/resources-and-tools/document-library/key-competences-for-lifelong-learning\\_en](https://ec.europa.eu/education/resources-and-tools/document-library/key-competences-for-lifelong-learning_en) , <https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ864796.pdf> [dostęp: 07.07.2020].
- [11] N. Fichtman Dana and D. Yendol-Hoppey, *The Reflective Educator's Guide to Classroom Research*, 3rd Edition, Corwin, California, 2014.
- [12] Projekt 3DIPhE, Trzy wymiary metody odkrywania przez dociekanie: <http://www.3diphe.eu/>, strona w j. polskim: <http://3diphe.if.uj.edu.pl/> [dostęp: 07.07.2020].
- [13] Model SAMR: <http://warsztatpracynauczycieli.blogspot.com/2018/01/technologie-w-nauczaniu-model-samr.html> , <https://docs.google.com/file/d/0B12HAyooaU97OExDQ0U2N-G1vSW8/edit?pli=1> [dostęp: 07.07.2020].



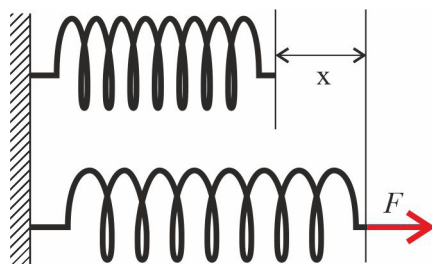


## Kłopoty (nie tylko) ze sprężystością

*Ludwik Lehman*

My, fizycy, lubimy przedstawiać naszą dyscyplinę jako wzorcową naukę ścisłą. Gdy jednak przyrzeć się temu bliżej chłodnym okiem, okazuje się, że w uprawianiu i w nauczaniu fizyki jest zadziwiająco wiele niespójności. My ich nawet nie zauważamy, uczniowie również nie, przynajmniej na poziomie świadomości. Jednak podświadomie z pewnością czują, że ta fizyka jest jakaś niejasna i niezrozumiała.

Przyjrzyjmy się trochę bliżej, jak (nie)konsekwentnie wprowadza się siłę sprężystości. Niemal zawsze zaczyna się od przymocowanej jednym końcem sprężyny. Na drugi koniec działa siła ją odkształcająca (rys. 1).



Rys. 1

Stwierdzamy, że odkształcenie jest wprost proporcjonalne do tej siły:

$$x = \frac{F}{k} \quad (1)$$

Czy rzeczywiście **jedna** siła odkształca sprężynę? Oczywiście, nie. Drugą siłą przeciwnie skierowaną, lecz o tej samej wartości, działa ściana (rys.2).



Rys. 2

Rysunku tej siły nie widziałem nigdy w żadnym podręczniku, czy to szkolnym, czy akademickim. Można powiedzieć, że na lewy koniec sprężyny nakładamy więzy i nie przejmować się tą siłą. Jednak w fizyce szkolnej nigdy więzów nie było. Omawiając dynamikę, podkreślamy, że rozpatrywanie każdej sytuacji zaczynamy od narysowania sił działających na ciało i potem stosujemy zasady

dynamiki. Przechodząc do omawiania sprężystości, zaraz o tym zapominamy. Problem w tym, że wzór (1) nie dotyczy odkształcenia powodowanego przez **jedną** siłę, lecz przez parę przeciwnych sił. Jedna siła spowodowałaby przyspieszenie środka masy sprężyny, a odkształcenie byłoby inne.

Jest jeszcze inna wada takiego wprowadzenia do sprężystości. Nawet dobrzy fizycy widząc na każdym rysunku jedną siłę, wdrukowują sobie w podświadomość przekonanie, że faktyczne działa jedna! Wtedy proste pytanie: czy tak samo rozciągnie się sprężyna ciągnięta dwoma rękami, jak ciągnięta jedną ręką i przymocowana do ściany, staje się niebanalnym zadaniem.

Dlatego wydaje się, że dydaktycznie lepszym pomysłem byłoby zacząć od leżącej na stole sprężyny rozciąganej przed dwa siłomierze (rys.3). Nikt wtedy nie ulegnie złudzeniu o jednej odkształcającej sile.



