

WSPÓŁODDZIAŁYWANIE WŁASNOŚCI
STRUKTURALNYCH I PROCESÓW
DYNAMICZNYCH W SIECIACH ZŁOŻONYCH

dr Piotr Fronczak

SPIS TREŚCI

I	AUTOREFERAT	2
A	DANE PERSONALNE	3
B	POSIADANE DYPLOMY, STOPNIE NAUKOWE	3
C	INFORMACJE O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH	3
D	WSKAZANIE OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO	4
D.1	Tytuł osiągnięcia naukowego	4
D.2	Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego	4
E	OMÓWIENIE CELU NAUKOWEGO I OSIĄGNIĘTYCH WYNIKÓW WW. PRAC WRAZ Z OMÓWIENIEM ICH EWENTUALNEGO WYKORZYSTANIA	5
E.1	Wprowadzenie	5
E.2	Cel prowadzonych badań	5
E.3	Szczegółowe omówienie prac składających się na cykl publikacji będących podstawą wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego	7
E.4	Podsumowanie	20
F	OMÓWIENIE POZOSTAŁYCH OSIĄGNIĘĆ NAUKOWO-BADAWCZYCH	21
F.1	Przed uzyskaniem stopnia doktora	21
F.2	Po uzyskaniu stopnia doktora	22
II	WYKAZ OPUBLIKOWANYCH PRAC NAUKOWYCH ORAZ INFORMACJA O OSIĄGNIĘCIACH DYDAKTYCZNYCH, WSPÓŁPRACY NAUKOWEJ I POPULARYZACJI NAUKI	26
G	PUBLIKACJE WCHODZĄCE W SKŁAD OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO	27
G.1	Publikacje naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR)	27
H	WYKAZ INNYCH OPUBLIKOWANYCH PRAC NAUKOWYCH (NIE WCHODZĄCYCH W SKŁAD OSIĄGNIĘCIA OMÓWIONEGO W PUNKCIE D) ORAZ WSKAŹNIKI DOKONAŃ NAUKOWYCH	28
H.1	Publikacje naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR)	28
H.2	Wynalazki oraz wzory użytkowe i przemysłowe, które uzyskały ochronę i zostały wystawione na międzynarodowych lub krajowych wystawach lub targach	31
H.3	Monografie, publikacje naukowe w czasopismach międzynarodowych lub krajowych spoza bazy JCR	31
H.4	Opracowania zbiorowe, katalogi zbiorów, dokumentacja prac badawczych, ekspertyz, utworów i dzieł artystycznych	32
H.5	Sumaryczny <i>impact factor</i> (IF) według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania	32
H.6	Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science	33
H.7	Indeks Hirscha według bazy Web of Science	33
H.8	Kierowanie międzynarodowymi i krajowymi projektami badawczymi oraz udział w takich projektach	33

H.9	Międzynarodowe i krajowe nagrody za działalność naukową albo artystyczną	34
H.10	Wygłoszenie referatów na międzynarodowych i krajowych konferencjach tematycznych	34
I	DOROBEK DYDAKTYCZNY I POPULARYZATORSKI ORAZ INFORMACJA O WSPÓŁ- PRACY MIĘDZYNARODOWEJ	35
I.1	Uczestnictwo w programach europejskich oraz innych programach międzynarodowych i krajowych	35
I.2	Aktywny udział w międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych	35
I.3	Udział w komitetach organizacyjnych międzynarodowych i krajowych konferencji na- ukowych	37
I.4	Otrzymane nagrody i wyróżnienia inne niż wymienione w punkcie H.9	38
I.5	Udział w konsorcjach i sieciach badawczych	38
I.6	Kierowanie projektami realizowanymi we współpracy z naukowcami z innych ośrod- ków polskich i zagranicznych oraz we współpracy z przedsiębiorcami, innymi niż wy- mienione w punkcie H.8	38
I.7	Udział w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism	38
I.8	Członkostwo w międzynarodowych i krajowych organizacjach oraz towarzystwach na- ukowych	38
I.9	Osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauki	38
I.10	Opieka naukowa nad studentami	39
I.11	Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze opiekuna naukowego lub promotora pomocniczego	40
I.12	Stáže w zagranicznych i krajowych ośrodkach naukowych lub akademickich	40
I.13	Wykonane ekspertyzy lub inne opracowania na zamówienie	40
I.14	Udział w zespołach eksperckich i konkursowych	40
I.15	Recenzowanie projektów międzynarodowych i krajowych	40
I.16	Recenzowanie publikacji w czasopismach międzynarodowych i krajowych	40
I.17	Inne osiągnięcia i pełnione funkcje nie wymienione w punktach I.1 - I.16	41

Część I

AUTOREFERAT

A DANE PERSONALNE

Imię i nazwisko: Piotr Fronczak

B POSIADANE DYPLOMY, STOPNIE NAUKOWE

Stopień naukowy doktora nauk fizycznych nadany 24 kwietnia 2003 r. przez Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej, tytuł rozprawy doktorskiej: *Kontrola i synchronizacja układów dynamicznych o różnej liczbie stopni swobody*, promotor: prof. dr hab. Janusz A. Hołyst, recenzenci: prof. dr hab. Jan Żebrowski, prof. dr hab. Tomasz Kapitaniak.

Tytuł magistra fizyki uzyskany 24 lutego 1998 r. na Wydziale Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej, tytuł pracy magisterskiej: *Analiza dynamiki solitonów w obecności sił niejednorodnych*, promotor: prof. dr hab. Janusz Hołyst, recenzent: prof. dr hab. Jan Żebrowski.

C INFORMACJE O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH**Obecne miejsce zatrudnienia:**

Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej
Zakład Fizyki Układów Złożonych
ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

2008-obecnie adiunkt, Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej.

2005-2008 staż naukowy w projekcie CREEN, VI PR UE (umowa zlecenie), Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej.

1998-2003 doktorant, Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej. ¹

¹ W latach 2000-2005 pracowałem jako informatyk w firmach Macrosoft S.A. oraz PBK BPH S.A.

D WSKAZANIE OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO STANOWIĄCEGO PODSTAWĘ POSTĘPOWANIA HABILITACYJNEGO

D.1 Tytuł osiągnięcia naukowego

Jako osiągnięcie naukowe w rozumieniu art. 16. ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65. poz. 595 ze zm.) przedstawiam cykl 10 publikacji pod wspólnym tytułem:

Współoddziaływanie własności strukturalnych i procesów dynamicznych w sieciach złożonych

D.2 Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego

1. P. Fronczak, A. Fronczak, J.A. Hołyst, *Self-organized criticality and coevolution of network structure and dynamics*, Physical Review E, vol. **73**, art. no. 046117 (2006). IF = 2,438
2. P. Fronczak, A. Fronczak, J.A. Hołyst, *Phase transitions in social networks*, European Physical Journal B, vol. **59**(1), pp. 133-139 (2007). IF = 1,356
3. J. Sienkiewicz, P. Fronczak, J.A. Hołyst, *Log-periodic oscillations due to discrete effects in complex networks*, Physical Review E, vol. **76**(6), art. no. 066102 (2007). IF = 2,483
4. P. Fronczak, A. Fronczak, J.A. Hołyst, *Kauffman Boolean model in undirected scale-free networks*, Physical Review E, vol. **77**, 036119 (2008). IF = 2,352
5. P. Fronczak, A. Fronczak, *Critical line in undirected Kauffman boolean networks - the role of percolation*, Journal of Physics A, vol. **41**, 224009 (2008). IF = 1,540
6. A. Fronczak, P. Fronczak, *Biased random walks on complex networks: the role of local navigation rules*, Physical Review E, vol. **80**, 016107 (2009). IF = 2,400
7. A. Fronczak, P. Fronczak, *Statistical mechanics of the international trade network*, Physical Review E **85**, 056113 (2012). IF = 2,313
8. P. Fronczak, *Theoretical approach and impact of correlations on the critical packet generation rate in traffic dynamics on complex networks*, European Physical Journal B, vol. **85**, p. 351 (2012). IF = 1,282
9. P. Fronczak, A. Fronczak, M. Bujok, *Exponential random graph models for networks with community structure*, Physical Review E, vol. **88**, 032810 (2013). IF = 2,313
10. M. Karpiarz, P. Fronczak, A. Fronczak, *International trade network: fractal properties and globalization puzzle*, Physical Review Letters, vol. **113**, 248701 (2014). IF₂₀₁₃ = 7,728²

Całkowity impact factor ww. prac wynosi: 26,205.

² Jeśli nie zostało zaznaczone, że jest inaczej, współczynnik wpływu (*impact factor*, IF) został podany dla roku, w którym artykuł został opublikowany.

E OMÓWIENIE CELU NAUKOWEGO I OSIĄGNIĘTYCH WYNIKÓW WW. PRAC WRAZ Z OMÓWIENIEM ICH EWENTUALNEGO WYKORZYSTANIA

E.1 Wprowadzenie

Publikacje [1–10], składające się na osiągnięcie naukowe będące podstawą wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego, poruszają zagadnienia z zakresu fizyki sieci złożonych, a w szczególności omawiają

- metody modelowania sieci w oparciu o pożądane charakterystyki globalne (prace [7, 9, 10]),
- przemiany strukturalne sieci mające charakter przejść fazowych (prace [2, 9]) oraz
- wpływ zmian strukturalnych tychże sieci na dynamikę zachodzących w nich procesów (prace [1, 3–8, 10]).

E.2 Cel prowadzonych badań

Wiele rzeczywistych układów przyjmuje postać sieci, czyli układu węzłów oraz połączeń (lub oddziaływań) między nimi. Przykładami układów o topologii sieci są m.in. Internet, sieci komunikacyjne (np. sieci drogowe, telefonia stacjonarna i komórkowa), sieci elektryczne, sieci społeczne, oraz sieci zależności pokarmowych. Jeszcze pod koniec ubiegłego wieku, do modelowania układów sieciowych wykorzystywane były zazwyczaj siatki periodyczne i grafy przypadkowe. Powstanie na przełomie ostatnich dwóch dekad ogólnodostępnych baz danych gromadzących informacje o topologiach sieci rzeczywistych ujawniło, że mają one szereg specyficznych cech, które nie były uwzględniane ani w modelach periodycznych, ani w modelach przypadkowych [11–13]. Stało się jasne, że, ponieważ w coraz większym stopniu jesteśmy uzależnieni od sieci, powinniśmy zrozumieć zasady rządzące ewolucją i dynamiką tych układów.

W wielu przypadkach struktura sieci i jej funkcjonalność są ze sobą ściśle związane. Dzięki temu, dysponując uproszczonym modelem jesteśmy w stanie przewidzieć zachowanie się badanej sieci w wielu różnych sytuacjach. Co więcej, znając podstawowe reguły rządzące ewolucją sieci możemy w pewien sposób wpływać na tę ewolucję. Na przykład, gdybyśmy dokładnie poznali strukturę sieci zależności pokarmowych w różnych ekosystemach, z pewnością ułatwiłoby to ochronę gatunków zagrożonych wyginięciem. Znajomość reguł rządzących ewolucją Internetu umożliwiłaby natomiast projektowanie efektywniejszych protokołów sieciowych. W przypadku sieci WWW modele teoretyczne są już teraz wykorzystywane przy tworzeniu oraz testowaniu nowoczesnych wyszukiwarek internetowych.

Główną motywacją badań przedstawionych w cyklu prac [1–10] była właśnie próba zrozumienia, w jaki sposób topologia sieci wpływa na procesy zachodzące w takich układach. Dobrym przykładem w tym zakresie jest przedstawiona w pracach [4, 5] analiza modelu Kauffmana na sieciach przypadkowych. Analiza ta pozwoliła określić warunki stabilności dla logicznych sieci przypadkowych wobec niewielkiego zaburzenia stanów poszczególnych węzłów. Z uwagi na to, że model Kauffmana już od wielu lat jest powszechnie wykorzystywany do modelowania sieci genetycznych i badania odporności tych sieci na mutacje

poszczególnych genów, uzyskane w pracach [4, 5] wyniki, dotyczące m.in. położenia (w przestrzeni parametrów stanu układu) linii krytycznej oddzielającej fazy uporządkowanego i chaotycznego zachowania się tego modelu, oraz wpływu korelacji międzywęzłowych na położenie linii krytycznej mogą znacząco przybliżyć społeczność naukową do zrozumienia zasad rządzących funkcjonowaniem sieci genetycznych.

Kolejnym przykładem w tym zakresie, jest analiza błędzenia przypadkowego w sieci złożonej. W pracach [6, 8] badając model ruchu pakietów wędrujących po sieci przypadkowej (np. po Internecie) pokazano, że założenie o niezależności pakietów pozwala wyznaczyć krytyczną wartość tempa generacji pakietów, powyżej której układ przechodzi z fazy swobodnego przepływu do fazy przepięnienia (obserwowane zjawisko posiada cechy ciągłej przemiany fazowej). Pokazaliśmy również, jaki jest wpływ dwupunktowych korelacji strukturalnych na wspomnianą linię przemiany fazowej.

Analizie sieci rzeczywistych poświęcone zostały dwie prace dotyczące sieci handlu światowego [7, 10]. Choć procesy dynamiczne nie zostały w nich opisane *explicite*, to przedstawione wyniki badań należy rozpatrywać w kontekście potencjalnego modelowania przepływów finansowych, czy też propagowania się kryzysów wśród powiązanych gospodarczo krajów. W pierwszej z prac [7], jeden z najpopularniejszych modeli ekonometrycznych, tzw. grawitacyjny model handlu (ang. *gravity model of trade*) [14], został zdefiniowany w języku wykładniczych grafów przypadkowych [18]. Dzięki temu, stało się możliwe opracowanie bardzo ogólnego, nieznanego ekonomistom twierdzenia (typu fluktuacje-odpowiedź), które pokazuje, w jaki sposób zmiana produktu krajowego brutto handlujących ze sobą państw wpływa na wielkość bilateralnej wymiany handlowej między tymi państwami. Twierdzenie to znalazło potwierdzenie w danych rzeczywistych. Druga z prac poświęcona jest heterogenicznej strukturze sieci handlu światowego. Wykazując jej fraktalny charakter wyjaśniliśmy jeden z najważniejszych paradoksów współczesnej makroekonomii, tzw. zagadkę rosnącego znaczenia odległości w procesie globalizacji (ang. *distance puzzle*) [15].

Choć zazwyczaj to zmiana struktury wpływa na cechy zjawisk dynamicznych zachodzących na sieci, to czasami może również pojawić się zjawisko odwrotne - zmiana struktury sieci może być rezultatem zachodzącego na niej procesu. W jednej z prac [1] rozważamy model, w którym oba te zjawiska oddziałują na siebie jednocześnie. W modelu tym tzw. proces sypania piasku (ang. *sandpile model*) - będący klasycznym modelem zjawiska samoorganizującej się krytyczności (ang. *self-organized criticality (SOC)*) [16] - prowadzi do reorganizacji struktury sieci, co w konsekwencji wpływa na zmianę wykładników krytycznych i klasy uniwersalności modelu SOC.

Oprócz typowych zjawisk dynamicznych, w których węzły i połączenia międzywęzłowe stanowią jedynie zbiór ustalonych kanałów komunikacyjnych czy transportowych, istnieje grupa procesów zdefiniowanych nie *na* sieci, ale bezpośrednio dotycząca struktury sieci. Przykładem jest tutaj trwająca w czasie reorganizacja struktury połączeń, która wynika ze zmiany parametrów definiujących sieć lub zmiany oddziałujących na sieć warunków zewnętrznych. Reorganizacja taka może zachodzić w sposób płynny lub wykazywać cechy ciągłej lub nieciągłej przemiany fazowej. W naszych pracach [2, 9] procesy tego typu pojawiają się w modelach wykorzystujących, formalizm wykładniczych grafów przypadkowych (ang. *exponential random graphs*) [18]. W pracy [2] badając model sieci współpracy między grupami naukowców, pokazaliśmy, że diagram fazowy tego modelu sieci charakteryzuje się ogromnym bogactwem stabilnych i metastabilnych struktur sieciowych. Z kolei, w pracy [9], mając na uwadze, iż w wielu sieciach rzeczywistych przynależność węzłów

do grup wpływa na funkcjonowanie całej sieci, zaproponowaliśmy proces prowadzący do formowania się modułów w sieci (ang. *community structures*) [19].

