KONCEPCJE ZESPOŁÓW STATYSTYCZNYCH I PRZESTRZENI STANÓW W BADANIACH UKŁADÓW ZŁOŻONYCH

dr Agata Fronczak

SPIS TREŚCI

Część I

AUTOREFERAT

A DANE PERSONALNE

Imię i nazwisko: Agata Fronczak [1]

B POSIADANE DYPLOMY, STOPNIE NAUKOWE

Stopień naukowy doktora nauk fizycznych nadany 22 kwietnia 2004 r. przez Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej, tytuł rozprawy doktorskiej: *Strukturalne i krytyczne własności sieci ewoluujących i grafów przypadkowych*, promotor: prof. dr hab. Janusz A. Hołyst, recenzenci: prof. dr hab. Marek Cieplak, dr hab. Alfred Zagórski.

Tytuł magistra fizyki uzyskany 7 października 1999 r. na Wydziale Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej, tytuł pracy magisterskiej: *Elektronowy rezonans paramagnetyczny w szkłach układu* $AgI - Ag_2O - V_2O_5 - P_2O_5$, promotor: prof. dr hab. Jerzy Garbarczyk, recenzent: prof. dr hab. Franciszek Krok.

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

2004-obecnie adiunkt, Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej.
1999-2004 doktorantka, Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej.

Urlopy macierzyńskie:
sierpień 2006 - grudzień 2006
luty 2010 - czerwiec 2010

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 9 publikacji pod wspólnym tytułem:

Koncepcje zespołów statystycznych i przestrzeni stanów w badaniach układów złożonych

1 Do 2002 r. nosiłam nazwisko rodowe - Aleksiejuk.

D.2 Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego

1. 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
2. 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
3. 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
4. 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
5. A. Fronczak, P. Fronczak, *Statistical mechanics of the international trade network*, Physical Review E, vol. **85**(5), art. no. 056113 (2012). $\mathrm{IF}_{2012} = 2,313$
6. A. Fronczak, *Microscopic meaning of grand potential resulting from combinatorial approach to a general system of particles*, Physical Review E, vol. **86**(4), art. no. 041139 (2012). $\mathrm{IF}_{2012} = 2,313$
7. A. Fronczak, *Cluster properties of the one-dimensional lattice gas: The microscopic meaning of the grand potential*, Physical Review E, vol. **87**(2), art. no. 022131 (2013). $\mathrm{IF}_{2012} = 2,313$
8. 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). $\mathrm{IF}_{2012} = 2,313$
9. 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). $\mathrm{IF}_{2012} = 0,756$ [2]

Całkowity *impact factor* ww. prac wynosi: 18,592.

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 [1–9], składające się na osiągnięcie naukowe będące podstawą wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego, poruszają zagadnienia z zakresu fizyki układów złożonych. Dokumentują one rozwój naukowych zainteresowań autorki, w zakresie:

- teorii sieci złożonych (prace [1–3, 5, 8]),
- zastosowań metod fizyki do analizy rzeczywistych układów złożonych, w tym układów o strukturze sieci przypadkowych (prace [4, 5]) oraz
- wykorzystania narzędzi wypracowanych przez kombinatorykę matematyczną do analizy podstawowych modeli fizyki statystycznej (prace [4, 6, 7, 9]).

Wspólną osią tematyczną wymienionych publikacji są powracające w każdym artykule pojęcia: układu złożonego, zespołu statystycznego, przestrzeni stanów i funkcji gęstości stanów. Z tego powodu cykl publikacji [1–9] został opatrzony tytułem: *Koncepcje zespołów statystycznych i przestrzeni stanów w badaniach układów złożonych.*

E.1.1 *Pojęcie układu złożonego*

Pojęcie *układu złożonego* (ang. *complex system*) nie jest jedynie potocznym określeniem układu, którego własności i zachowanie, z jakichś powodów, wydają się złożone. Już od pewnego czasu, termin układ złożony jest dobrze znanym pojęciem naukowym, choć wieloznaczność tego pojęcia jest dość duża. I tak, układ, który jest bardzo wrażliwy na warunki początkowe lub małe zakłócenia często określa się mianem układu złożonego. Układem złożonym jest również układ, który wciąż ewoluuje i rozwija się. Do układów złożonych zalicza się także takie układy, w których występuje mnogość interakcji między ich różnymi składnikami (częściami), i interakcje te powodują, że własności układu traktowanego jako całość nie da się w prosty sposób wywnioskować, badając własności jego odizolowanych od siebie części. Różnorodność kontekstów, w jakie wpisuje się to pojęcie sprawia, że każdy z układów analizowanych w pracach [1–9] może być traktowany jako układ złożony.