Rys. 3

Taki pokaz byłby konsekwentnym stosowaniem tego, co wyłożyliśmy w dynamice. Przysłużyłby się też wyeliminowaniu poważnej, a powszechnie występującej niespójności. O co tym razem chodzi? Otóż dynamikę zaczynamy od stwierdzenia, że siłę poznajemy po jej efektach: odkształceniu lub przyspieszeniu. To ważne – siła jest pewną abstrakcją, widoczne są tylko skutki jej działania. Zatem **każda** siła wywołuje skutek. Bez skutków w ogóle byśmy nie wiedzieli o istnieniu danej siły. Jednak „chwile później” stwierdzamy, że siły równoważące się nie wywołują skutku. To poważna niespójność, jeśli nie błąd. Jeśli nie wywierają skutku, to po prostu nie istnieją! Jak tu się dziwić uczniom, że fizyka jest w ich mniemaniu zupełnie oderwana od rzeczywistości? Przecież każdy może rozciągnąć gumkę lub sprężynę jak na Rys.3 i **zobaczyć** wyraźne skutki działania dwóch równoważących się sił. A podręczniki (i nauczyciele) zapewniają, że te siły nie wywołują żadnych skutków! Zamiast tego należy poprawnie twierdzić, że siły równoważące się nie mają wpływu na ruch ciała (ściślej mówiąc na ruch środka masy).

Rozważmy teraz drgania ciężarka na sprężynie. Rozpocznijmy od ściśniętej sprężyny (rys. 4). Działają na nią siły sprężystości przywracające jej pierwotny kształt. Mówiąc ściślej, poszczególne elementy sprężyny oddziałują ze sobą, na rys. 3 przedstawiono tylko wypadkową parę sił. Jeśli do sprężyny przymocujemy ciężarek, zadziała na niego siła. Powszechnie pisze się i mówi, że to siła sprężystości. Tak jednak nie jest. Siła sprężystości działa nie na sprężynę, a na ciało przymocowane do sprężyny. Tak jest po prostu zdefiniowana. Np. w Wikipedii znajdziemy następującą definicję: *Siła sprężystości – siła, która powoduje powrót odkształconego ciała do pierwotnego kształtu*. Dalej czytamy: *Siła ta przeciwdziała więc odkształcaniu ciała i powoduje powrót do stanu nieodkształconego gdy przestaną działać siły zewnętrzne*.

*Słownik Fizyczny Wiedzy Powszechnej z 1992 roku podaje: Siła sprężysta, siła reakcji sprężystej – siła działająca na odkształcane ciało stałe, stanowiąca wynik reakcji ciała na działanie deformujących je czynników. I dalej: W przypadku ciała odkształconego w sposób sprężysty s. s. przejawia się jako ta siła, która powoduje powrót ciała do pierwotnego stanu.*

Ściśnięta sprężyna naciska na ciężarek, który jednocześnie naciska na nią (Rys. 5). Zatem na drgający ciężarek nie działa siła sprężystości. Można co najwyżej mówić, że jest ona przyczyną drgań. Poruszająca się sprężyna na przemian naciska i ciągnie ciężarek. Siła nacisku działająca na ciężarek jest mniejsza od siły sprężystości (bo wypadkowa obu porusza sprężynę, patrz rys. 5). Siła nacisku ma tę samą wartość co siła sprężystości tylko w przypadku, gdy ciężarek nie ma przyspieszenia.



Rys. 4



Rys. 5

Gdy  $a \neq 0$ , można pominąć różnicę obu sił, jeśli sprężyna jest dużo lżejsza od ciężarka. Jednak pomijanie pewnego czynnika liczbowego w obliczeniach nie usprawiedliwia utożsamiania dwóch różnych oddziaływań.

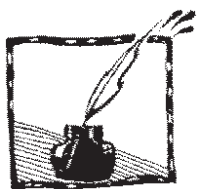
Rys. 5 może przedstawiać również ciała spoczywające na podłożu. Wtedy  $F_n = F_s$ . Niewłaściwe jest jednak mówienie, że na spoczywające ciała działa siła sprężystości podłoża. Siła sprężystości podłoża – zgodnie z cytowanymi definicjami – działa tylko na podłoże. Nie mówiąc już o tym, że nie zawsze podłoże jest sprężyste. Ślady kół czy płóz na śniegu są oczywistym na to dowodem.