E.3 Szczegółowe omówienie prac składających się na cyklu publikacji będących podstawą wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego

[1] P. Fronczak, A. Fronczak, J.A. Hołyst, *Self-organized criticality and coevolution of network structure and dynamics*, *Physical Review E*, vol. 73, art. no. 046117 (2006).

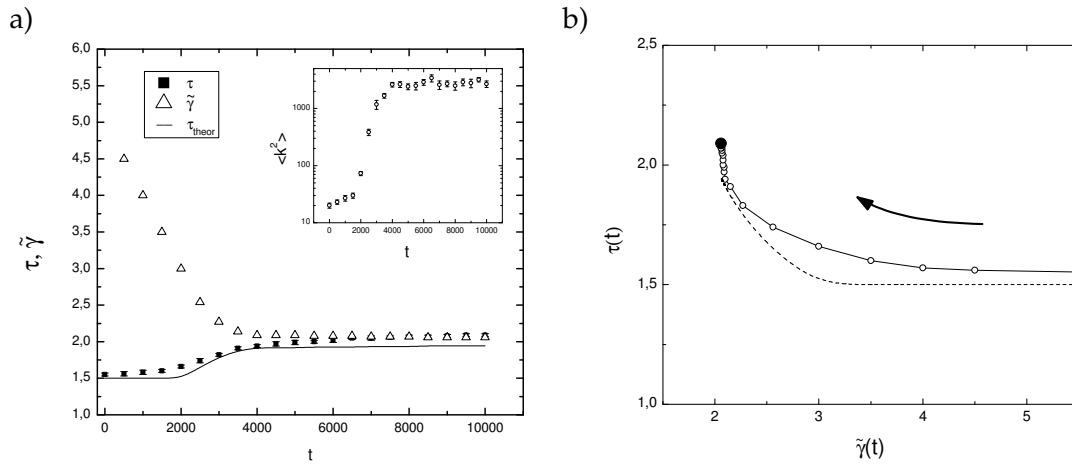
Samoorganizująca się krytyczność (SOC) jest to zjawisko, w którym układ złożony spontanicznie dochodzi do stanu krytycznego bez konieczności sterowania czy interwencji z zewnątrz [16]. W takim spontanicznie utrzymywanym stanie model układu wykazującego SOC charakteryzuje się szeregiem potęgowych praw skalowania, opisujących np. zasięg czy czas zachodzących w układzie zdarzeń. Zjawisko to obserwowane jest również do pewnego stopnia w układach rzeczywistych, czego przykładem mogą być trzęsienia ziemi, rozbłyski słoneczne, pożary lasu, czy kaskady aktywacji w sieciach neuronowych.

Przed opublikowaniem pracy [1] zjawisko samoorganizującej się krytyczności w sieciach złożonych badano w oparciu o ustaloną niezmienną w czasie strukturę sieci. Po raz pierwszy uwagę na związek między potęgowym charakterem skalowania się intensywności zdarzeń a potęgowym rozkładem stopni wierzchołków w sieci złożonej zwróciła M. Paczuski w dosyć skomplikowanym wieloparametrowym modelu kaskad przełączania się linii pola magnetycznego w atmosferze Słońca [20]. W pracy [1] przedstawiliśmy bardzo prosty mechanizm wykazujący omawiany związek, a polegający na współoddziaływaniu zjawiska SOC zachodzącego na strukturze sieci złożonej z reorganizacją tejże struktury.

W tym celu wykorzystaliśmy najbardziej popularny model wykazujący SOC - model sypania piasku [16], w którym każdemu węzłowi sieci przypisana jest zmienna określająca liczbę ziarenek piasku znajdujących się w tym węźle oraz pojemność węzła odpowiadająca w najprostszym przypadku liczbie jego najbliższych sąsiadów (stopniowi). Ponieważ ziarenka są sukcesywnie dodawane (w sposób losowy) do układu, w pewnym momencie, gdy liczba ziarenek w danym węźle przekroczy jego pojemność, następuje dystrybucja ziarenek do wszystkich sąsiadów tego węzła. Może to spowodować przekroczenie pojemności jednego (lub kilku) z sąsiednich węzłów prowadząc do następnej dystrybucji ziarenek, a w konsekwencji do kaskady takich zdarzeń. W modelu takim, w sieci o potęgowym rozkładzie stopni wierzchołków $P(k) \sim k^{-\gamma}$, można pokazać [21], że wykładnik prawa skalowania się rozmiaru kaskad τ_{theor} jest funkcją wykładnika γ

$$\tau_{\text{theor}} = \frac{\gamma}{\gamma - 1}. \quad (1)$$

W pracy [1] rozszerzyliśmy powyższy model o proces przełączania się krawędzi polegający na tym, że po każdej kaskadzie o rozmiarze A , do węzła rozpoczynającego kaskadę przełączanych jest A krawędzi prowadzących pierwotnie do innych węzłów. Proces ten sprawia, że dowolna sieć, (np. klasyczny graf przypadkowy Erdosa-Renyi'ego (ER) o rozkładzie Poissona stopni węzłów), reorganizuje się uzyskując potęgowy charakter skalowania się stopni węzłów. Ponadto, wraz ze zmianą struktury połączeń w sieci bezskalowej, zmienia się wykładnik skalowania γ . Wpływa to, niczym sprzężenie zwrotne, na charakterystyki procesu dynamicznego zachodzącego *na sieci*, gdyż, jak wynika z równania (1), zmienia się również wykładnik τ .



Rys. 1: a) Proces dochodzenia omawianego modelu do stanu równowagi. Linia ciągła przedstawia wartość wykładnika τ_{theor} określoną przez równanie (1); b) Zależność wykładnika τ of wykładnika $\tilde{\gamma}$. Strzałka pokazuje kierunek ruchu w przestrzeni obserwacji, wzdłuż którego następuje proces dochodzenia do stanu równowagi. Linia przerywana przedstawia zależność teoretyczną określoną przez równanie (1).

Wyniki symulacji numerycznych i proces dochodzenia omawianego modelu do stanu równowagi przedstawia rysunek 1a. Wykładnik $\tau(t)$ rośnie od wartości 1.5 (zgodnej ze znanym rezultatem dla sieci ER [22]) dla początkowej, wygenerowanej zupełnie przypadkowo struktury połączeń, do wartości ok. 2.1. Jednocześnie, parametr $\tilde{\gamma}(t)$ (który może być rozumiany jako uogólnienie wykładnika γ dla sieci niekoniecznie wykazujących potęgowy rozkład stopni wierzchołków) maleje od nieskończoności (dla sieci ER) również do wartości ok. 2.1. Fakt, że wartości $\tau(t)$ zgadzają się z wartością τ_{theor} określoną przez równanie (1) pozwala wnioskować, że układ w trakcie ewolucji porusza się wzdłuż trajektorii określonej przez analogiczne równanie (patrz rys. 1b)

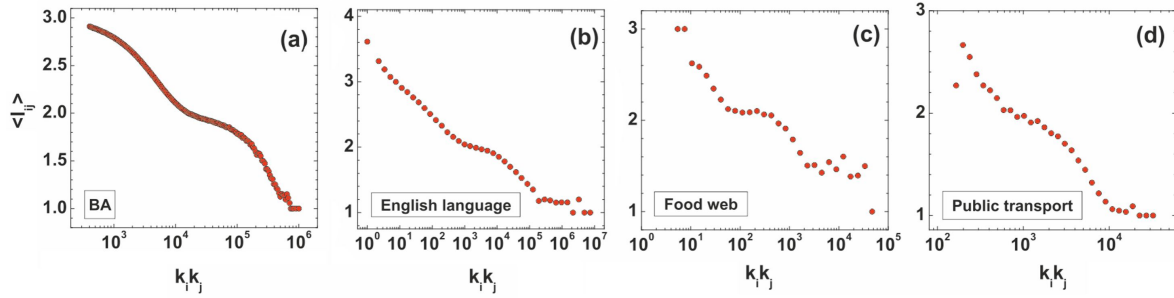
$$\tau(t) = \frac{\tilde{\gamma}(t)}{\tilde{\gamma}(t) - 1}, \quad (2)$$

a punkt równowagi, $\tilde{\gamma} = \tau = 2$, może być obliczony na podstawie równania (2), gdy uwzględni się zaobserwowaną numerycznie relację $\tilde{\gamma} = \tau$. Warty odnotowania jest fakt, że ów zaobserwowany przez nas punkt równowagi jest tożsamy dla znacznie szerszej klasy modeli SOC (np. [20, 23]), co sugerować może uniwersalność tej wartości w modelach, w których występuje sprzężenie oddziaływań między strukturą sieci a dynamiką zachodzącego na niej zjawiska.

[3] J. Sienkiewicz, P. Fronczak, J.A. Hołyst, *Log-periodic oscillations due to discrete effects in complex networks*, *Physical Review E*, vol. 76(6), art. no. 066102 (2007).

W pracy [3] badaliśmy efekt logarytmiczno-periodycznych oscylacji obserwowanych w danych rzeczywistych w zależności średniej najkrótszej odległości między parami węzłów od iloczynu ich stopni (rys. 2). Wykorzystując formalizm opracowany przez nas w pracy [25] podaliśmy teoretyczne wyjaśnienie tego zjawiska. W znanym dotychczas w literaturze wzorze na średnią najkrótszą drogę $\langle l_{ij} \rangle$ między węzłami o stopniach k_i oraz k_j

$$\langle l_{ij} \rangle = \frac{-\ln(k_i k_j) - \gamma}{\ln B} + \frac{1}{2} + R \quad (3)$$



Rys. 2: a) Przykłady występowania efektu oscylacji logarytmiczno-periodycznych w różnych sieciach: a) modelu BA, b) sieci językowej, c) sieci zależności pokarmowych, d) sieci transportowej.

gdzie A i B są funkcjami stopni węzłów i oraz j , a $\gamma = 0.5772$ jest stałą Eulera, wyraz

$$R = \sum_{n=1}^{\infty} R_n \equiv 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\int_0^{\infty} \exp(-AB^x) \cos(2n\pi x) dx \right), \quad (4)$$

był zaniedbywany. Pokazaliśmy, że w przypadku sieci gęstych (o dużym średnim stopniu węzłów), należy uwzględnić tę poprawkę, a obserwowane oscylacje wynikają z efektów dyskretnych rozkładu długości najkrótszych dróg występujących w tych sieciach.

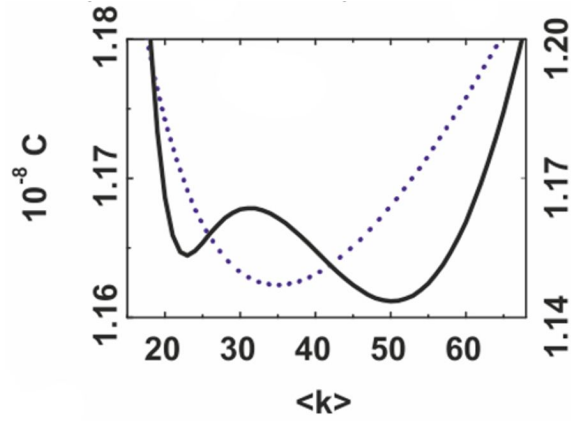
Badaliśmy również, w oparciu o obserwowane oscylacje, model optymalizacji sieci zakładający minimalizację kosztów funkcjonowania sieci. Model uwzględniał dwa aspekty ekonomiczne: cenę utworzenia i utrzymania połączeń międzywęzłowych (proporcjonalną do całkowitej liczby krawędzi sieci) oraz cenę związaną z czasem przesyłania informacji (proporcjonalną do średniej najkrótszej drogi między dwoma węzłami):

$$C = (1 - \lambda) \frac{N}{2} \langle k \rangle + \lambda \binom{N}{2} \langle l \rangle. \quad (5)$$

Parametr λ kontrolował proporcję między dwoma rodzajami kosztów. Typowym rozwiązaniem tego problemu jest unimodalna funkcja kosztu z minimum dla pewnej pośredniej wartości $\langle k \rangle$. Jednakże dla pewnego zakresu parametru λ rozwiązanie posiada dwa minima (rys. 3). Prowadzi to do wniosku, że operator sieci działający zgodnie z regułą (5) musi pamiętać, że poprawa wydajności sieci (tworzenie nowych połączeń) może prowadzić do czasowego wzrostu kosztów, a inwestycja w rozbudowę infrastruktury ponownie przyniesie korzyść po przekroczeniu bariery związanej z istnieniem lokalnego maksimum funkcji (5) między dwoma minimami.

[2] P. Fronczak, A. Fronczak, J.A. Hołyst, *Phase transitions in social networks*, *Eur. Phys. J. B* 59, 133 (2007).

Formalizm wykładniczych grafów przypadkowych [18], oparty na zasadzie maksymalnej entropii [17], jest atrakcyjnym narzędziem dla fizyka, gdyż wykorzystuje idee zespołów sta-



Rys. 3: Zależność funkcji kosztu C od średniego stopnia wężła $\langle k \rangle$ dla sieci bezskalowej o $N = 10^6$ węzłach, wykładniku skalowania $\gamma = 3.0$ i dla parametru $\lambda = 5.4 \cdot 10^{-4}$. Lewa oś pionowa odpowiada wartościom funkcji kosztu uwzględniającej (linia ciągła) wprowadzoną poprawkę (4), a prawa wartościom funkcji bez poprawki (linia przerywana).

tystycznych. W odniesieniu do sieci przypadkowych, pojęcie zespołu statystycznego oznacza zbiór sieci, $\mathcal{G} = \{G\}$ (np. zbiór wszystkich grafów prostych o ustalonej liczbie wierzchołków, N), w którym każda sieć ma określone prawdopodobieństwo realizacji, $P(G)$. W wykładniczych grafach przypadkowych prawdopodobieństwo to jest opisane funkcją wykładniczą

$$P(G) \propto e^{H(G)}, \quad (6)$$

gdzie $H(G)$ jest tak zwanym strukturalnym hamiltonianem grafu

$$H(G) = \sum_{i=1}^r \theta_i \chi_i(G). \quad (7)$$

Parametry θ_i są odpowiednikami zewnętrznych pól działających na sieć. Ustalając wartości tych pól, wymuszamy odpowiednie wartości oczekiwane $\chi_i(G)$ interesujących nas charakterystyk sieciowych.