E.1.2 *Równowagowe zespoły statystyczne sieci przypadkowych, wykładnicze grafy przypadkowe*

W pracach [1–3, 5, 8] obiektem badań były *sieci złożone*. Naukową motywacją tych badań była przede wszystkim potrzeba stworzenia teoretycznych modeli sieci złożonych, których własności odpowiadałyby własnościom sieci rzeczywistych. W tym miejscu należy wyjaśnić, że w ostatniej dekadzie badania sieci złożonych stały się jednym z najciekawszych przykładów interdyscyplinarnych zastosowań fizyki statystycznej [10–12]. Zbudowane z setek, tysięcy, a nawet milionów elementów, pełniących różnorakie funkcje, powiązanych w skomplikowany, a jednak precyzyjny sposób, sieci, które rosną, dopasowują się do zmian otoczenia, optymalizują swoje działanie, opanowały wyobraźnię naukowców z wielu dziedzin. Jedną z przyczyn, dla których badania nad sieciami rzeczywistymi (komputerowymi, genetycznymi, społecznymi, ekonomicznymi etc.) stały się tak atrakcyjne, było odkrycie tego, że mimo funkcjonalnej różnorodności wymienione układy mają wiele wspólnych cech. I chociaż spośród tych cech najbardziej spektakularny był odkryty przez A. Barabásiego i R. Albert, opisany w magazynie Science [13], wspólny wielu sieciom, potęgowy (bezskalowy) rozkład stopni wierzchołków, dzisiaj wiadomo, że prawa potęgowe pojawiają się w nauce o sieciach złożonych niemal na każdym kroku.

Wszechobecność praw potęgowych w sieciach rzeczywistych, jak również ich znaczenie dla tych układów starano się zrozumieć tworząc teoretyczne modele sieci. W ten sposób, modele, obok analizy sieci rzeczywistych, stały się jednym z głównych filarów, na których opiera się nauka o sieciach złożonych.

Najprostszą klasyfikacją modeli sieciowych jest ich podział na sieci deterministyczne i przypadkowe (zob. rozdz. 4 w [11]). Sieci przypadkowe można dalej podzielić na sieci statyczne i ewoluujące. Ten podział sieci przypadkowych nawiązuje do znanego podziału fizyki statystycznej na równowagową, która zajmuje się układami będącymi w stanie równowagi, oraz nierównowagową, której obszar zainteresowań obejmuje układy niebędące w stanie równowagi, jednak mogące przebywać w pewnym nierównowagowym stanie stacjonarnym. W pracach [1–3, 5, 8] przedmiotem badań były równowagowe modele sieci przypadkowych z ukrytymi zmiennymi oraz modele tzw. wykładniczych grafów przypadkowych, znanych również jako sieci o zadanym hamiltonianie strukturalnym.

Dla fizyków wykładnicze grafy przypadkowe [14] są szczególnie proste (intuicyjnie zrozumiałe), ponieważ koncepcyjnie nawiązują one do zapoczątkowanej przez E.T. Jaynesa szkoły fizyki statystycznej opartej na zasadzie maksymalnej entropii [15, 16], która jest formalnie równoważna tradycyjnej szkole fizyki statystycznej zapoczątkowanej przez Boltzmanna i Gibbsa. Ponieważ modele te są z definicji modelami sieci równowagowych, w ich dyskusji w naturalny sposób pojawia się pojęcie przestrzeni stanów, jako zbioru możliwych realizacji badanych sieci, $\{G\}$, z określonym na tym zbiorze, niezależnym od czasu, wykładniczym rozkładem prawdopodobieństwa, $P(G) \propto e^{-H(G)}$, gdzie $H(G)$ jest wspomnianym już hamiltonianem sieciowym.