Z energią sprężystości też nie postępujemy właściwie. Zacytujmy najpierw fragmenty definicji energii wewnętrznej. Najpierw *Słownik Fizyczny Wiedzy Powszechnej: Energia wewnętrzna – termin stosowany w dwóch znaczeniach. 1 (ogólnie) energia układu fizycznego związana z ruchem jego części składowych względem siebie i ich oddziaływaniem ze sobą tzn. różnica energii całkowitej układu i sumy jego energii kinetycznej, jako całości, i energii oddziaływania układu, jako całości, z otoczeniem.*

Teraz Wikipedia. *Energia wewnętrzna ( $E_w$  lub  $u$ ,  $U[a]$ ) – w termodynamice jest to całkowita energia układu będąca sumą energii potencjalnej i kinetycznej makroskopowych części układu, energii kinetycznej cząsteczek, energii potencjalnej oddziaływań międzycząsteczkowych i wewnątrzcząsteczkowych itd.*

Z definicjami energii wewnętrznej jest pewien problem. Nawiasem mówiąc, to też cokolwiek dziwne w tak ścisłej i „wzorcowej” nauce. Jednak z definicji wynika wyraźnie, że energia oddziaływań międzycząsteczkowych (a nawet makroskopowych części układu) to część energii wewnętrznej. Zatem energia sprężystości powinna być traktowana jako składnik energii wewnętrznej zgodnie z definicją tej ostatniej. Czemu zawsze wlicza się ją do energii mechanicznej ciała sprężystego? Lekceważenie własnych definicji jest zadziwiającym zjawiskiem w naszej pięknej i ścisłej nauce. Ignorowanie definicji energii wewnętrznej ma jeszcze inne poważniejsze konsekwencje. Temu zamierzam poświęcić kolejny artykuł.

Na koniec dygresja. Świadomie na rysunkach oznaczam tylko wartość wektora siły. Postępując zgodnie z uświęconą w podręcznikach tradycją, musiałbym np. siły na rys. 2 podpisać  $\vec{F}$  i  $-\vec{F}$  albo  $\vec{F}_{AB}$  i  $\vec{F}_{BA}$ . Czy nie prościej oznaczać tylko wartość wektora, skoro kierunek i zwrot są widoczne na rysunku? Jednak i dydaktycy, i nauczyciele (ich część, oczywiście) nie godzą się na takie uproszczenie. Szkoda. Wielka szkoda.



Recenzja powieści autorstwa Lucy  
i Stephen Hawkingów:  
*George i tajny klucz do wszechświata* oraz  
*George i poszukiwania kosmicznego skarbu*  
Wyd. Zysk i S-ka, Poznań 2019

Są to pierwsze dwie książki z serii powieści przygodowych popularyzujących wiedzę o Wszechświecie dla młodszych czytelników, których bohaterami jest kilkoro dzieci. Autorami są Lucy Hawking, pisarka i dziennikarka, niewątpliwie główny autor oraz jej ojciec, sławny i wybitny fizyk, zmarły w 2018 r. Stephen Hawking. Już choćby ze względu na autorów warto na te powieści zwrócić uwagę. Na temat literackiej jakości tych powieści piszący tę recenzję, wychowany na powieściach najpierw Verne'a, a potem Lema, woli się nie wypowiadać. Bardziej miarodajna dla potencjalnych czytelników będzie opinia wnuka zaprzyjaźnionej nauczycielki fizyki, któremu obie książki się spodobały. Fabuła powieści oparta jest na pomysle cudownego komputera, który właściwie nie jest komputerem, lecz elektroniczną nowoczesną wersją cudownej lampy Aladyna i na życzenie młodych bohaterów przenosi ich momentalnie w odległe miejsca Wszechświata. Nie trzeba wyjaśniać, że jest to baśń niemająca nic wspólnego z fizyką, ale wartości poznawczej tych książek to nie szkodzi.

Książki są napisane z zachwytem nad bogactwem i różnorodnością obiektów w Kosmosie i ten entuzjazm autorów winien udzielać się młodym czytelnikom. Informacje o tym, co istnieje poza Ziemią, podane są częściowo w głównym tekście powieści, ale przede wszystkim - w napisanych jasnym i prostym stylem dodatkach umieszczonych w miejscach, gdzie informacje te są potrzebne bohaterom. I tak możemy przeczytać, po co właściwie mamy latać do planet w Układzie Słonecznym, a potem do pobliskich gwiazd, czy jest lub było życie na Marsie, jak szukać inteligentnych kosmitów, jak światło rozchodzi się w przestrzeni kosmicznej, o budowie planet i gwiazdach podwójnych, i o wielu innych rzeczach. W drugiej powieści autorami większości dodatków są znani uczeni brytyjscy, więc czytelnik dostaje wiedzę od kompetentnych fachowców. Wielką zaletą obu książek jest duża liczba kolorowych fotografii obiektów kosmicznych z opisami.