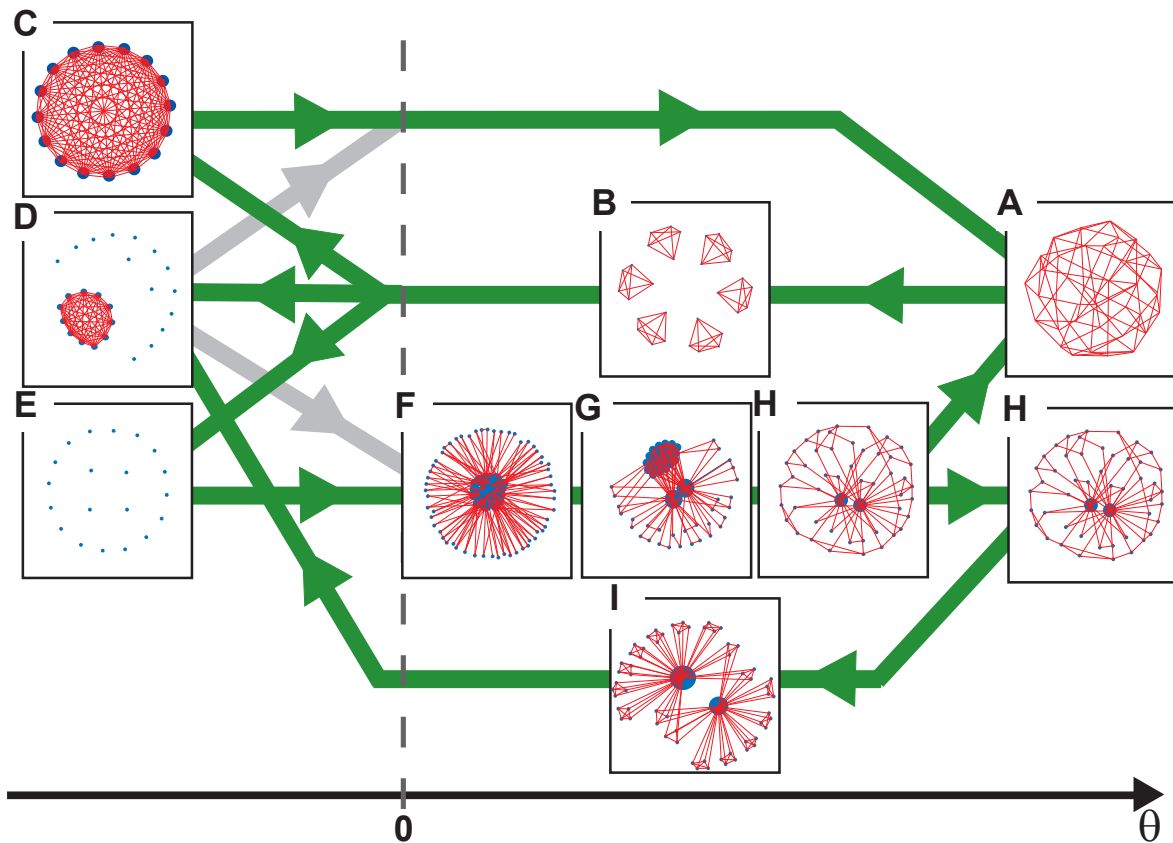
W pracy [2] zbadaliśmy model wykładniczych grafów przypadkowych o hamiltonianie

$$H(G) = \theta W(G) + \alpha C(G), \quad (8)$$

gdzie $C(G)$ oznacza współczynnik gronowania badanych sieci, zaś $W(G)$ jest średnią produktywnością węzłów, przy czym produktywność pojedynczego wężła, p_i , zdefiniowana jest jako nieliniowa funkcja jego stopnia,

$$p_i = k_i e^{-k_i/h}, \quad (9)$$

gdzie h jest pewnym optymalnym stopniem wężła. Model ten opisuje sieć współpracy naukowców w projektach wielozespołowych przy założeniu, że instytucja finansująca (np. Komisja Europejska) kładzie nacisk na dwie cechy finansowanych projektów: intensywność współpracy, której miarą w modelu jest współczynnik gronowania oraz produktywność



Rys. 4: Diagram przedstawiający spektrum możliwych przemian strukturalnych zachodzących wraz ze zmianą parametru θ . Szczegóły rysunku w pracy [2].

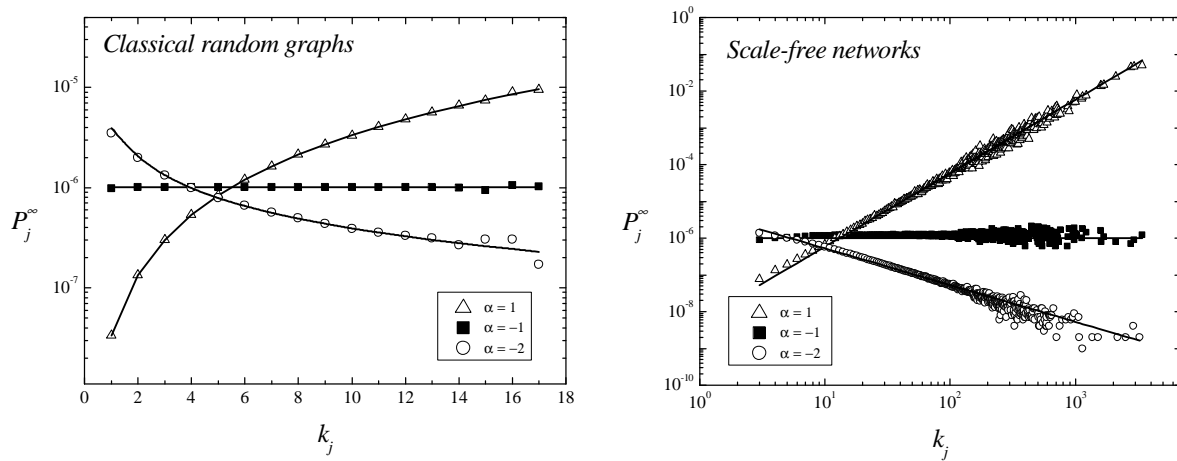
zespołu. W niniejszej pracy produktywność naukowców uzależniona była od liczby współpracowników, k_i . Gdy k_i jest małe, wtedy wraz ze wzrostem liczby najbliższych sąsiadów produktywność węzła rośnie, co opisuje czynnik k_i we wzorze (9). Jednakże, zbyt wiele równoległe prowadzonych projektów skutkuje obniżeniem efektywności pracy, co opisuje czynnik wykładniczy $e^{-k_i/h}$.

Chociaż badany hamiltonian (8) nawiązywał do znanego z literatury hamiltonianu opisującego tzw. model Straussa [24] (w którym zamiast współczynnika gronowania pojawia się liczba trójkątów, a zamiast średniej produktywności - średnia liczba krawędzi), to przestrzeń stanów zespołu sieci o tym hamiltonianie, okazała się mieć niezwykle skomplikowane własności. W pracy [4] pokazaliśmy, że diagram fazowy tego modelu sieci charakteryzuje się ogromnym bogactwem stabilnych i metastabilnych struktur sieciowych (rys. 4) oraz przeprowadziliśmy obliczenia analityczne wyjaśniające przyczyny podstawowych przemian strukturalnych. Zwróciliśmy również uwagę na podobieństwo między wybranymi strukturami, a rzeczywistymi sieciami współpracy w projektach europejskich. Należy podkreślić, że część przemian zaobserwowanych w trakcie badań zachodzi jedynie dla układów skończonych. Ponadto wraz ze wzrostem rozmiaru sieci, przemiana może zmienić swój charakter i doprowadzić do powstania struktury innego typu. Oznacza to, że nie mówimy tu o typowych przejściach fazowych w ujęciu fizyki teoretycznej układów w granicy termody-

namicznej, lecz raczej o przemianach strukturalnych w układach społecznych, w których liczba elementów jest zawsze ograniczona.

- [6] A. Fronczak, P. Fronczak, *Biased random walks on complex networks: the role of local navigation rules*, *Physical Review E*, vol. 80, 016107 (2009).

Konieczność analizy zjawiska błędzenia przypadkowego na sieciach o potęgowym rozkładzie stopni wierzchołków wynika z faktu, że jest to jeden z obserwowanych w sieciach rzeczywistych mechanizmów transportu i wyszukiwania (w szczególności w Internecie) [26]. W odróżnieniu od algorytmów opartych na poszukiwaniu najkrótszej drogi między dwoma wybranymi węzłami, metody oparte o zjawisko błędzenia przypadkowego nie wymagają znajomości globalnej topologii sieci [27]. Ponadto umożliwiają one uniknięcie przeciążenia kluczowych węzłów w sieci, gdyż większość najkrótszych dróg prowadzi przez występujące w mniejszości tzw. huby (czyli węzły o szczególnie wysokim stopniu).



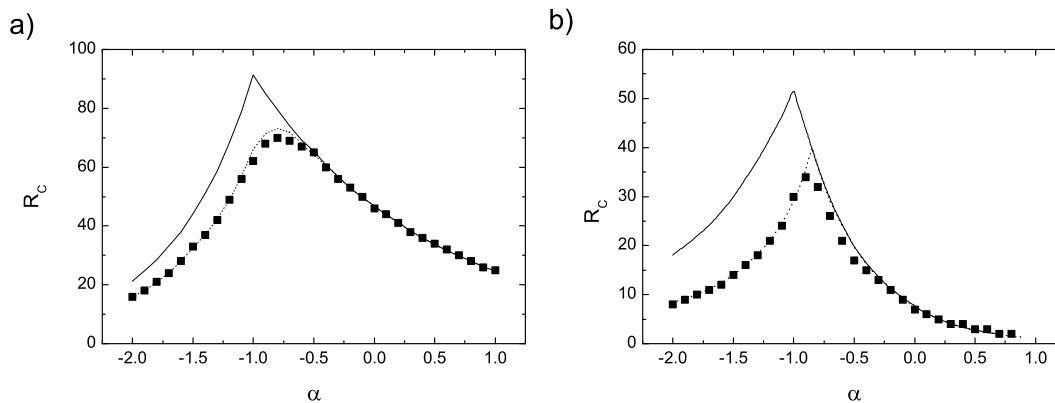
Rys. 5: Stacjonarne rozkłady prawdopodobieństw znalezienia cząstki w wierzchołku j o stopniu k_j w granicy nieskończonych czasów obliczone dla różnych wartości parametru α w klasycznych grafach przypadkowych i w sieciach o potęgowym rozkładzie stopni wierzchołków. Linie ciągłe reprezentują wyprowadzone zależności analityczne.

W pracy [6] analizowano ukierunkowany ruch cząstki w nieskorelowanych sieciach przypadkowych o dowolnym rozkładzie stopni wierzchołków. W badanym modelu ukierunkowanie było realizowane poprzez preferencyjne prawdopodobieństwo przejścia cząstki z wierzchołka i do wierzchołka j , będące funkcją stopnia k_j wierzchołka docelowego, tj. $p_{ij} \propto k_j^\alpha$. Wyprowadzono wyrażenie na stacjonarny rozkład prawdopodobieństwa znalezienia cząstki w wierzchołku i o stopniu k_i w granicy nieskończonych czasów. Obliczono również średnie czasy pierwszego przejścia cząstki między dowolną parą węzłów. Wyrażenia te są uogólnieniem wyprowadzonych wcześniej wyrażeń opisujących dynamikę cząstki Browna na sieci przypadkowej. Za pomocą metod renormalizacyjnych przeanalizowano również wpływ tzw. przeszukiwania cyklicznego (ang. *cyclic search*) na czasy przejścia między losowo wybranymi węzłami sieci.

Wszystkie powyższe wyniki analityczne zostały potwierdzone w wyniku symulacji numerycznych w sieciach o strukturze klasycznego grafu przypadkowego jak i w sieciach o potęgowym rozkładzie stopni wierzchołków (rys. 5).

- [8] P. Fronczak, *Theoretical approach and impact of correlations on the critical packet generation rate in traffic dynamics on complex networks*, *European Physical Journal B*, vol. 85, p. 351 (2012).

Wyniki przedstawione w pracy [6] otworzyły drogę do wyjaśnienia pewnych dynamicznych własności znanego wcześniej modelu ruchu pakietów w sieciach telekomunikacyjnych [27]. Model ten uwzględniał generowanie pakietów, poruszanie się ich po sieci i usuwanie po dotarciu do węzła będącego adresatem pakietu, a także ograniczoną przepustowość węzłów reprezentujących routery. W modelu tym zaobserwowano numerycznie zjawisko przejścia fazowego polegającego na progowej wartości generowania pakietów, powyżej której swobodny dotychczas przepływ pakietów ustępuje miejsca stanowi całkowitego przepełnienia sieci. W stanie tym routery, sterujące transportem pakietów, nie nadążają z dystrybucją pakietów, co prowadzi do ich zablokowania.



Rys. 6: Krytyczna wartość generowania pakietów R_C dla różnych wartości parametru α odpowiedzialnego za preferencyjny wybór następnego węzła w klasycznych grafach przypadkowych (a) oraz w sieciach o potęgowym rozkładzie stopni wierzchołków (b). Czarne kwadraty przedstawiają wyniki symulacji numerycznych, natomiast linie ciągłe i przerywane reprezentują odpowiednio - uproszczone oraz uwzględniające heterogeniczność wśród węzłów o tym samym stopniu - wyniki teoretyczne.

W pracy [8], w oparciu o formalizm błędzenia przypadkowego w nieskorelowanych sieciach o dowolnym rozkładzie stopni wierzchołków [6], opracowaliśmy teorię umożliwiającą wyjaśnienie przejścia fazowego pomiędzy stanem swobodnego przepływu pakietów a fazą przepełnienia się sieci. W fazie przepełnienia liczba pakietów gromadzonych w sieci narasta liniowo w czasie, co jest konsekwencją nieskończonego średniego czasu dojścia pakietu do miejsca przeznaczenia. Teoria ta została oparta o obserwację, iż w stanie swobodnego przepływu pakietów w sieciach złożonych pakiety można traktować jak cząstki nieoddziałujące ze sobą. Oddziaływanie zaczyna mieć znaczenie dopiero w pobliżu punktu krytycznego. Teoria umożliwiła ilościowe oszacowanie krytycznej wartości tempa generacji pakietów w sieciach przy użyciu przez pakiet strategii (omówionej w pracy [6]) preferencyjnego

wyboru następnego węzła. Pokazaliśmy, że wspomniana krytyczna wartość tempa generacji pakietów jest prostą funkcją stacjonarnego prawdopodobieństwa obsadzenia węzłów w procesie błędzenia przypadkowego oraz średniego czasu przejścia pojedynczej cząstki z węzła źródłowego do węzła przeznaczenia w tym procesie.

Ponadto, przedyskutowaliśmy wpływ na omawiane zjawisko korelacji międzywęzłowych i lokalnej topologii sieci. Stwierdziliśmy, że przepustowość sieci można zwiększyć poprzez wprowadzenie do sieci korelacji międzywęzłowych asortatywnych jak i dysasortatywnych. Wyniki teoretyczne zostały potwierdzone szeregiem symulacji komputerowych, a uzyskana zgodność jest satysfakcjonująca (rys. 6).

[4] P. Fronczak, A. Fronczak, J.A. Hołyst, *Kauffman Boolean model in undirected scale-free networks*, *Physical Review E*, vol. 77, 036119 (2008).

W 1969 roku S. Kauffman zaproponował model losowej sieci logicznej (ang. *random boolean network (RBN)*) jako teoretyczny odpowiednik rzeczywistej dynamiki regulacji genów [28]. W modelu tym, węzły w sieci odpowiadają poszczególnym genom, a krawędzie między węzłami wskazują oddziaływania regulacyjne pomiędzy genami.

Każdy z N węzłów może znajdować się w jednym z dwóch możliwych stanów, aktywnym (1) bądź nieaktywnym (0), a aktualny stan określony jest przez funkcję logiczną, której parametrami są stany sąsiednich węzłów. Funkcje logiczne wybrane są ze zbioru wszystkich dostępnych funkcji tak, by prawdopodobieństwo, że losowo wybrana funkcja zwróci wartość 1 lub 0 było równe odpowiednio p oraz $1 - p$, gdzie p jest parametrem modelu. Można pokazać, że w przypadku sieci całkowicie losowej (czyli takiej, w której wszystkie węzły są statystycznie równoważne) istnieje krytyczna wartość średniego stopnia wejściowego węzła [29]

$$k_c = \frac{1}{2p(1-p)}, \quad (10)$$

poniżej której wszystkie zaburzenia początkowego stanu układu zanikają (faza zamrożona, ang. *frozen phase*), i powyżej której nawet małe zaburzenie może propagować się w całym układzie (faza chaotyczna, ang. *chaotic phase*). Ponieważ uważa się, że żywe organizmy funkcjonują w obszarze pomiędzy uporządkowaniem a chaosem, gdzie tempo ewolucji jest optymalne, analiza położenia linii krytycznej $k_c(p)$ (ang. *edge of chaos*) stanowi podstawowy cel badań w tym modelu.