Książkom zabrakło niestety starannej korekty (co jest obecnie nagminne nawet w najpoważniejszych wydawnictwach naukowych) i parę błędów w dodatkach prześlizgnęło się. W drugiej powieści dowiadujemy się ze str. 234, że największym satelitą w Układzie Słonecznym jest Ganimedes, a drugim jest Tytan, natomiast na str. 239 czytamy, że to Tytan jest największy. Faktycznie największy jest Ganimedes, lecz różnica jest niewielka, ma średnicę zaledwie o 110 km większą. Gorszy błąd jest na str. 67 pierwszej książki: naukowcy sądzą, że 90% masy wszystkich pierwiastków we Wszechświecie stanowi wodór. W rzeczywistości masa całego wodoru stanowi ok. 75% masy wszelkiej materii (kolejne wyniki

obserwacji są bliskie tej liczby), natomiast w przeliczeniu na liczbę wszystkich atomów, to atomy wodoru stanowią 90%, 9% atomów to hel, a wszystkie pozostałe pierwiastki stanowią nie więcej niż 1% masy i 1% liczby atomów.

Kwestią niewątpliwie sporną pomiędzy autorami i recenzentem jest kwestia, jakie informacje należy podawać w literaturze popularnonaukowej. W przekonaniu recenzenta winny to być informacje o faktach stwierdzonych i o koncepcjach teoretycznych, których dotąd nie potwierdzono, lecz o których jesteśmy przekonani, że są prawdziwe. Niestety obecnie dominuje tendencja, by szeroką publiczność informować o „nowalijkach”, czyli o pomysłach naukowców, których prawdziwość będzie można ustalić w nieokreślonej przyszłości i tej tendencji poddała się para naszych autorów. Na str. 282-283 pierwszej powieści Hawking pisze o swoim najślawniejszym pomysle, który ogłosił w 1975 r., czyli o tzw. promieniowaniu Hawkinga z czarnych dziur. Z przyczyn, o których nie można tu mówić, uzasadnienie tego pomysłu nie jest tak mocne, jak Hawking i wszyscy inni fizycy by sobie życzyli, a promieniowanie to, jeżeli rzeczywiście istnieje, wykryjemy dopiero w dalekiej przyszłości. Co więcej, promieniowanie to może składać się wyłącznie z fotonów i innych cząstek elementarnych, zatem wbrew temu, co czytamy na str. 283, jeżeli do czarnej dziury wpadnie astronauta, to po miliardach lat wyleci z niej nie on, lecz strumień pojedynczych protonów i elektronów, które tylko hipotetycznie będzie można przypisać atomom jego ciała.

I na koniec rzecz irytująca, bo wprowadza czytelnika w błąd. Istnienie innych istot rozumnych w Kosmosie jest sprawą frapującą, więc autorzy poświęcili temu jeden z dodatków w drugiej powieści (str. 92-93). Niestety, nasza wiedza o kosmitach jest zerowa: nie wiemy nic. Próbuje się jednak zasugerować, że coś wiemy i w tym dodatku przedstawiona jest tzw. formuła Drake’a pozwalająca wyliczyć, ile jest w Drodze Mlecznej cywilizacji, które usiłują porozumieć się z innymi. Wygląda ona wielce uczenie, lecz chwila zastanowienia prowadzi do wniosku, iż tych cywilizacji kosmicznych może być albo bardzo dużo, albo bardzo mało. Do tego wniosku można dojść i bez tej formuły, która jest przykładem wiedzy pozornej.

Zgodnie z zasadami recenzowania wskazaliśmy błędy i wady obu książek, by ostrzec czytelnika. Stanowią one drobny ich fragment i nie psują całości. W sumie, obie powieści dają dobrą porcję wiedzy o Wszechświecie podaną w atrakcyjnej dla młodych czytelników formie. Można je zatem śmiało polecić tej grupie czytelników.

*Leszek M. Sokołowski*



## Co czytać

**Meteory i meteoryty**, Marek Żbik, PWN 2019.

Meteoryty stanowią jedyne naturalne źródło informacji o składzie drobnych ciał kosmicznych, będących najbardziej pierwotną materią, z której uformowane zostały planety skaliste. Bez wyników badań meteorytów nie byłibyśmy w stanie zrozumieć początkowych etapów ewolucji Układu Słonecznego, jak też mechanizmów formowania się planet.

W niniejszej publikacji Autor szczegółowo przedstawił klasyfikację, budowę i genezę meteorytów. Zawarł w niej wyniki badań przeprowadzonych zgodnie z nowoczesnymi metodami geochemii elektronicznej, takimi jak: mikrosonda elektronowa, mikroskopia elektronowa i spektrometria mas.

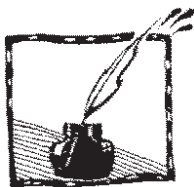
To doskonały przewodnik dla fanów Kosmosu oraz poszukiwaczy, kolekcjonerów, miłośników i badaczy meteorytów. Książka może stanowić ponadto przydatny materiał dla studentów wydziałów, gdzie wykładana jest wiedza o badaniach, eksploracji oraz eksploatacji przestrzeni kosmicznej i jej zasobów.

*Książka przejrzysto ukazuje sposób powstawania meteoroidów: pierwotnych, planetoidalnych, kometarnych i utworzonych w wyniku uderzeń w planety, księżycy i planetoidy. Zawiera bardzo szczegółowy opis wszystkich typów meteorytów oraz procesy ich powstawania. Przedstawione informacje są oparte na wynikach najnowszych badań, a wnioski dobrze uzasadnione.*



*Prof. dr hab. Stanisław Schillak  
Centrum Badań Kosmicznych PAN  
Obserwatorium Astrogeodynamiczne w Borówcu*





## WOMAI – naukowa perełka turystycznego Krakowa Świat moich wszystkich inspiracji

*Małgorzata Lebica*

*Studentka II roku Matematyki Stosowanej AGH*

WOMAI to zupełnie nowe miejsce, a równocześnie wyjątkowa perełka naukowa na turystycznej mapie Krakowa. Nazwa pochodzi od pierwszych liter angielskiego sformułowania *world of my all inspirations* (świat moich wszystkich inspiracji), co idealnie oddaje naukowo-sensoryczny charakter centrum. Celem, który przyświecał twórcom tego miejsca, było wniknięcie do naszych zmysłów i uświadomienie, jak wiele im zawdzięczamy, a z drugiej strony, jak mało o nich wiemy. Muzeum ma również wprowadzić nas w świat nauki, abyśmy potrafili spojrzeć na zjawiska fizyczne w zupełnie innym wymiarze, głównie poprzez doświadczenie, a także zabawę. *W stronę światła* i *W stronę ciemności* to dwie wystawy proponowane zwiedzającym, a łączy je jedno: inspiracja.

### Po ciemnej stronie

Jako istoty ludzkie obdarzeni zostaliśmy pięcioma zmysłami: wzrokiem, słuchem, węchem, smakiem oraz dotykiem. Dzięki nim jesteśmy w stanie odbierać kompleksowy obraz otaczającego nas świata. Jednak pierwszy z nich - wzrok, wydaje się odgrywać największą rolę w naszym funkcjonowaniu, bowiem przy jego pomocy rejestrujemy ponad 80% bodźców zewnętrznych. Niektórzy nie potrafią wyobrazić sobie życia bez tak ważnego narządu zmysłu, jakim są oczy. Od dziecka przekonujemy się o jego niewątpliwych zaletach: widok słońca o poranku, zorzy polarnej, aksamitnych płatków róż czy innych cudów natury wprawia nas w zachwyt, niekiedy w osłupienie. Jak w takim razie opisałibyśmy życie osób niewidomych? Nudne? Ciemne? Pozbawione koloru? Przecież bez wzroku nie są oni w stanie doświadczać tych samych emocji co my... Nic bardziej mylnego.

Wystawa *W stronę ciemności* jest wyjątkowym zaproszeniem do świata osób niewidomych. Podczas godzinnego zwiedzania poruszamy się po labiryncie pomieszczeń, w których nie ma ani krzty światła. Szybko przekonujemy się, że bez wzroku czujemy się zdezorientowani, bezbronni. Jest to sytuacja kompletnie dla nas nowa, bo – mimo szeroko otwartych oczu – nie widzimy nic. Trudno zaprzeczyć, iż o tym, że coś jest dla nas niezwykle cenne, przekonujemy się zazwyczaj w momencie, gdy to tracimy. Kiedy odczuwamy prawdziwy brak owego doznania, zaczynamy je bardziej doceniać. Podobnie w tym przypadku: od pierwszych chwil zdajemy sobie sprawę z tego, jak ważny jest dla nas zmysł wzroku. Jak zatem poradzić sobie z jego brakiem, gdy przed nami wszechogarniająca ciemność, a jedyne co słyszymy, to głos przewodnika? Przewodnika, który sam jest osobą niewidomą. „Ciemniacy”, bo tak mówią o sobie ci wspaniali pracowni-