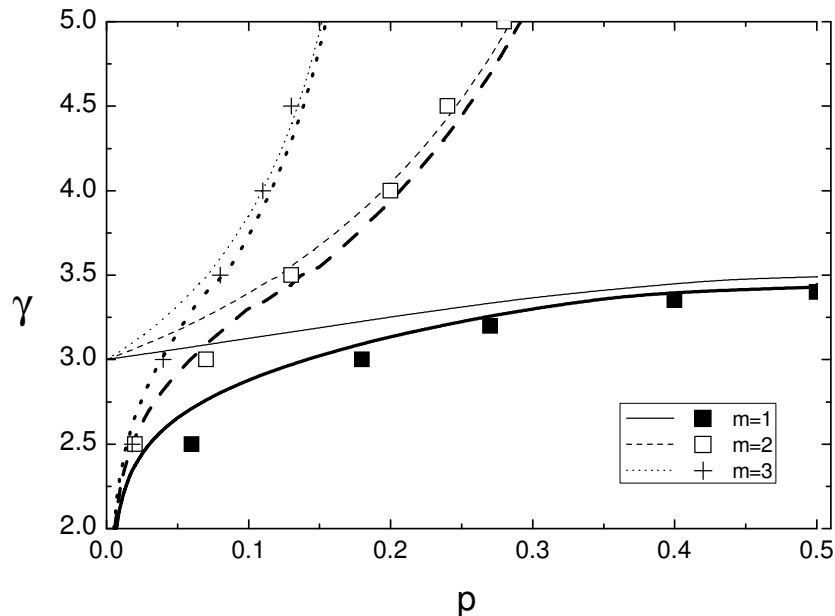
W pracy [4] wyprowadziliśmy ogólną relację określającą położenie linii krytycznej w nieskierowanych losowych sieciach logicznych o dowolnym rozkładzie stopni wierzchołków:

$$\frac{\langle k^2 \rangle}{\langle k \rangle} = \frac{1}{2p(1-p)}. \quad (11)$$

Omówiliśmy przypadek sieci o topologii homogenicznej jak również sieci o potęgowym rozkładzie stopni wierzchołków. Uogólniliśmy nasze rozważania na sieci bezskalowe, charakteryzowane nie tylko przez wykładnik rozkładu potęgowego stopni γ , lecz również przez minimalną wartość stopnia węzła $k_{\min} = m$, który kontroluje gęstość połączeń (rys. 7)

$$\frac{\zeta(\gamma - 2, m)}{\zeta(\gamma - 1, m)} = \frac{1}{2p(1-p)}, \quad (12)$$

gdzie $\zeta(\gamma, m) = \sum_{k=m}^{\infty} k^{-\gamma}$ jest uogólnioną funkcją dzeta Riemanna. Pokazaliśmy też, że dla $\gamma \rightarrow \infty$ parametr m odpowiada oryginalnemu parametrowi k użytemu w tzw. standardowym modelu Kauffmana zdefiniowanemu na regularnych grafach przypadkowych, w których każdy węzeł ma tę samą liczbę połączeń k .

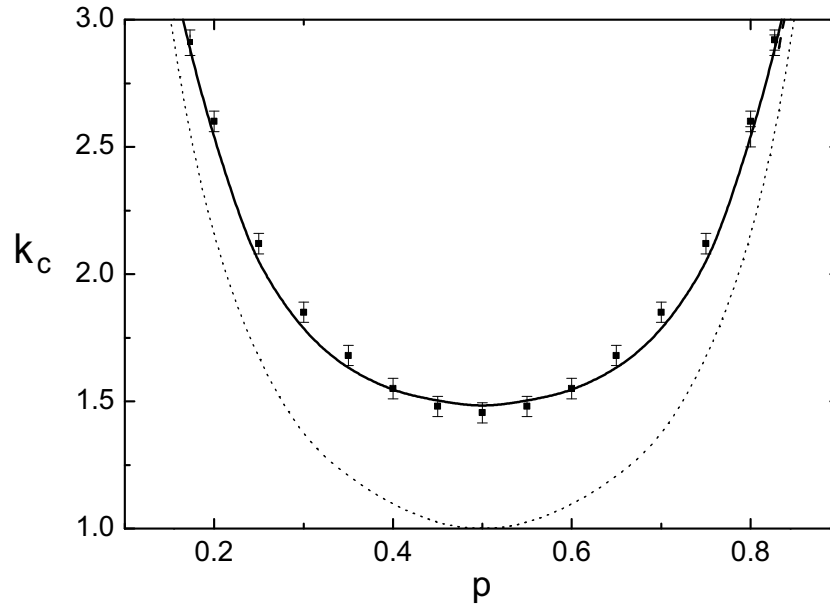


Rys. 7: Linie krytyczne dla sieci o potęgowym rozkładzie stopni wierzchołków. Cienkie linie są rozwiązaniami równania (12), a grube - tego samego równania, w którym funkcje Riemanna zostały zastąpione przez sumy skończone (co odpowiada sieciom o skończonych rozmiarach). Punkty przedstawiają rozwiązania numeryczne.

[5] P. Fronczak, A. Fronczak, *Critical line in undirected Kauffman boolean networks - the role of percolation*, *Journal of Physics A*, vol. 41, 224009 (2008).

Niedawno, korzystając z metod skalowania dla układów skończonych (ang. *finite size scaling*) pokazano, że położenie linii krytycznej w modelu Kauffmana zdefiniowanym na skierowanych sieciach przypadkowych znacząco różni się od przewidywań teorii pola średniego [30].

W pracy [5] pokazaliśmy, że podobną niezgodność można również zaobserwować w sieciach nieskierowanych. Pokazaliśmy również, że ta niezgodność jest spowodowana bliskością obszaru, w którym znaczącą rolę zaczynają odgrywać zjawiska perkolacyjne. Z uwagi na to, że analiza przypadkowych sieci skierowanych w pobliżu progu perkolacji jest zdecydowanie trudniejsza od podobnej analizy wykonanej dla sieci nieskierowanych, zrozumiałym jest, że sieci nieskierowane powinny stanowić pierwszy krok ku zrozumieniu obserwowanych niezgodności. W trakcie badań w oparciu o metodę pola średniego wyprowadziliśmy relację opisującą położenie linii krytycznej dla sieci przypadkowych uwzględniającą strukturę wielkiego komponentu, a w szczególności wstępujące w nim korelacje międzywęzłowe [31]. Omówiliśmy, w jaki sposób skończone klastery (drzewa, a więc układy o gęstości



Rys. 8: Diagram fazowy modelu nieskierowanych losowych sieci logicznych. Linia przerywana jest rozwiązaniem równania (10), a linia ciągła przedstawia relację wyprowadzoną w pracy [5]. Punkty przedstawiają rozwiązania numeryczne.

połączeń mniejszej niż w wielkim komponencie) mogą maskować efekt propagowania się zaburzenia wewnątrz sieci. Pokazaliśmy, że uwzględnienie efektów perkolacyjnych wydatnie poprawia zgodność teorii z wynikami numerycznymi (rys. 8).

[8] A. Fronczak, P. Fronczak, *Statistical mechanics of the international trade network*, *Phys. Rev. E* **85**, 056113 (2012).

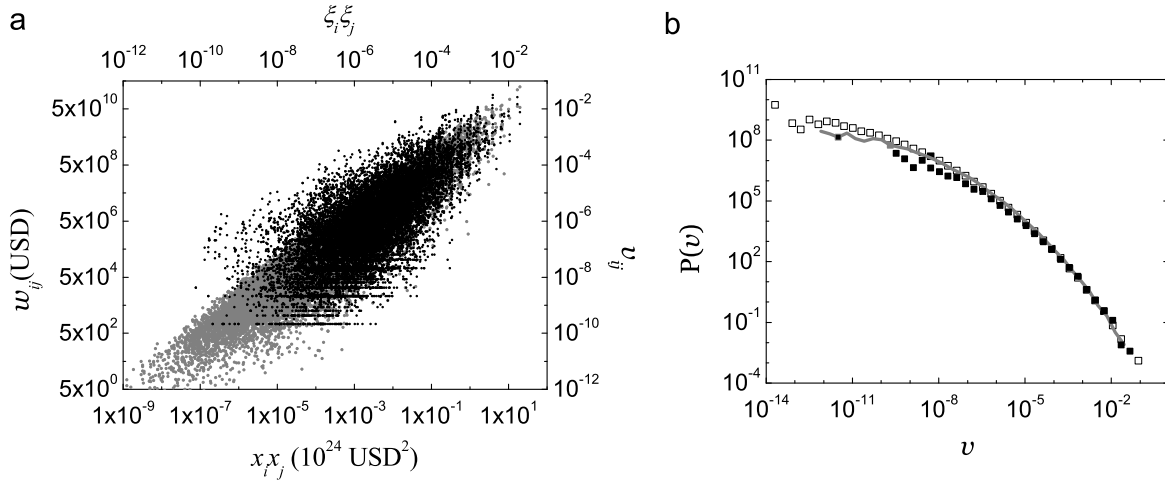
Praca [8] poświęcona była analizie własności strukturalnych sieci międzynarodowej wymiany handlowej, w której węzły reprezentują handlujące ze sobą państwa, zaś wagi krawędzi odpowiadają wielkości bilateralnej wymiany handlowej. Poznanie tych własności nie jest jedynie celem *per se*, ale może również wspomóc rozumienie procesów dynamicznych zachodzących w tej sieci. W szczególności, analiza taka może ułatwić rozpoznanie współzależności ekonomicznych odpowiedzialnych za propagowanie się kryzysów wśród powiązanych gospodarczo krajów [32].

W oparciu o dane rzeczywiste dotyczące międzynarodowego eksportu i importu w latach 1950-2000, pokazaliśmy, że sieć handlu można modelować za pomocą wykładniczych grafów przypadkowych o hamiltonianie

$$H(G) = \sum_i \sum_{j \neq i} \theta_{ij} w_{ij}(G), \quad (13)$$

gdzie $w_{ij}(G)$ oznacza wagę krawędzi (wielkość wymiany handlowej z kraju i do kraju j), zaś θ_{ij} jest pewnym parametrem zewnętrznym, sprzężonym z wagą w_{ij} , który warunkuje jej średnią wartość

$$\langle w_{ij} \rangle = \theta_{ij}^{-1} \quad (14)$$



Rys. 9: a) Wartości wymiany handlowej, w_{ij} , w funkcji iloczynu PKB, $x_i x_j$, handlujących państw. Czarne punkty przedstawiają dane rzeczywiste sieci handlu światowego w roku 1995, a szare punkty dane uzyskane za pomocą modelu (13). b) Rozkład prawdopodobieństwa względnych wag krawędzi v_{ij} w sieci rzeczywistej (czarne kwadraty) i w modelu (puste kwadraty).

i który zależy głównie od iloczynu produktów krajowych brutto (PKB) handlujących państw, $\theta_{ij} \propto (x_i x_j)^{-1}$.

Okazuje się, że ten prosty model dość wiernie odzwierciedla strukturalne własności sieci rzeczywistej (rys. 9). Co więcej, umożliwia on sformułowanie prostego twierdzenia typu fluktuacje-odpowieź

$$\frac{d\langle v_{ij} \rangle}{\langle v_{ij} \rangle} = \frac{d\langle \xi_i \rangle}{\langle \xi_i \rangle} + \frac{d\langle \xi_j \rangle}{\langle \xi_j \rangle}, \quad (15)$$

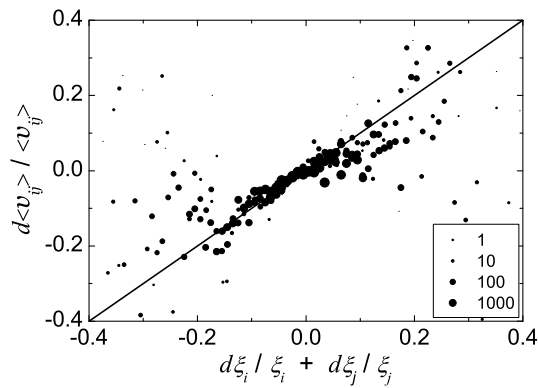
gdzie $v_{ij} = w_{ij}/T$, T oznacza światowy wolumen handlu, natomiast $\xi_i = x_i/X$ reprezentuje udział państwa i w PKB całego świata X . Z twierdzenia tego wynika, że relatywne zmiany udziału bilateralnego wolumenu handlu można przewidzieć na podstawie względnych zmian produktów krajowych brutto handlujących państw (rys. 10).

[10] M. Karpiarz, P. Fronczak, A. Fronczak, *International trade network: fractal properties and globalization puzzle*, *Physical Review Letters*, vol. 113, 248701 (2014).

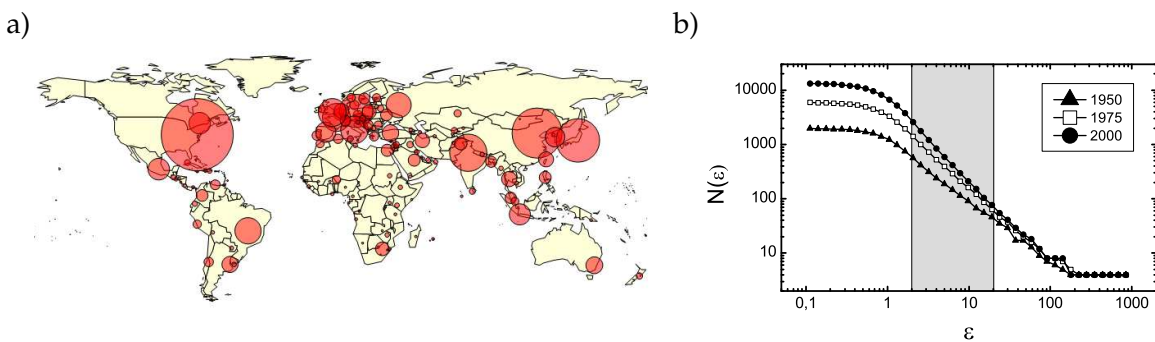
Grawitacyjny model handlu jest jednym z najbardziej rozpoznawalnych modeli empirycznych w ekonomii [14]. Czerpiąc inspirację z prawa grawitacji Newtona model ten opisuje wolumen handlu, T_{ij} , między dwoma krajami i and j , jako stosunek iloczynu ich produktów krajowych brutto, $Q_i Q_j$, do funkcji odległości geograficznej, r_{ij} , między nimi:

$$T_{ij} = G \frac{Q_i Q_j}{r_{ij}^\alpha}, \quad (16)$$

gdzie wykładnik α jest zazwyczaj obliczany na podstawie danych rzeczywistych, a stała G zależy od wyboru jednostek. Model ten, mimo niewielkiej liczby parametrów, doskonale



Rys. 10: Twierdzenie fluktuacje-odpowieź w sieci handlu światowego. Linia ciągła przedstawia zależność (15), zaś czarne punkty reprezentują dane rzeczywiste. Wielkości punktów odzwierciedlają liczbę kanałów handlowych branych pod uwagę przy obliczaniu średniej $\langle v_{ij} \rangle$.

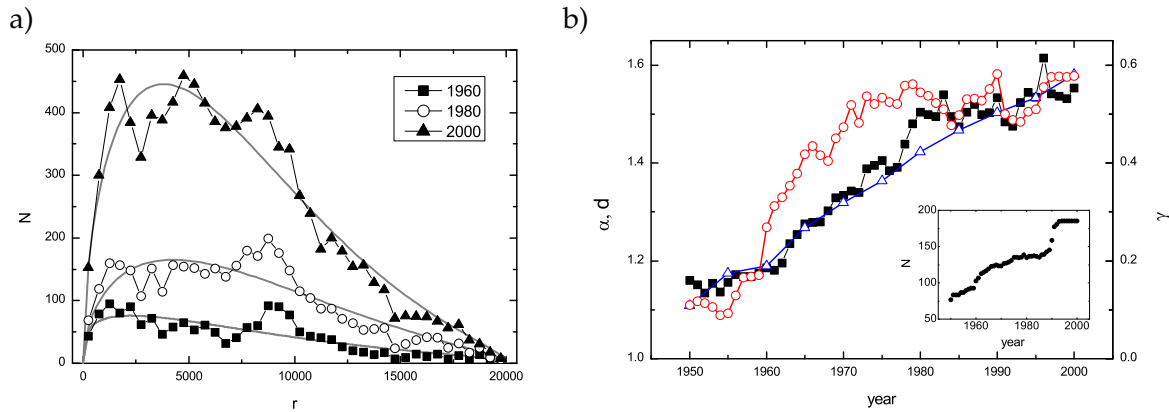


Rys. 11: a) Obiekt odzwierciedlający ekonomię świata w roku 1995, którego wymiar fraktalny badany był metodą zliczania pudełek; b) Liczba pudełek N konieczna do pokrycia tego obiektu za pomocą pudełek o rozmiarze ε .

odzwierciedla rzeczywistą sieć handlu światowego. Zaskakujący jest jednak fakt, że wykładnik α rośnie w czasie, co sugeruje, że odległość między handlującymi krajami odgrywa coraz większą rolę. Stoi to w sprzeczności z ogólnie postrzeganym procesem globalizacji, w którym malejące koszty transportu i komunikacji sprawiają, że odległość ma coraz mniejsze znaczenie. Sprzeczność ta zwana zagadką odległości (ang. *distance puzzle*) przez wiele lat stanowiła jeden z najważniejszych nierozwiązanych problemów współczesnej makroekonomii [15].