cy ekspozycji, stają się przez chwilę naszą jedyną pomocą, jedynym poczuciem bezpieczeństwa w nieznanym nam dotąd świecie wiecznej ciemności. Bierzemy udział w pewnego rodzaju eksperymencie psychologicznym polegającym na zamianie ról - od chwili przekroczenia progu labiryntu to my stajemy się zależni od osób niewidomych. Nie należy się jednak obawiać. Oni z przyjemnością pomogą nam przejść przez ulicę pełną pędzących samochodów czy wybrać świeże owoce na targu. Rozbudowany system dźwiękowy i specjalne efekty akustyczne wykorzystywane na wystawie tworzą niezwykłą atmosferę dnia codziennego; słyszymy gwar ludzi na targu, warczenie silników przejeżdżających samochodów czy szemrzący strumyk. Dzięki temu możemy wczuć się w sytuacje z życia wzięte, jakbyśmy naprawdę byli ich uczestnikami.

Nasi niewidomi przewodnicy opowiadają również o tym, w jaki sposób oni postrzegają świat. Okazuje się, że tam, gdzie wzrok traci na znaczeniu, wyostają się inne zmysły i na ich podstawie również możemy wiele wywnioskować. Idąc ciemnym tunelem wzdłuż ściany, jesteśmy w stanie stwierdzić za pomocą dotyku, kiedy korytarz zakręci. Nasłuchując uważnie naszego przewodnika, potrafimy z pewnym przybliżeniem określić jego lokalizację. Powszechnie uważa się, że słuch muzyczny osób niewidomych jest dużo lepiej rozwinięty. Nie jest to jednak regułą. Bo przecież nie tak często spotykamy wielkich niewidomych muzyków, a i wówczas ich talent wynika również z innych, indywidualnych uwarunkowań. Wykorzystują oni jednak dużo więcej możliwości, jakie daje im słuch. Na wystawie my również jesteśmy do tego zachęceni. Do dyspozycji mamy przecież inne zmysły: czy bylibyśmy w stanie określić, jakie przyprawy znajdują się w słoikach, bez czytania etykiet, wykorzystując jedynie węch? Czy za pomocą dotyku odróżnimy kaszę od ryżu? A to tylko nieliczne przykłady, namiastka tego, z czym na co dzień muszą mierzyć się osoby niewidzące.

Wystawa wyprowadza nas z błędnego przekonania, iż niezdolność widzenia jest problemem odległym, niepojętym dla osoby, która nigdy z taką niedogodnością nie miała do czynienia. Z drugiej strony dowiadujemy się, że osoby niewidome czują i wiedzą dużo więcej, niż jesteśmy sobie w stanie wyobrazić. Podczas zwiedzania tej niesamowitej ekspozycji musimy polegać na naszym niewidomym przewodniku, pomocni mogą być także inni zwiedzający, mimo że są tak samo zdezorientowani jak my. Dostrzegamy zatem, jak ważne są dla nas relacje międzyludzkie. Początkowo czujemy strach, jednak kontynuując wyprawę w bezkresnym tunelu, ulegamy nieodpartemu wrażeniu, że to całkiem nowe doświadczenie wiele nas uczy. Powoli zaczynamy zagłębiać się w całkiem inny świat... chociaż z każdym krokiem dostrzegamy, że nie jest on nam wcale taki odległy. To wystawa, dzięki której „wyjście z ciemności” nabiera zupełnie nowego znaczenia.

### **Po jasnej stronie**

Po tak niezwykłym doświadczeniu, jakim jest podróż w całkowitej ciemności, czas na ponowne pobudzenie naszych zmysłów, tym razem w bardziej klasyczny

sposób. Przechodzimy zatem do świata nauki. Rzecz pozornie nam znana. Doświadczenia fizyczne oraz chemiczne od zawsze stanowiły nieodzowną część naszej edukacji. Niewątpliwie jest to najlepsza forma nauki. Łatwiej nam uwierzyć w coś, czego jesteśmy naoczniymi świadkami. Jednak co się za nimi kryje? Nawet spektakularne widowiska z udziałem fizyków zawsze mają naukowe podłoże. I chociaż mówi się, iż magik nigdy nie zdradza swoich sztuczek, to tym razem jest inaczej. Postaramy się nie tylko doświadczać, ale również zrozumieć. Wystawa *W stronę światła* otwiera nam oczy na to, co dzieje się wokół nas.

Na początek próbie poddamy naszą zdolność percepcji. Po wyjściu z ciemności teoretycznie możemy odetchnąć z ulgą - dysponujemy ponownie pięcioma zmysłami. Zatem wydawać by się mogło, że wędrówka stanie się łatwiejsza. Wystarczy rzut oka na obraz czy fotografię, żeby stwierdzić, co się na nich znajduje. Ale czy na pewno? Co, jeśli obraz jest jedynie iluzją, złudzeniem optycznym? Dzięki odpowiedniemu ustawieniu figur geometrycznych, grze światła i cienia odnosimy błędne wrażenie, iż na obrazie przedstawione są linie krzywe, ale gdy zmierzmy je za pomocą przyborów geometrycznych, przekonamy się, że linie te są do siebie równoległe. Czyżbyśmy zostali wprowadzeni w błąd? Przecież wzrok nie może nas aż tak oszukiwać. Wszystko wynika z pracy mózgu, to właśnie on odpowiada za interpretację tego, co odbierają zmysły. Gdy w tym samym czasie dociera do niego za dużo informacji, zaczyna się gubić, czego konsekwencją jest błędne wyciąganie wniosków. Analizując zmysł wzroku, nie sposób nie wspomnieć o świetle. Na wystawie mamy okazję przekonać się, z jakich podstawowych kolorów składa się światło białe. Czerwony, zielony oraz niebieski tworzą system RGB (ang. *red, green, blue*), a dzięki ich zmieszaniu w odpowiednich proporcjach uzyskamy każdą inną barwę. Zabawa kolorowymi cieniami pozwala nam zrozumieć fenomen łączenia się kolorów oraz powstawania cienia. Sami odkrywamy, co się stanie, gdy ze światła białego wyłączymy na przykład niebieski. Jaki wtedy uzyskamy kolor? A jeśli zasłonimy tak powstałe światło, jaki cień zobaczymy na ścianie? Niby o tym wszystkim wiemy z lekcji fizyki, ale czy potrafimy tę wiedzę wykorzystać w praktyce?

Jedną z dodatkowych atrakcji w centrum nauki WOMAI są warsztaty przeznaczone dla szkół. W ramach tej oferty organizowane są pokazy chemiczne, których główną tematykę stanowi zjawisko sublimacji oraz resublimacji. Dość efektywną substancją jest suchy lód, który wrzucony do gorącej wody bardzo szybko zmienia stan skupienia na gazowy (dwutlenek węgla). Bąbelki  $\text{CO}_2$  zwiększają powierzchnię parowania wody, która w konsekwencji również bardzo szybko paruje. Nazwa tej substancji jest nieco myląca, ale możemy się przekonać, że suchy lód wbrew pozorom jest niezwykle zimny – ma przecież około  $-78^\circ\text{C}$ . Trzymanie go w dłoni dłużej niż kilka sekund może się skończyć lekkim szczygnięciem, a w gorszym przypadku nawet odmrożeniem. Dzięki tak niskiej temperaturze powstająca para wodna zawarta w powietrzu szybko się schładza i skrapla, tworząc zjawiskową mgłę. Jest ona lżejsza od dwutlenku węgla, więc wylana na jego warstwę będzie się unosić ponad nim, tworząc chmury. Znajdując się w stanie

stałym, suchy lód zajmuje znacznie mniejszą objętość niż w naturalnej dla niego postaci gazowej. Poprzez sublimację ulega rozszerzeniu, a co za tym idzie, może być wykorzystany w różnego rodzaju eksplozjach. Tego typu wybuchy prezentowane są na pokazach w WOMAI, oczywiście w bezpiecznych warunkach oraz pod kontrolą chemików. Na dodatkowo organizowanych warsztatach możemy wystawić na próbę naszą skórę, spalając ją zjawiskowym płomieniem, ale bez obaw, nie zrobi nam on żadnej krzywdy.