Mimo wielu prób wyjaśnienia tego problemu, żadnej z nich nie uznano za w pełni satysfakcjonującą, gdyż ceną rozwiązania było znaczące skomplikowanie podstawowego modelu (16). Rozwiązanie proponowane przez nas w pracy [10] w odróżnieniu od poprzednich prób nie wprowadza do badanego modelu nowych parametrów ani też nie zmienia - poprzez wybór odpowiednio dobranych danych - rosnącego charakteru wykładnika α . W pracy tej pokazaliśmy, że wykładnik α związany jest z wymiarem fraktalnym sieci handlu światowego i wzrost wykładnika wynika ze wzrostu wymiaru układu.

Zaproponowaliśmy dwie odmienne metody oszacowania tego wymiaru. Pierwszą była metoda zliczania pudełek (rys. 11)- klasyczne narzędzie analizy wymiaru obiektów fraktalnych. Druga metoda oparta była o prosty model wyborów przestrzennych, który z jednej



Rys. 12: a) Histogramy rzeczywistych długości kanałów handlowych. Linie ciągłe wyznaczono w oparciu o równanie (17). b) Czasowa zależność wykładnika α (czarne kwadraty) w porównaniu z wymiarem fraktalnym określonym za pomocą metody zliczania pudełek (trójkąty) i z parametrem γ modelu wyborów przestrzennych (kółka). Wewnątrz: liczba krajów na świecie.

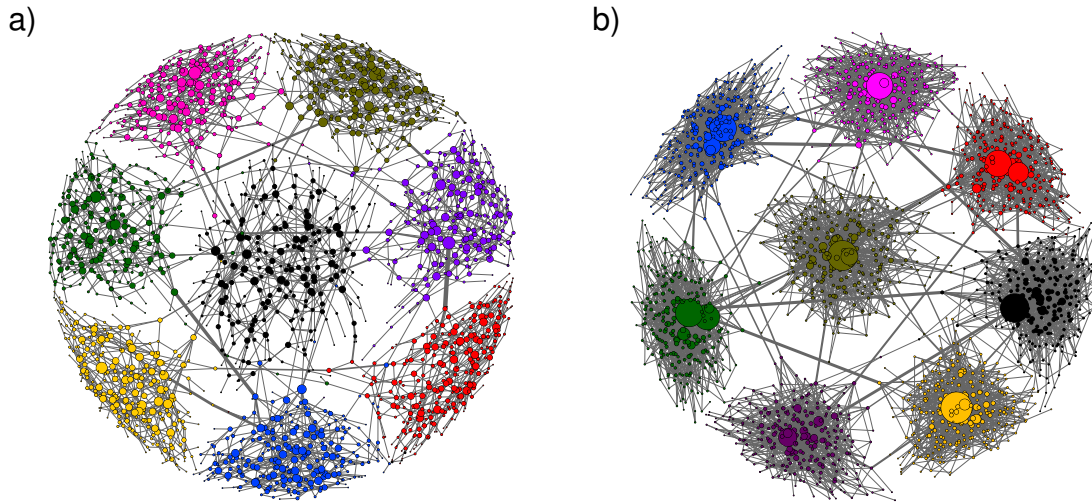
strony opierał się na zaobserwowanych wzorcach empirycznych (histogramach długości kanałów handlowych), a z drugiej brał pod uwagę realistyczny charakter przestrzeni, w której zachodzi wymiana handlowa (strukturę kontynentów, sferyczny charakter powierzchni Ziemi). Model ten budowany został przy założeniu dwóch przeciwstawnych tendencji. Po pierwsze założono, że kraj dąży do wyboru jak najbliższych partnerów handlowych, gdyż koszty wymiany rosną wraz z odległością. Po drugie uwzględniono to, że liczba dostępnych partnerów w nietrywialny sposób zależy od odległości (kraje rozmieszczone są niejednorodnie na sferze). Pokazaliśmy, że prawdopodobieństwo wyboru partnera handlowego wyrażone jest uogólnionym rozkładem gamma

$$P(r) = C \sin[(r/R_E)^\gamma] e^{-\frac{r}{\beta}}, \quad (17)$$

gdzie R_E jest promieniem Ziemi, natomiast parametry β i γ , odpowiadające odpowiednio za koszty transportu i wymiar fraktalny układu, zostały określone na podstawie dopasowania rzeczywistych histogramów długości kanałów handlowych (rys. 12a). Obie metody mimo wielu upraszczających założeń wykazały ilościowy związek między wykładnikiem α a wymiarem fraktalnym badanego układu (rys. 12b).

[9] P. Fronczak, A. Fronczak, M. Bujok, *Exponential random graph models for networks with community structure*, Phys. Rev. E 88, 032810 (2013).

W pracy [9] zaproponowaliśmy model generowania sieci o strukturze blokowej (ang. *community structure*) [19]. Struktura taka składa się z grup węzłów, przy czym gęstość połączeń między węzłami należącymi do różnych grup jest mniejsza, niż między węzłami z tej samej grupy. W wielu sieciach rzeczywistych przynależność węzłów do grup wpływa na funkcjonowanie całej sieci, a nie tylko określonych bloków. Tak jest np. w sieciach społecznych, gdzie grupy tworzą osoby o podobnych zainteresowaniach czy zawodzie, w sieciach proteinowych, gdzie do danej grupy należą białka, współtworzące określone szlaki metaboliczne, czy wreszcie w sieciach handlowych, w której grupy tworzą państwa, które podpisały regionalne porozumienia handlowe. Z tego powodu struktura blokowa jest uważana za jedną



Rys. 13: Przykładowe realizacje sieci należących do badanych zespołów wykładniczych grafów przypadkowych: a) klasycznego modelu blokowego, b) modelu blokowego z potęgowym rozkładem stopni węzłów. Rozmiar węzła odzwierciedla jego stopień, zaś grubość połączenia odpowiada liczbie najkrótszych dróg przechodzących przez daną krawędź (ang. *betweenness centrality*).

z najważniejszych, obok bezskalowych rozkładów stopni węzłów i efektu małych światów, cech rzeczywistych sieci złożonych.

Zaproponowany przez nas model sieci blokowej został oparty o metodologię wykładniczych grafów przypadkowych. W wersji podstawowej, która odzwierciedla tzw. klasyczny model blokowy [33] hamiltonian grafu miał postać:

$$H(G) = \sum_{r \leq s} \omega_{rs} E_{rs}(G), \quad (18)$$

gdzie E_{rs} jest liczbą krawędzi między blokami r oraz s , zaś E_{rr} reprezentuje liczbę krawędzi wewnątrz bloku r . W wersji rozszerzonej, uwzględniającej tak zwaną korektę na stopnie węzłów (ang. *degree-corrected blockmodel*) [34] hamiltonian przyjmował postać nieco bardziej rozbudowaną:

$$H(G) = \sum_i v_i k_i(G) + \sum_{r \leq s} \omega_{rs} E_{rs}(G), \quad (19)$$

gdzie k_i oznacza stopień węzła i . Zbadano zespoły statystyczne sieci opisane wyżej wymienionymi hamiltonianami sieciowymi. Obliczono ich sumy statystyczne. Uzyskano wyrażenia opisujące, w jaki sposób wartości średnie $\langle E_{rs} \rangle$, $\langle E_{rr} \rangle$ oraz $\langle k_i \rangle$ charakteryzujące strukturalne własności badanych sieci zależą od parametrów: ω_{rs} , ω_{rr} oraz v_i .

Na rysunku 13 przedstawiono przykładowe realizacje sieci należących do omawianych zespołów wykładniczych grafów przypadkowych: a) klasycznego modelu blokowego, b) modelu blokowego z potęgowym rozkładem stopni węzłów.

E.4 Podsumowanie

Wyniki omówionych prac, wskazują na to, że interdyscyplinarne zastosowania fizyki do modelowania i predykcji sieci złożonych są interesującymi kierunkami przyszłych badań.

Pogląd ten jest tym bardziej uzasadniony, że po prawie dwóch dekadach elementarnych analiz i modeli (ang. *toy models*), fizyka sieci złożonych zaczęła wreszcie wychodzić poza fazę prostego modelowania i symulacji numerycznych. Dowodem tego jest też przedstawiony cykl, w którym widoczne jest stopniowe przejście od zagadnień dosyć abstrakcyjnych i upraszczających opisywane zjawiska do problemów, w których analiza danych rzeczywistych stanowi z jednej strony fundament opracowywanych teorii, a z drugiej źródło ich weryfikacji.

Celem przyszłych badań habilitanta będzie rozwijanie metodologii służącej przede wszystkim ilościowemu opisowi sieci rzeczywistych, a w szczególności umożliwiającej przewidywanie i zapobieganie zdarzeniom nietypowym i niepożądanym we współoddziałujących ze sobą sieciach. Internet, WWW, Skype, Facebook, czy też płatności on-line między użytkownikami stanowią jasne przykłady, jak współzależne są od siebie różne technologie informacyjne. Podobnie w ekonomii, każda instytucja finansowa może działać w różnych systemach ekonomicznych; zaburzenie w jednym z nich może spowodować nieprzewidywany efekt domina w innych. W ogólności, współzależności (połączenia w sieci złożonej) mogą zapewnić oddziałującym układom większą wydajność i efektywność, jednakże zwiększają również podatność tych układów na zaburzenia, gdyż perturbacje finansowe lub wirusy (społeczne lub komputerowe) szybciej propagują się wśród gęsto połączonych struktur. Jak przewidywać, zapobiegać i łagodzić takie niepożądane zjawiska? Jesteśmy wciąż daleko od odpowiedzi na to pytanie, gdyż nasze zrozumienie zjawisk dynamicznych w sieciach złożonych jest wciąż bardzo powierzchowne. Dlatego też oczywista staje się konieczność prowadzenia badań w tym kierunku, szczególnie, że dobrze ugruntowane podstawy teoretyczne umożliwią w przyszłości tworzenie technologii przeciwdziałających konsekwencjom globalnych kryzysów.

F OMÓWIENIE POZOSTAŁYCH OSIĄGNIĘĆ NAUKOWO-BADAWCZYCH

F.1 Przed uzyskaniem stopnia doktora

W czasie studiów doktoranckich na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej (1998-2003) prowadziłem badania pod kierunkiem prof. dra hab. Janusza Hołysta. W tym okresie moimi najważniejszymi osiągnięciami naukowo-badawczymi były:

- stworzenie opisu matematyczno-fizycznego i dokonanie pomiarów eksperymentalnych synchronizacji układów chaotycznych z uwzględnieniem wpływu opóźnienia w pętli sprzężenia zwrotnego [35, 36] oraz
- zbadanie możliwości kontroli i synchronizacji chaotycznie poruszających się solitonów [37, 38].

Analiza teoretyczna zagadnienia synchronizacji z opóźnieniem została oparta na przybliżeniu synchronizacji w pobliżu niestabilnych punktów stałych za pomocą modelu dwóch oscylatorów harmonicznym z ujemnym tłumieniem. Oprócz obliczeń analitycznych przeprowadziłem symulacje komputerowe badanego zjawiska oraz wykonałem eksperyment oparty na układach elektronicznych. Dzięki przeprowadzonym badaniom udało się stwierdzić, że wpływ opóźnienia na synchronizację układów chaotycznych nie jest trywialny. W pewnym zakresie czasu opóźnienia badane układy wykazywały lepsze zsynchronizowanie niż w przypadku jego braku. Wnioski z badań mogą być pomocne przy budowie sys-

temów opartych na synchronizacji, w których dąży się do wyeliminowania wpływu opóźnienia poprzez szybsze i jednocześnie droższe linie przesyłowe. Skoro opóźnienie może mieć korzystny wpływ na synchronizację, można będzie do tego celu wykorzystać elementy wolniejsze, a przez to tańsze, mniejsze i mniej skomplikowane. Symulacje komputerowe solitonu typu kink w modelu ϕ^4 udowodniły, że możliwa jest kontrola i synchronizacja chaotycznych układów przestrzennie rozciągniętych za pomocą sygnału skalarnego. Otrzymane wyniki maksymalnego wykładnika Liapunowa okazały się zgodne w bardzo dużym stopniu z teorią stworzoną dla układów niskowymiarowych.

F.2 Po uzyskaniu stopnia doktora

W trakcie studiów doktoranckich rozpocząłem pracę zawodową nie związaną z działalnością naukową na stanowiskach informatyka i administratora systemów. Po obronie doktoratu, głównie dzięki wsparciu mojej żony, dr Agaty Fronczak, nie straciłem kontaktu z nauką i łączyłem obowiązki zawodowe z pracą naukową w Pracowni Dynamiki Nieliniowej Układów Złożonych kierowanej przez prof. J. Hołysta. Dzięki naszym wspólnym zainteresowaniom powstał projekt w VI Programie Ramowym Unii Europejskiej dotyczący zjawisk krytycznych w sieciach złożonych (CREEN), po uzyskaniu którego zrezygnowałem z pracy zawodowej i w 2005 roku rozpocząłem pracę w charakterze post-doca w pracowni prof. Hołysta. W tym okresie, oprócz zagadnień związanych z sieciami złożonymi, prowadziłem również badania nad układami złożonymi nie posiadającymi struktury sieciowej. Wśród przykładów można wymienić pracę poświęconą modelowi socjologicznemu opartemu na analogii do oddziaływań w cieczeniach ferromagnetycznych [39], czy też pracę [40], w której przeanalizowano dane bibliometryczne dotyczące produktywności naukowej naukowców z różnych dziedzin, a której celem był ilościowy opis zjawiska *publikuj albo giń* (ang. *publish or perish*).

Po ukończeniu projektu, zostałem zatrudniony we wrześniu 2008 na stanowisku adiunkta w Zakładzie Fizyki Układów Złożonych Wydziału Fizyki PW, gdzie kontynuowałem badania sieci złożonych. Wśród prac nie dotyczących sieci warto wymienić prace poświęcone wyjaśnieniu przyczyn potęgowego skalowania się fluktuacji w układach złożonych [41]. W pracy [42], pokazaliśmy, że nietrywialne niepoissonowskie fluktuacje obserwowane w wielu układach rzeczywistych nie stoją w sprzeczności z teorią równowagowych zespołów fizyki statystycznej. Zaproponowana przez nas teoria funkcji gęstości stanów dla układów złożonych, w których występuje potęgowe skalowanie się fluktuacji, została zweryfikowana w oparciu o dane rzeczywiste dotyczące dynamiki populacji ptaków i owadów, dystrybucji genów w ludzkim chromosomie, w oparciu o notowania akcji na Nowojorskiej Giełdzie Papierów Wartościowych, jak również w oparciu o dane na temat natężenia ruchu ulicznego. Ważną część badań prowadzonych w tym czasie stanowi również analiza funkcji gęstości stanów w układach złożonych, wykorzystująca pewne kombinatoryczne konstrukcje, m.in. tzw. formułę wykładniczą i wielomiany Bella, która pozwoliła w nowy sposób opisać przestrzeń stanów i funkcję gęstości stanów w znanych, klasycznych modelach równowagowej fizyki statystycznej [43, 44].

BIBLIOGRAFIA

- [1] P. Fronczak, A. Fronczak, J.A. Hołyst, *Self-organized criticality and coevolution of network structure and dynamics*, Phys. Rev. E, **73**, 046117 (2006).
- [2] P. Fronczak, A. Fronczak, J.A. Hołyst, *Phase transitions in social networks*, Eur. Phys. J. B, vol. **59**(1), 133-139 (2007).
- [3] J. Sienkiewicz, P. Fronczak, J.A. Hołyst, *Log-periodic oscillations due to discrete effects in complex networks*, Phys. Rev. E, **76**(6), 066102 (2007).
- [4] P. Fronczak, A. Fronczak, J.A. Hołyst, *Kauffman Boolean model in undirected scale-free networks*, Phys. Rev. E, **77**, 036119 (2008).
- [5] P. Fronczak, A. Fronczak, *Critical line in undirected Kauffman boolean networks - the role of percolation*, J. Phys. A, **41**, 224009 (2008).
- [6] A. Fronczak, P. Fronczak, *Biased random walks on complex networks: the role of local navigation rules*, Phys. Rev. E, **80**, 016107 (2009).
- [7] A. Fronczak, P. Fronczak, *Statistical mechanics of the international trade network*, Phys. Rev. E **85**, 056113 (2012).
- [8] P. Fronczak, *Theoretical approach and impact of correlations on the critical packet generation rate in traffic dynamics on complex networks*, Eur. Phys. J. B **85**, 351 (2012).
- [9] P. Fronczak, A. Fronczak, M. Bujok, *Exponential random graph models for networks with community structure*, Phys. Rev. E **88**, 032810 (2013).
- [10] M. Karpiarz, P. Fronczak, A. Fronczak, *International trade network: fractal properties and globalization puzzle*, Phys. Rev. Lett. **113**, 248701 (2014).
- [11] A.-L. Barabási, R. Albert, *Emergence of scaling in random networks*, Science **286**, 509 (1999).
- [12] M.E.J. Newman, *Networks. An Introduction*, Oxford University Press, 2010.
- [13] A. Fronczak, P. Fronczak, *Świat Sieci Złożonych. Od Fizyki do Internetu*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2009.
- [14] J.H. Bergstrand, *The gravity equation in international trade: some microeconomic foundations and empirical evidence*, Rev. Econ. Stat. **67**(3), 474 (1985).
- [15] J.-F. Brun, C. Carrere, P. Guillaumont, J. Melo, *Has Distance Died? Evidence from a Panel Gravity Model*, World Bank Econ. Rev. **19**, 99 (2005).
- [16] P. Bak, C. Tang, and K. Wiesenfeld, *Self-organized criticality: An explanation of the 1/f noise*, Phys. Rev. Lett. **59**, 381 (1987).
- [17] E.T. Jaynes, *Information theory and statistical mechanics*, Phys. Rev. **106**, 620 (1957).

- [18] A. Fronczak, *Exponential random graphs*, rozdział w *Encyclopedia of Social Network Analysis and Mining*, R. Alhajj, J. Rokne (Eds.), Springer-Verlag (2014).
- [19] M.E.J. Newman, *Communities, modules and large-scale structure in networks*, *Nature Phys.* **8**, 25 (2012).
- [20] M. Paczuski and D. Hughes, *A heavenly example of scale-free networks and self-organized criticality*, *Physica A* **342**, 158 (2004).
- [21] K.I. Goh, D.S. Lee, B. Kahng and D. Kim, *Sandpile on Scale-Free Networks*, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 148701 (2003).
- [22] E. Bonabeau, *Sandpile dynamics on random graphs*, *J. Phys. Soc. Japan* **64**, 327 (1995).
- [23] D.S. Lee, K.I. Goh, B. Kahng and D. Kim, *Sandpile avalanche dynamics on scale-free networks*, *Physica A* **338**, 84 (2004).
- [24] J. Park, M.E.J. Newman, *Solution for the properties of a clustered network*, *Phys. Rev. E* **72**, 026136 (2005).
- [25] A. Fronczak, P. Fronczak, J.A. Holyst, *Average path length in random networks*, *Phys. Rev. E* **70**, 056110 (2004).
- [26] L.A. Adamic et al., *Search in power-law networks*, *Phys. Rev. E* **64**, 046135 (2001).
- [27] W.-X. Wang et al., *Traffic dynamics based on local routing protocol on a scale-free network*, *Phys. Rev. E* **73**, 026111 (2006).
- [28] S. A. Kauffman, *Metabolic stability and epigenesis in randomly constructed genetic nets*, *J. Theor. Biol.* **22**, 437 (1969).
- [29] B. Derrida and Y. Pomeau, *Random networks of automata: a simple annealed approximation*, *Europhys. Lett.* **1**, 45 (1986).
- [30] T. Rohlf, N. Gulbahce, and C. Teuscher, *Damage Spreading and Criticality in Finite Random Dynamical Networks*, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 248701 (2007).
- [31] P. Bialas and A. K. Oles, *Correlations in connected random graphs*, *Phys. Rev. E* **77**, 036124 (2008).
- [32] M. Angeles Serrano, M. Boguna, A. Vespignani, *Patterns of dominant flows in the world trade web*, *J. Econ. Int. Coord.* **2**, 111-124 (2007).
- [33] P.W. Holland, K.B. Laskey, S. Leinhardt, *Stochastic blockmodels: first steps*, *Soc. Networks* **5**, 109 (1983).
- [34] B. Karrer, M.E.J. Newman, *Stochastic blockmodels and community structure in networks*, *Phys. Rev. E* **83**, 016107 (2011).
- [35] W. Just, E. Reibold, H. Benner, K. Kacperski, P. Fronczak and J. Holyst, *Limits of time delayed feedback control methods*, *Phys. Lett. A* **254**, 158 (1999).
- [36] W. Just, E. Reibold, K. Kacperski, P. Fronczak, J.A. Holyst and H. Benner, *Influence of stable floquet exponents on time-delayed feedback control*, *Phys. Rev. E* **51**, 5045 (2000).

- [37] P. Fronczak, J. A. Holyst, *Control of chaotic solitons by a time-delayed feedback mechanism*, Phys. Rev. E **65**, 26219 (2002).
- [38] P. Fronczak, J. A. Holyst, *Transitions to chaos and chaos synchronization for solitons in the presence of spatially inhomogeneous forces*, Acta Phys. Polonica A **101**, 465 (2002).
- [39] P. Fronczak, A. Fronczak, J.A. Hołyst, *Ferromagnetic fluid as a model of social impact*, Int. J. Mod. Phys. C **17**, 1227 (2006).
- [40] P. Fronczak, A. Fronczak, J.A. Hołyst, *Analysis of scientific productivity using maximum entropy principle and fluctuation-dissipation theorem*, Phys. Rev. E **75**, 026103 (2007).
- [41] Z. Eisler, I. Bartos, J. Kertesz, *Fluctuation scaling in complex systems: Taylor's law and beyond*, Ad. Phys. **57**, 89 (2008).
- [42] A. Fronczak, P. Fronczak, *Origins of Taylor's power law for fluctuation scaling in complex systems*, Phys. Rev. E **81**, 066112 (2010).
- [43] A. Fronczak, P. Fronczak, *Exact expression for the number of energy states in lattice models*, Rep. Math. Phys. **73**(1), pp. 1-9 (2014).
- [44] G. Siudem, P. Fronczak, A. Fronczak, *Exact low-temperature series expansion for the partition function of the two-dimensional zero-field $s = 1/2$ Ising model on the infinite square lattice*, arxiv:1410.7963 (2014).

Piotr Fronczak

Część II

WYKAZ OPUBLIKOWANYCH PRAC NAUKOWYCH ORAZ
INFORMACJA O OSIĄGNIĘCIACH DYDAKTYCZNYCH,
WSPÓŁPRACY NAUKOWEJ I POPULARYZACJI NAUKI

G PUBLIKACJE WCHODZĄCE W SKŁAD OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO**G.1 Publikacje naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR)**

- a-10 M. Karpiarz, P. Fronczak, A. Fronczak, *International trade network: fractal properties and globalization puzzle*, Physical Review Letters, vol. **113**, 248701 (2014). IF₂₀₁₃ = 7,728³
Wkład habilitanta: Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu modelu wyborów przestrzennych oraz na przeprowadzeniu obliczeń wymiaru fraktalnego badanego układu ekonomicznego metodą zliczania pudełek. Przygotowałem całość manuskryptu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 40%.
- a-9 P. Fronczak, A. Fronczak, M. Bujok, *Exponential random graph models for networks with community structure*, Physical Review E, vol. **88**(3), art. no. 032810 (2013). IF = 2,313
Wkład habilitanta: Wspólnie z dr A. Fronczak byłem pomysłodawcą pracy. Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wykonaniu obliczeń analitycznych dotyczących klasycznego modelu blokowego, obliczeń numerycznych i analizie statystycznej metodami Monte-Carlo. Uczestniczyłem w dyskusji wszystkich wyników. Opracowałem metodę wizualizacji badanych sieci. Brałem udział w redagowaniu tekstu manuskryptu, szczególnie w przygotowaniu rozdziału 4-ego "Numerical simulations". Mój udział procentowy szacuję na 40%.
- a-8 A. Fronczak, P. Fronczak, *Statistical mechanics of the international trade network*, Phys. Rev. E **85**, 056113 (2012). IF = 2,313
Wkład habilitanta: Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na analizie danych rzeczywistych oraz wykonaniu obliczeń numerycznych opisanego modelu. Brałem również udział w dyskusjach poświęconych obliczeniom analitycznym. Mój udział szacuję na 30%.
- a-7 P. Fronczak, *Theoretical approach and impact of correlations on the critical packet generation rate in traffic dynamics on complex networks*, European Physical Journal B, vol. **85**, p. 351 (2012). IF = 1,282
Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą badania wpływu korelacji międzywęzłowych na procesy transportu w sieciach złożonych omówione w tej pracy. Zaplanowałem i wykonałem wszystkie obliczenia analityczne i symulacje numeryczne opisane w pracy. Ponadto, samodzielnie przygotowałem i zredagowałem manuskrypt publikacji. Mój udział procentowy wynosi 100%.
- a-6 A. Fronczak, P. Fronczak, *Biased random walks on complex networks: the role of local navigation rules*, Physical Review E, vol. **80**, 016107 (2009). IF = 2,400
Wkład habilitanta: Wspólnie z dr A. Fronczak byłem pomysłodawcą pracy. Uczestniczyłem w wykonywaniu obliczeń analitycznych. Samodzielnie przeprowadziłem symulacje numeryczne. Brałem również udział w przygotowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 50%.
- a-5 P. Fronczak, A. Fronczak, *Critical line in undirected Kauffman boolean networks - the role of percolation*, Journal of Physics A, vol. **41**, 224009 (2008). IF = 1,540

³ Jeśli nie zostało zaznaczone, że jest inaczej, współczynnik wpływu (*impact factor*, IF) został podany dla roku, w którym artykuł został opublikowany.

Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą badań nad wpływem perkolacji strukturalnej w sieciach przypadkowych na zjawisko powstawania tzw. krawędzi chaosu w sieciach regulacji genetycznych. Uczestniczyłem w wykonywaniu obliczeń analitycznych. Samodzielnie przeprowadziłem symulacje numeryczne. Brałem również udział w przygotowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 80%.

- a-4 P. Fronczak, A. Fronczak, J. A. Hołyst, *Kauffman Boolean model in undirected scale-free networks*, *Physical Review E*, vol. **77**(3), art. no. 036119 (2008). IF = 2,508

Wkład habilitanta: Uogólniłem metodologię Derridy i Pomeau na sieci o dowolnym rozkładzie stopni wierzchołków. Samodzielnie przeprowadziłem symulacje numeryczne. Brałem również udział w przygotowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 70%.

- a-3 J. Sienkiewicz, P. Fronczak, J.A. Hołyst, *Log-periodic oscillations due to discrete effects in complex networks*, *Physical Review E*, vol. **76**(6), art. no. 066102 (2007). IF = 2,483

Wkład habilitanta: Zaproponowałem wyjaśnienie zjawiska powstawania oscylacji logarytmiczno-periodycznych oraz wykonałem część obliczeń analitycznych opisanych w publikacji. Opracowałem również model zastosowania opisanego zjawiska do procesu optymalizacji sieci. Mój udział procentowy szacuję na 30%.

- a-2 P. Fronczak, A. Fronczak, J.A. Hołyst, *Phase transitions in social networks*, *European Physical Journal B*, vol. **59**(1), pp. 133-139 (2007). IF = 1,356

Wkład habilitanta: Brałem udział w opracowaniu założeń modelu omówionego w tej pracy. Wykonałem część analiz teoretycznych. Samodzielnie przeprowadziłem symulacje numeryczne. Przygotowałem większość manuskryptu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 40%.

- a-1 P. Fronczak, A. Fronczak, J. A. Hołyst, *Self-organized criticality and coevolution of network structure and dynamics*, *Physical Review E*, vol. **73**(4), art. no. 046117 (2006). IF = 2,438

Wkład habilitanta: Byłem samodzielnym autorem modelu SOC prezentowanego w pracy. Brałem udział w dyskusji rozwiązań analitycznych modelu oraz samodzielnie przeprowadziłem obliczenia numeryczne. Przygotowałem całość manuskryptu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 70%.

H WYKAZ INNYCH OPUBLIKOWANYCH PRAC NAUKOWYCH (NIE WCHODZĄCYCH W SKŁAD OSIĄGNIĘCIA OMÓWIONEGO W PUNKCIE D) ORAZ WSKAŹNIKI DOKONAŃ NAUKOWYCH

H.1 Publikacje naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR)

Po uzyskaniu stopnia doktora

- b-14 M. Bujok, P. Fronczak, A. Fronczak, *Percolation in the classical blockmodel*, *European Physical Journal B*, vol. **87**, p. 212 (2014). IF₂₀₁₃ = 1,463

Wkład habilitanta: Wspólnie z dr A. Fronczak byłem pomysłodawcą pracy. Uczestniczyłem w dyskusji obliczeń analitycznych i przeprowadziłem część symulacji numerycznych. Mój udział procentowy szacuję na 20%.

- b-13 A. Fronczak, P. Fronczak, *Exact expression for the number of energy states in lattice models*, Reports on Mathematical Physics, vol. **73**(1), pp. 1-9 (2014). IF₂₀₁₃ = 1,042
Wkład habilitanta: Przeprowadziłem obliczenia numeryczne. Wykonałem również część obliczeń analitycznych umieszczonych w rozdziale 3 "Examples". Mój udział procentowy szacuję na 20%.
- b-12 A. Fronczak, P. Fronczak, *Origins of Taylor's power law for fluctuation scaling in complex systems*, Physical Review E, vol. **81**(6), art. no. 066112 (2010). IF = 2,352
Wkład habilitanta: Zebrałem i przeanalizowałem dane rzeczywiste omówione w pracy. Przeprowadziłem również wszystkie obliczenia numeryczne. Brałem również udział w dyskusjach dotyczących obliczeń analitycznych. Zredagowałem część manuskryptu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 30%.
- b-11 A. Fronczak, P. Fronczak, J.A. Hołyst, *Thermodynamic forces, flows, and Onsager coefficients in complex networks*, Physical Review E, vol. **76**(6), art. no. 061106 (2007). IF = 2,483
Wkład habilitanta: Wykonałem część obliczeń analitycznych opisanych w publikacji oraz wszystkie symulacje numeryczne. Mój udział procentowy szacuję na 30%.
- b-10 P. Fronczak, A. Fronczak, J.A. Hołyst, *Analysis of scientific productivity using maximum entropy principle and fluctuation-dissipation theorem*, Phys. Rev. E, vol. **75**(2), art. no. 026103 (2007). IF = 2,483
Wkład habilitanta: Zebrałem i opracowałem wszystkie dane rzeczywiste przedstawione w pracy. Uczestniczyłem w przygotowaniu manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na 40%.
- b-9 A. Fronczak, P. Fronczak, J.A. Hołyst, *Microscopic explanation of non-Debye relaxation for heat transfer*, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, vol. **375**(2), pp. 571-576 (2007). IF = 1,430
Wkład habilitanta: Wraz z dr A. Fronczak byłem pomysłodawcą wyjaśnienia zjawiska relaksacji nie Debye'owskiej. Mój udział procentowy szacuję na 20%.
- b-8 A. Fronczak, P. Fronczak, *Networks with given two point correlations: Hidden correlations from degree correlations*, Physical Review E, vol. **74**(2), art. no. 026121 (2006). IF = 2,438
Wkład habilitanta: Przeprowadziłem wszystkie symulacje numeryczne opisane w tej pracy. Mój udział procentowy szacuję na 20%.
- b-7 A. Fronczak, P. Fronczak, J.A. Hołyst, *Fluctuation-dissipation relations in complex networks*, Physical Review E, vol. **73**(1), art. no. 016108 (2006). IF = 2,438
Wkład habilitanta: Przeprowadziłem wszystkie symulacje numeryczne opisane w tej pracy. Mój udział procentowy szacuję na 20%.
- b-6 P. Fronczak, A. Fronczak, J.A. Hołyst, *Ferromagnetic fluid as a model of social impact*, International Journal of Modern Physics C, vol. **17**(8), pp. 1227-1235 (2006). IF = 0,920
Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą modelu i autorem obliczeń analitycznych w pracy. Przeprowadziłem również samodzielnie obliczenia numeryczne. W całości przygotowałem manuskrypt. Mój udział procentowy szacuję na 70%.