Być może nie zdajemy sobie sprawy z tego, że zmysły bardzo mocno ze sobą współpracują. Niektórzy krzywią się już na sam widok cytryny, przypominając sobie jej kwaśny smak. Zdarza się, iż osoba uczulona na sierść kota dostaje reakcji alergicznej, widząc jego zdjęcie. Niezwykłym zjawiskiem jest synestezja, czyli mieszanie się zmysłów. Są ludzie, którzy potrafią łączyć działanie zmysłów w najmniej oczywisty sposób, na przykład słysząc kolory czy widząc dźwięki. Na wystawie my również możemy przez chwilę stać się synestetami. W jaki sposób? Światło jest falą elektromagnetyczną. Oznacza to, że każda barwa ma określoną długość oraz częstotliwość. Przykładowo: fioletowy ma największą częstotliwość spośród wszystkich kolorów tęczy. Dźwięki również są falami. Wiadomo, iż wysokie tony to te o dużej częstotliwości, w przeciwieństwie do dźwięków niskich. Skoro zarówno to, co widzimy - światło, jak i to, co słyszymy - dźwięk, to fale, możemy je ze sobą skojarzyć, porównując na przykład ich częstotliwości. I w ten właśnie sposób, wytwarzając ton wysoki, zobaczymy na zamontowanym ekranie kolor fioletowy. Pomijając aspekt fizyczny, dźwięki są w szczególności komponentami muzyki. Jednak, jak się okazuje, do jej tworzenia nie są potrzebne wyszukane instrumenty wymagające zaawansowanej wiedzy oraz słuchu muzycznego. Piękne brzmienia można wydobyć, mając w ręce jedynie szklany kieliszek i pocierając jego krawędź zwilżonym palcem. Gdy do kieliszka wlejemy wodę, uzyskamy dźwięk niższy. W ten właśnie sposób możemy stać się wirtuozami gry na kieliszkach.

Wizyta po „jasnej stronie” niewątpliwie budzi w nas ciekawość: do odkrywania, do interpretacji, do zagłębiania się w prawa fizyki rządzące w świecie, w którym żyjemy. W przeciwieństwie do „ciemnej” wystawy, tutaj możemy skupić wszystkie zmysły i wykorzystać drzemiący w nich potencjał. To również wystawa, która odsłania personalne umiejętności, być może takie, o których dotąd nie mieliśmy pojęcia. Każdy odkrywa tu coś innego, coś szczególnego: widząc, słysząc i czując, wchodzi na wyższy wymiar poznania. Zagadki iluzjonistyczne zaprezentowane na wystawie są jedynie pretekstem, aby skłonić nas do głębszej refleksji. Niektórzy odkrywają, jak wiele obrazów można dostrzec w *Pokoju miliona światel*, inni stają się instrumentalistami, a jeszcze inni przekonują się, jak to jest chodzić po suficie. Obdarzeni zostaliśmy szerokim wachlarzem możliwości, jakie dają nam zmysły i tylko od nas zależy, jak je zużytkujemy.

WOMAI jest młodym centrum, którego twórcy chcieli przede wszystkim zarażać nas swoją pasją do odkrywania i do wzajemnej inspiracji. Jego dokładna lokalizacja to: ul. Pawia 34 w Krakowie. Pracownicy tego miejsca to osoby zajmu-

jące się w różny sposób nauką: absolwenci fizyki, chemii, studenci matematyki czy psychologii, ale przede wszystkim prawdziwi pasjonaci wszelkiego rodzaju nauk. Oprócz nich równie ważną częścią ekipy są osoby niewidome, które mają mnóstwo dystansu do siebie i niezwykle poczucie humoru. Każdy z członków zespołu wnosi coś innego w to miejsce, dzieląc się swoimi odczuciami, przemyśleniami oraz mając swój indywidualny sposób oprowadzania gości. Centrum nieustannie się rozwija, za drzwiami pracowni pomysłowi konstruktorzy starają się tworzyć nowe eksponaty. Niedawno pojawiła się laserowa harfa, z której można wydobyć różnorodne dźwięki. W planach są również inne sensoryjne obiekty, ale nie ujawniamy wszystkiego od razu, niech na razie pozostaną owiane tajemnicą. Oferta centrum skierowana jest do każdego bez wyjątku. Jak już wspomniano, dla grup szkolnych oprócz regularnego zwiedzania organizowane są specjalne warsztaty. Szczegóły można znaleźć na stronie: [www.womai.pl](http://www.womai.pl). Wśród gości WOMAI znaleźli się uczniowie szkół podstawowych i liceów, ekspozycję odwiedziła również duża grupa osób niepełnosprawnych. Po „jasnej stronie” centrum przewodnicy mogą oprowadzać swoich gości w języku angielskim i francuskim, natomiast po „ciemnej stronie” po angielsku i po włosku. Grono zwiedzających ciągle się powiększa. Niewątpliwie coś ciekawego znajdą tu dla siebie rodziny z dziećmi, turyści z innych miast, ale także osoby preferujące zwiedzanie indywidualne. Inspirować można się w każdym wieku, zatem seniorzy również są zachęceni do skorzystania z oferty centrum. Wizyta w WOMAI nie wymaga zaawansowanej wiedzy naukowej, wystarczy pasja oraz chęć zgłębiania tajemnic natury. Niech wszyscy czują się zaproszeni na niesamowitą wyprawę po centrum nieustającej inspiracji!