- b-5 J.A. Hołyst, J. Sienkiewicz, A. Fronczak, P. Fronczak, K. Suchecki, *Universal scaling of distances in complex networks*, Physical Review E, vol. **72**(2), art. no. 026118 (2005). IF = 2,418
Wkład habilitanta: Brałem udział w dyskusji danych rzeczywistych i rozwiązań analitycznych modelu. Mój udział procentowy szacuję na 10%.
- b-4 J.A. Hołyst, J. Sienkiewicz, A. Fronczak, P. Fronczak, K. Suchecki, *Scaling of distances in correlated complex networks*, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, vol. **351**(1), pp. 167-174 (2005). IF = 1,332
Wkład habilitanta: Brałem udział w dyskusji danych rzeczywistych i rozwiązań analitycznych modelu. Mój udział procentowy szacuję na 10%.
- b-3 A. Fronczak, P. Fronczak, J.A. Hołyst, *Average path length in random networks*, Physical Review E, vol. **70**(5), art. no. 056110 (2004). IF = 2,352
Wkład habilitanta: Wspólnie z dr A. Fronczak wyprowadziliśmy i udowodniliśmy (w formie matematycznego twierdzenia) wyrażenie opisujące prawdopodobieństwo dużej liczby zdarzeń niezależnych. Wykonałem część obliczeń analitycznych opisanych w pracy oraz wszystkie symulacje numeryczne. Mój udział procentowy szacuję na 20%.
- b-2 J.A. Hołyst, A. Fronczak, P. Fronczak, *Supremacy distribution in evolving networks*, Physical Review E, vol. **70**(4), art. no. 046119 (2004). IF = 2,352
Wkład habilitanta: Przeprowadziłem wszystkie obliczenia i symulacje numeryczne. Mój udział procentowy szacuję na 30%.
- b-1 A. Fronczak, P. Fronczak, J.A. Hołyst, *Mean-field theory for clustering coefficients in Barabási-Albert networks*, Physical Review E, vol. **68**(4), art. no. 046126 (2003). IF = 2,202
Wkład habilitanta: Przeprowadziłem wszystkie obliczenia i symulacje numeryczne. Mój udział procentowy szacuję na 10%.

Przed uzyskaniem stopnia doktora

- c-4 P. Fronczak, J.A. Hołyst, *Control of chaotic solitons by a time-delayed feedback mechanism*, Physical Review E, vol. **65**, art. no. 26219 (2002). IF = 2,397
Wkład habilitanta: Wykonałem wszystkie obliczenia analityczne i symulacje numeryczne. Uczestniczyłem w przygotowaniu manuskryptu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 70%.
- c-3 P. Fronczak, J.A. Hołyst, *Transitions to chaos and chaos synchronization for solitons in the presence of spatially inhomogeneous forces*, Acta Phys. Polonica A, vol. **101**, p. 465 (2002). IF = 0,345
Wkład habilitanta: Wykonałem wszystkie obliczenia analityczne i symulacje numeryczne. Uczestniczyłem w przygotowaniu manuskryptu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 70%.
- c-2 W. Just, E. Reibold, K. Kacperski, P. Fronczak, J. A. Hołyst, H. Benner, *Influence of stable floquet exponents on time-delayed feedback control*, Physical Review E, vol. **61**, art. no. 5045 (2000). IF = 2,142
Wkład habilitanta: Wykonałem obliczenia numeryczne potwierdzające wyprowadzony w pracy wzór dot. progu kontroli układu chaotycznego Roesslera. Mój udział procentowy szacuję na 15%.

- c-1 W. Just, E. Reibold, H. Benner, K. Kacperski, P. Fronczak, J. A. Holyst, *Limits of time delayed feedback control methods*, Physics Letters A, vol. **254**, p. 158 (1999). IF = 1,111

Wkład habilitanta: Wykonałem obliczenia numeryczne potwierdzające wyprowadzony w pracy wzór dot. prognozy kontroli układu chaotycznego Roesslera. Mój udział procentowy szacuję na 15%.

H.2 Wynalazki oraz wzory użytkowe i przemysłowe, które uzyskały ochronę i zostały wystawione na międzynarodowych lub krajowych wystawach lub targach

Brak

H.3 Monografie, publikacje naukowe w czasopismach międzynarodowych lub krajowych spoza bazy JCR

Monografie naukowe i podręczniki akademickie

- d-1 A. Fronczak, P. Fronczak, *Świat sieci złożonych. Od fizyki do Internetu*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2009. (320 stron)

Wkład habilitanta: Byłem współtwórcą koncepcji naukowej zawartości książki i jej poszczególnych rozdziałów. Jestem autorem rozdziałów: 1. "Jak sieci zaczęły rządzić światem", 2. "Własności sieci rzeczywistych" oraz kilku podrozdziałów w rozdziale 5: 5.1. "Struktura sieci społecznych", 5.2. "Dynamika sieci społecznych", 5.5. "Ewolucja języka", 5.6. "Sieci biologiczne". Przygotowałem również wszystkie rysunki. Mój udział procentowy szacuję na 50%.

Rozdziały w książkach

- e-1 J. Sienkiewicz, A. Fronczak, P. Fronczak, K. Suchecki, J.A. Hołyst, *Path length scaling and discrete effects in complex networks*, rozdział w książce *Managing Complexity: Insights Concepts, Applications*, D. Helbing (Ed.), Springer-Verlag, 2008.

Wkład habilitanta: Byłem współtwórcą prac b-3 i a-3 stanowiących podstawę rozdziału 4. Mój udział procentowy szacuję na 10%.

Artykuły naukowe w recenzowanych materiałach pokonferencyjnych

- f-4 M. Bujok, P. Fronczak, A. Fronczak, *Polish and English wordnets - statistical analysis of interconnected networks*, Proceedings of the Summer Solstice 2013 International Conference on Discrete Models of Complex Systems (Warszawa, 26-28 June 2014), Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement, vol. **7**, pp. 245-256 (2014).

Wkład habilitanta: Brałem udział w opracowaniu i analizie danych rzeczywistych dotyczących sieci językowych. Mój udział procentowy szacuję na 20%.

- f-3 A. Fronczak, P. Fronczak, M. Bujok, *Taylor's power law for fluctuation scaling in traffic*, Proceedings of the Summer Solstice 2009 International Conference on Discrete Models of Complex Systems (Gdańsk, 22-24 June 2009), D. Makowiec, A.T. Lawniczak, B. N. Di

Stefano (Eds.), *Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement*, vol. 3(2), pp. 327-334 (2009).

Wkład habilitanta: Brałem udział w opracowaniu metodyki badań praw Taylora w modelu automatów komórkowych Nagela–Schreckenberga dla ruchu pojazdów. Uczestniczyłem również w dyskusji wyników symulacji numerycznych i dyskusji wyników analizy danych rzeczywistych nt. natężenia ruchu ulicznego. Mój udział procentowy szacuję na 20%.

- f-2 A. Fronczak, P. Fronczak, J.A. Hołyst, *How to calculate the main characteristics of random uncorrelated networks*, *Proceedings of the Science of Complex Networks Conference: from Biology to the Inernet and WWW (Aveiro, Potrugal, 29 August - 2 September 2004)*, J.F.F. Mendes et al. (Eds.), *AIP Conf. Proc.* vol. 776, pp. 52-69 (2005).

Wkład habilitanta: Wspólnie z dr A. Fronczak byłem pomysłodawcą tej publikacji. W omawianej pracy, zaproponowane we wcześniejszej pracy b-3, mikroskopowe podejście do opisu strukturalnych własności grafów przypadkowych o zadanej sekwencji stopni węzłów zostało wykorzystane do opisu zjawiska perkolacji. Wykonałem część obliczeń analitycznych opisanych w pracy oraz wszystkie symulacje numeryczne. Uczestniczyłem w przygotowaniu manuskryptu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 30%.

- f-1 J.A. Hołyst, J. Sienkiewicz, A. Fronczak, P. Fronczak, K. Suchecki, P. Wójcicki, *Universal dependence of distances on nodes degrees in complex networks*, *Proceedings of the Science of Complex Networks Conference: from Biology to the Inernet and WWW (Aveiro, Potrugal, 29 August - 2 September 2004)*, J.F.F. Mendes et al. (Eds.), *AIP Conf. Proc.* vol. 776, pp. 69-79 (2005).

Wkład habilitanta: Uczestniczyłem w dyskusji danych rzeczywistych nt. zależności odległości między dowolną parą węzłów od logarytmu iloczynu ich stopni. Brałem udział w opracowaniu teoretycznego formalizmu mającego na celu pokazanie przyczyn tej zależności w modelu konfiguracyjnym. Mój udział procentowy szacuję na 10%.

H.4 Opracowania zbiorowe, katalogi zbiorów, dokumentacja prac badawczych, ekspertyz, utworów i dzieł artystycznych

- g-1 P. Fronczak, *Scale-free nature of social networks*, rozdział w *Encyclopedia of Social Network Analysis and Mining*, R. Alhaji, J. Rokne (Eds.), Springer-Verlag, 2014.

Wkład habilitanta: Samodzielnie przygotowałem cały esej, w którym omówiłem ostatnie osiągnięcia nauki o sieciach złożonych, a w szczególności potęgowy charakter różnych własności tych sieci. Mój udział procentowy wynosi 100%.

H.5 Sumaryczny *impact factor* (IF) według listy *Journal Citation Reports* (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania

- * 32 publikacje naukowe, w tym 28 w czasopismach z bazy *Journal Citation Reports* (JCR)
- * 24 publikacje JCR po uzyskaniu stopnia doktora
- * sumaryczny *impact factor*: 59.905, w tym po uzyskaniu stopnia doktora: 53,910

H.6 Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science

liczba cytowań: 385, w tym 359 bez autocytaowań
Dane z dnia 22.01.2015.

H.7 Indeks Hirscha według bazy Web of Science

Indeks Hirscha, $h=10$.

H.8 Kierowanie międzynarodowymi i krajowymi projektami badawczymi oraz udział w takich projektach

Projekty międzynarodowe (po uzyskaniu stopnia doktora)

3. *Collective Emotions in Cyberspace* (CYBEREMOTIONS), 2008-2008, projekt finansowany przez Komisję Europejską w ramach 7 Programu Ramowego UE (pomysłodawca projektu i współautor wniosku projektowego).
2. *Critical events in evolving networks* (CREEN), 2005-2008, projekt finansowany przez Komisję Europejską w ramach 6 Programu Ramowego UE (główny wykonawca i współautor wniosku projektowego).
1. *Measuring and modelling complex networks across domains* (MMCOMNET), 2006-2006, projekt finansowany przez Komisję Europejską w ramach 6 Programu Ramowego UE (wykonawca).

Projekty krajowe (po uzyskaniu stopnia doktora)

5. *Fluktuacje w układach złożonych: prawa potęgowe, odpowiedzi i przemiany fazowe poza fizyką*, 2013-2018, projekt typu SONATA BIS finansowany przez Narodowe Centrum Nauki (NCN) w konkursie 5 (kierownik projektu).
4. *Statystyczna eksploracja danych i modelowanie w sieciach komunikacyjnych i informacyjnych*, 2012-2015, projekt współfinansowany przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej oraz Program Operacyjny "Innowacyjna Gospodarka" w ramach V edycji programu POMOST - Granty Powrotowe ⁴ FNP (wykonawca).
3. *Zastosowania fizyki do analizy współpracy, rywalizacji i konfliktów*, 2009-2011, projekt typu SPB (Specjalny Projekt Badawczy) Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego przeznaczony na finansowanie badań naukowych w ramach Europejskiego Programu Współpracy w Dziedzinie Badań Naukowo-Technicznych (COST) Akcja MPo801 "Physics of Competition and Conflicts", nr projektu: 496/N-COST/2009/o (wykonawca).
2. *Dynamika stochastyczna: podstawowe zasady i zastosowania*, 2006-2008, projekt typu SPB (Specjalny Projekt Badawczy) Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego przeznaczony na dofinansowanie badań prowadzonych w ramach projektu STOCHDYN finansowanego przez Europejską Fundację Nauki (ESF), nr projektu: ESF/275/2006 (wykonawca).

⁴ Granty dla rodziców-naukowców ułatwiające powrót do pracy badawczej po przerwie związanej z opieką nad małymi dziećmi.

1. *Fizyka niebezpieczeństw*, 2005-2007, projekt typu SPB (Specjalny Projekt Badawczy) Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego przeznaczony na finansowanie badań naukowych w ramach Europejskiego Programu Współpracy w Dziedzinie Badań Naukowo-Technicznych (COST) Akcja P10 "Physics of Risk", nr projektu: 134/E-365 /SPB /COST/ KN/ DWM 105/2005-2007 (wykonawca).

Inne projekty badawcze (po uzyskaniu stopnia doktora)

1. *Heterogeneity of specific time patterns in crop cycle*, 2007-2008, projekt wykonywany na zlecenie Bunge Mathematical Institute (główny wykonawca).

Projekty naukowo-badawcze przed uzyskaniem stopnia doktora

1. *Kontrola i synchronizacja układów dynamicznych o różnej liczbie stopni swobody*, 1999-2002, projekt finansowany przez Komitet Badań Naukowych (KBN), typ projektu: promotorski, nr projektu: 2P03B03114 (główny wykonawca).

H.9 Międzynarodowe i krajowe nagrody za działalność naukową albo artystyczną

2. Nagrody zespołowe stopnia II Rektora Politechniki Warszawskiej za osiągnięcia naukowe w latach 2003, 2006, 2008. Podstawą przyznania tych wyróżnień było współautorstwo w cyklu publikacji naukowych poświęconych badaniom układów złożonych.
1. Wyróżnienie rozprawy doktorskiej przez Radę Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej, 2004.

H.10 Wygłoszenie referatów na międzynarodowych i krajowych konferencjach tematycznych

Referaty wygłoszone na konferencjach międzynarodowych (po uzyskaniu stopnia doktora)

6. M. Karpiarz, P. Fronczak, A. Fronczak, *International Trade Network: Fractal Properties And Globalization Puzzle*, International Conference on Statistical Physics: SigmaPhi'14, Rhodos, Grecja, 7-11 lipca 2014.
5. M. Karpiarz, P. Fronczak, A. Fronczak, *Gravity model of trade and fractal character of the world trade network*, European Conference on Complex Systems: ECCS'14, Lucca, Włochy, 22-26 września 2014.
4. M. Karpiarz, P. Fronczak, A. Fronczak, *Globalization puzzle in the gravity law of trade*, International Conference on Discrete Models of Complex Systems: Summer Solstice 2013, Warszawa, Polska, 27-29 czerwca 2013.
3. P. Fronczak, A. Fronczak, J.A. Hołyst, *Critical line in undirected Kauffman Boolean networks – the role of percolation*, 401. Wilhelm and Else Heraeus Seminar, Bad Hofen, Niemcy, 22-24 stycznia 2008.
2. P. Fronczak, A. Fronczak, J.A. Hołyst, *Onsager relations in random networks with a given node degree distribution*, Complex Networks: from Biology to Information Technology, StatPhys23 Satellite Meeting, Pula (Cagliari), Włochy, 2-6 lipca 2007.

1. P. Fronczak, A. Fronczak, J.A. Hołyst, *Fluctuation-dissipation relations in random networks*, COST Workshop "Networks: Topology, Dynamics and Risk", Belgrad, Serbia, 3-5 maja 2007.

Referaty wygłoszone na seminariach naukowych w kraju i za granicą (po doktoracie)

4. M. Karpiarz, P. Fronczak, A. Fronczak, *Globalization puzzle in the gravity law of trade*, wykład na seminarium Zakładu Fizyki Statystycznej na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, listopad 2014.
3. A. Fronczak, P. Fronczak, J.A. Hołyst, *Transport in complex networks*, workshop of the CREEN EU Project: Critical Events in Complex Networks, NetSCI'08 Satellite Meeting, Norwich, Wielka Brytania, czerwiec 2008.
2. P. Fronczak, *Samoorganizująca się krytyczność w sieciach złożonych*, wykład na sympozjum Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej, maj 2006.
1. P. Fronczak, *Control and synchronization of chaotic systems with different number of degrees of freedom*, wykład na seminarium w Institute for Cross-Disciplinary Physics and Complex Systems, University of the Balearic Islands, Palma de Mallorca, Hiszpania, lipiec 2004.

I DOROBEK DYDAKTYCZNY I POPULARYZATORSKI ORAZ INFORMACJA O WSPÓŁPRACY MIĘDZYNARODOWEJ

I.1 Uczestnictwo w programach europejskich oraz innych programach międzynarodowych i krajowych

Programy europejskie (po uzyskaniu stopnia doktora)

3. COST Action TD1306: *New Frontiers of Peer Review (PEERE)*, 2014-2016, projekt finansowany przez Komisję Europejską w ramach European Concerted Research Action – COST, członek grupy badawczej: Peer Review models.
2. COST Action MP0801: *Physics of Competition and Conflicts*, 2008-2012, projekt finansowany przez Komisję Europejską w ramach European Concerted Research Action – COST, członek grupy badawczej: sieci złożone.
1. COST Action P10: *Physics of Risk*, 2005-2007, projekt finansowany przez Komisję Europejską w ramach European Concerted Research Action – COST, członek grup badawczych: fizyka ryzyka, sieci złożone, modele agentów.

I.2 Aktywny udział w międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych

Komunikaty i plakaty konferencyjne prezentowane na konferencjach międzynarodowych po uzyskaniu stopnia doktora:

18. M. Karpiarz, A. Fronczak, P. Fronczak, prezentacja pt.: *Gravity model of trade as a representative of the ensemble of random networks*, European Conference on Complex Systems ECCS'13, Barcelona, Hiszpania, Sept. 16-20, 2013.

17. G. Siudem, A. Fronczak, prezentacja pt.: *Combinatorial approach to complex systems*, Summer Solstice 2013 International Conference on Discrete Models of Complex Systems, Warszawa, Polska, June 27-29, 2013.
16. M. Karpiarz, P. Fronczak, A. Fronczak, prezentacja pt.: *Globalization puzzle in the gravity law of trade*, Summer Solstice 2013 International Conference on Discrete Models of Complex Systems, Warszawa, Polska, June 27-29, 2013.
15. M. Karpiarz, A. Fronczak, P. Fronczak, prezentacja pt.: *International trade network: gravity model of trade and exponential random graphs*, Summer Solstice 2013 International Conference on Discrete Models of Complex Systems, Warszawa, Polska, June 27-29, 2013.
14. M. Bujok, A. Fronczak, P. Fronczak, plakat pt.: *Percolation properties of a two-level hierarchical network*, Summer Solstice 2013 International Conference on Discrete Models of Complex Systems, Warszawa, Polska, June 27-29, 2013.
13. P. Fronczak, A. Fronczak, M. Bujok, plakat pt.: *Exponential random graph models for networks with community structure*, International School and Conference on Network Science NetSci2013, Kopenhaga, Dania, June 3-7, 2013.
12. M. Bujok, A. Fronczak, P. Fronczak, plakat pt.: *Percolation transition in the classical block-model*, International School and Conference on Network Science NetSci2013, Kopenhaga, Dania, June 3-7, 2013.
11. A. Fronczak, P. Fronczak, plakat pt.: *Susceptibility of the international trade to local crises*, European Conference on Complex Systems ECCS'11, Wiedeń, Austria, Sept. 12-16, 2011.
10. A. Fronczak, P. Fronczak, plakat pt.: *General, combinatorial formula for the density of states: insights into the energy equipartition principle and the theory of phase transitions*, International Conference on Statistical Physics: SigmaPhi'11, Larnaca, Cypr, July 11-15, 2011.
9. P. Fronczak, A. Fronczak, plakat pt.: *Origins of Taylor's power law for fluctuation scaling in ecology and biology*, Physics Meets Biology, Oxford, Wielka Brytania, Sept. 1-3, 2010.
8. J.A. Hołyst, P. Fronczak, A. Fronczak, prezentacja pt.: *Analysis of scientific productivity using maximum entropy principle and fluctuation-dissipation theorem*, International Conference on Economic Science with Heterogeneous Interacting Agents ESHIA/WEHIA'08, Warszawa, Polska, June 19-21, 2008.
7. J.A. Hołyst, P. Fronczak, A. Fronczak, prezentacja pt.: *Publish or perish*, Global versus Local Dynamics on Networks workshop at the European Conference on Complex Systems ECCS'07, Dresden, Niemcy, Oct. 4-5, 2007.
6. J.A. Hołyst, P. Fronczak, A. Fronczak, prezentacja pt.: *Self-organized criticality and coevolution of network structure and dynamics*, Applications of Networks: from Fundamental Physics to Complex networks (ANet07), Kraków, Polska, Nov. 2-4, 2007.
5. P. Fronczak, A. Fronczak, J.A. Hołyst, plakat pt.: *Ferromagnetic fluid as a model of social impact*, European Conference on Complex Systems ECCS'06, Oxford, Wielka Brytania, Sept. 25-29 (2006).

4. A. Fronczak, P. Fronczak, J.A. Hołyst, plakat pt.: *Networks with given two-point correlations: hidden correlations from degree correlations*, COSIN 2005 Final meeting: Conference on Complex Networks: Evolution and Statistical Properties, Salou (Tarragona), Hiszpania, March 14-18, 2005.
3. A. Fronczak, P. Fronczak, J.A. Hołyst, plakat pt.: *Structural properties of random networks with hidden variables*, International Conference on Science of Complex Networks: from Biology to the Internet and WWW, Aveiro, Portugalia, Aug. 29 - Sept. 2, 2004.
2. A. Fronczak, P. Fronczak, J.A. Hołyst, plakat pt.: *Average path length in complex networks*, XVIII Sympozjum Maksa Born'a "Fizyka statystyczna poza fizyką Łądek Zdrój, Polska, Sept. 22-25, 2003.
1. A. Fronczak, P. Fronczak, J.A. Hołyst, plakat pt.: *How to calculate the main characteristics of random graphs – a new approach*, Growing Networks and Graphs in Statistical Physics, Finance, Biology and Social Systems, COSIN midterm conference, Rzym, Włochy, Sept. 8-11, 2003.

Komunikaty i plakaty konferencyjne prezentowane przed uzyskaniem stopnia doktora:

2. P. Fronczak, J.A. Hołyst, plakat pt.: *Control of chaotic solitons by time delay feedback*, International Workshops on Complex Systems in Natural and Social Sciences CSSNS'2001, Toruń, Polska, wrzesień 2001.
1. P. Fronczak, J.A. Hołyst, plakat pt.: *The influence of delaying on the properties of synchronization of chaotic systems.*, International Workshops on Complex Systems in Natural and Social Sciences CSSNS'1999, Kazimierz Dolny, Polska, październik 1999.

I.3 **Udział w komitetach organizacyjnych międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych**

Po uzyskaniu stopnia doktora

4. 7th Conference of the European Study Group on Cardiovascular Oscillations, Kazimierz Dolny, Polska, April 22-25, 2012. (członek komitetu organizacyjnego).
3. International Conference on Economic Science with Heterogeneous Interacting Agents ESHIA/WEHIA'08, Warszawa, Polska, June 19-21, 2008. (członek lokalnego komitetu organizacyjnego).
2. Symposium on Dynamics of Complex Systems in honour of the 65th birthday of Dietrich Stauffer, 2008, Warszawa, Polska (członek komitetu organizacyjnego).
1. Applications of Physics in Financial Analysis APFA4, 2003, Warszawa, Polska (członek lokalnego komitetu organizacyjnego).

Przed uzyskaniem stopnia doktora

2. International Workshop on Complex Systems in Natural and Social Sciences CSSNS'01, 2001, Toruń, Polska (członek komitetu organizacyjnego).
1. International Workshop on Complex Systems in Natural and Social Sciences CSSNS'99, 1999, Kazimierz Dolny, Polska (członek komitetu organizacyjnego).

I.4 Otrzymane nagrody i wyróżnienia inne niż wymienione w punkcie H.9

2. Nagroda zespołowa stopnia II Rektora Politechniki Warszawskiej za osiągnięcia dydaktyczne, 2011. Podstawą przyznania nagrody była praca w zespole przygotowującym i uruchamiającym na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej specjalność "Fizyka Medyczna" pod kierownictwem prof. dr hab. J. Żebrowskiego.
1. Nagroda zespołowa stopnia II Rektora Politechniki Warszawskiej za osiągnięcia dydaktyczne, 2010. Podstawą przyznania nagrody było współautorstwo książki *Świat sieci złożonych. Od fizyki do Internetu*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2009.

I.5 Udział w konsorcjach i sieciach badawczych

Brak

I.6 Kierowanie projektami realizowanymi we współpracy z naukowcami z innych ośrodków polskich i zagranicznych oraz we współpracy z przedsiębiorcami, innymi niż wymienione w punkcie H.8

Brak.

I.7 Udział w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism

Brak.

I.8 Członkostwo w międzynarodowych i krajowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych

Brak.

I.9 Osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauki**4. Przygotowanie pomocy dydaktycznych**

Udział w tworzeniu multimedialnego środowiska nauczania fizyki na Politechnice Warszawskiej (<http://efizyka.pw.edu.pl>) w ramach zadania nr 9 Programu Rozwojowego PW finansowanego (poddziałanie 4.1.1 Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki z Europejskiego Funduszu Społecznego). Przygotowanie, wspólnie z dr hab. A. Fronczak, 4 multimedialnych wykładów:

- *Elektrodynamika klasyczna*, grudzień 2012 - marzec 2013,
- *Metody numeryczne*, marzec - sierpień 2011,
- *Fizyka sieci złożonych*, wrzesień 2010 - październik 2010,
- *Termodynamika i fizyka statystyczna*, listopad 2010 - grudzień 2010.

2. Zajęcia dydaktyczne ze studentami

Jako nauczyciel akademicki prowadziłem następujące zajęcia ze studentami Politechniki Warszawskiej:

- *Metody numeryczne*, wykład dla studentów III roku Wydziale Fizyki, od 2012.

- *Podstawy systemów mikroprocesorowych*, wykład dla studentów III roku Wydziału Fizyki, od 2012.
 - *Fizyka ogólna*, wykład i ćwiczenia rachunkowe dla studentów 2-ego semestru Wydziału Elektroniki i Technik Informatycznych, od 2009.
 - *Wstęp do fizyki*, wykład i ćwiczenia rachunkowe dla studentów 1-ego semestru Wydziału Elektroniki i Technik Informatycznych, od 2009.
1. Multimedialna strona WWW nt. zjawisk krytycznych w sieciach złożonych: *Catalogue of Critical Events in Complex Networks*, www.creen.org/catalogue.html, autorzy: P. Fronczak, A. Fronczak, czerwiec 2006.

I.10 Opieka naukowa nad studentami

Promotor prac magisterskich wykonywanych na Wydziale Fizyki PW:

7. 2014/2015, M. Bigus, *Wykorzystanie charakterystyk strukturalnych do identyfikacji ukrytych korelacji między złożonymi sieciami semantycznymi*.
6. 2013/2014, U. Szewczyk, *Wykorzystanie wybranych metod spektralnych do analizy sieci złożonych*.
5. 2010/2011, E. Ścibor, *Analiza błędzenia przypadkowego w skorelowanej sieci komputerowej*.
4. 2010/2011, B. Sobiegraj, *Potęgowie skalowanie się fluktuacji w rzeczywistych układach złożonych i szeregach czasowych*.
3. 2009/2010, F. Kolasiński, *Analiza czasowej zmienności korelacji wzajemnych w szeregach finansowych*.
2. 2009/2010, A. Siery, *Zastosowania algorytmów genetycznych do projektowania asymetrycznych rezonatorów optycznych*.
1. 2008/2009, Ł. Grydziuszko, *Zastosowanie procesów stochastycznych do modelowania finansowych szeregów czasowych*.

Opiekun naukowy prac inżynierskich wykonywanych na Wydziale Fizyki PW:

3. 2013/2014, R. Stupienko, *Implementacja algorytmu obliczającego wymiary fraktalne obiektów na sferze*.
2. 2012/2013, M. Galicki, *Implementacja programowania genetycznego w regresji symbolicznej*.
1. 2009/2010, M. Mellem, *Zastosowania algorytmów genetycznych w optymalizacji sterowania ruchem manipulatorów*.

Recenzent prac magisterskich i inżynierskich na Wydziale Fizyki PW, od roku 2008, łączna liczba wykonanych recenzji: 5.

I.11 Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze opiekuna naukowego lub promotora pomocniczego

3. mgr inż. Mariusz Karpiarz, początek studiów doktoranckich: październik 2012; termin otwarcia przewodu doktorskiego: grudzień 2014, tematyka pracy: modelowanie sieci złożonych, grawitacyjny model handlu, ekonofizyka; (promotor pomocniczy).
1. mgr inż. Maksymilian Bujok, początek studiów doktoranckich: luty 2010, termin otwarcia przewodu doktorskiego: listopad 2014, tematyka pracy: sieci hierarchiczne i rekurencyjne, zjawisko perkolacji (promotor pomocniczy).

I.12 Staże w zagranicznych i krajowych ośrodkach naukowych lub akademickich

3. Mediterranean Institute for Advanced Studies (IMEDEA), University of the Balearic Islands, Palma de Mallorca, Hiszpania, czerwiec 2004 - lipiec 2004, staż w grupie prof. Maxi San Miguela finansowany przez COST P10 Action *Physics of Risk*.
2. Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej, Warszawa, Polska, styczeń 2005 – czerwiec 2008, staż naukowy w projekcie CREEN (Critical Events in Evolving Networks) w 6 PR UE,
1. Instytut Fizyki Ciała Stałego, Politechnika w Darmstadzie, Niemcy, jednosemestralne stypendium finansowane przez program Erasmus/Socrates, kwiecień 1999 - wrzesień 1999.

I.13 Wykonane ekspertyzy lub inne opracowania na zamówienie

Brak.

I.14 Udział w zespołach eksperckich i konkursowych

Brak

I.15 Recenzowanie projektów międzynarodowych i krajowych

Brak

I.16 Recenzowanie publikacji w czasopismach międzynarodowych i krajowych

Przygotowywałem recenzje manuskryptów publikacji dla następujących czasopismach:

- *Physical Review E: Statistical, Nonlinear and Soft Matter Physics*), liczba zrecenzowanych manuskryptów publikacji: 23 od 2009.
- *Physical Review Letters*, liczba zrecenzowanych manuskryptów publikacji: 7 od 2009.
- *Acta Physica Polonica A*, liczba zrecenzowanych manuskryptów publikacji: 2 od 2014.

I.17 Inne osiągnięcia i pełnione funkcje nie wymienione w punktach I.1 - I.16

Działalność organizacyjna na rzecz Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej:

- Asystent Kierownika Projektu POKL "Przygotowanie i realizacja specjalności Fizyka Medyczna" 2009-2014.
- Członek Komisji Finansowej Wydziału 2012-2014
- Sekretarz Komisji ds. Egzaminów Dyplomowych na studiach 1-ego stopnia dla studentów specjalności Fizyka Medyczna 2011-2014

Piotr Fronczak