W pracach [1–3, 5, 8] zbadano zespoły statystyczne sieci (wykładnicze grafy przypadkowe) opisane różnymi hamiltonianami sieciowymi. I tak, w pracy [2] rozważano sieci o zadanej sekwencji stopni węzłów oraz sieci z korelacjami dwupunktowymi. W pracy [3] zbadano zespół, którego hamiltonian nawiązywał do znanego w literaturze tzw. modelu Straussa [17, 18]. W pracy [5] zajęto się zespołami sieci ważonych, które wykorzystano do analizy rzeczywistej sieci handlu światowego, zaś w pracy [8] model wykładniczych grafów przypadkowych wykorzystano do stworzenia sieci o strukturze blokowej (ang. *community structure*) [19, 20]. Ponadto, w publikacjach [2, 5] idea równowagowych zespołów statystycznych sieci została (po raz pierwszy w literaturze przedmiotu) wykorzystana wyprowadzenia specjalnych (tj. zależnych od hamiltonianu) rodzajów twierdzeń fluktuacyjno-dysypacyjnych opisujących wybrane zespoły sieci. Najprostsze z takich twierdzeń wiążą fluktuacje występujące w badanych układach (sieciach) z ich podatnością na zmianę parametrów (sił) zewnętrznych. W tym kontekście na szczególne zainteresowanie zasługuje praca na temat sieci handlu światowego [5], w której znany od wielu lat, słynny ekonometryczny model, tzw. *grawitacyjny model handlu* (ang. *gravity model of trade*) [21], został zdefiniowany w języku wykładniczych grafów przypadkowych. 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 ekonomicznych [5].

E.1.3 *Przestrzeń stanów w rzeczywistych układach złożonych, potęgowe skalowanie się fluktuacji*

W pracach habilitantki, zasada maksymalnej entropii oraz idee fizyki statystycznej stojące za pojęciami zespołów statystycznych, przestrzeni stanów i funkcji gęstości stanów zostały również wykorzystane do badania innych, nie tylko sieciowych, układów złożonych.

I tak, celem pracy [4] było wyjaśnienie przyczyn potęgowego skalowania się fluktuacji w układach złożonych. Potęgowe skalowanie się fluktuacji [22], powszechnie znane jako prawo Taylora, po raz pierwszy zostało opisane w roku 1961 na łamach magazynu Nature [23]. Stwierdzało ono, że wyrażone przez wariancję fluktuacje, $\langle N^2\rangle - \langle N\rangle^2$, opisujące liczbę osobników wielu różnych gatunków zwierząt, ptaków, owadów, roślin itd., zależą potęgowo od średnich wartości tych liczb, $\langle N\rangle$, tzn.: $\langle N^2\rangle - \langle N\rangle^2 = a\langle N\rangle^b$, gdzie parametr b ma zwykle wartości z przedziału od 1 do 3. W ciągu ostatniej dekady prawem tym zainteresowali się również naukowcy innych dziedzin, w tym fizycy, pokazując, że potęgowe skalowanie się fluktuacji jest bardzo uniwersalne. W społeczności fizyków zajmujących się układami złożonymi, zaczął się nawet ugruntowywać pogląd, że niepoissonowskie fluktuacje [3] wyrażone przez prawo Taylora dla $b > 1$, mogą być przejawem tego, że wiele układów złożonych w stanie równowagi (w tym układów, które tradycyjnie należą do obszaru zainteresowań fizyków) nie jest poprawnie opisywanych przez tradycyjną fizykę statystyczną w ujęciu Gibbsa.

W pracy [4], pokazaliśmy, że niepoissonowskie fluktuacje nie stoją w sprzeczności z teorią równowagowych zespołów fizyki statystycznej. Aby zrozumieć przyczyny powstawania fluktuacji Taylora opracowaliśmy nowe podejście do badania funkcji gęstości stanów, w którym funkcję tę, opisującą liczbę mikrostanów reprezentujących określony makrostan, wyraża się poprzez pewne konstrukcje kombinatoryczne, tzw. wielomiany Bella. We wspomnianej pracy, funkcja gęstości została wyznaczona dla zespołu, w którym korzystając z zasady maksymalnej entropii narzucono określoną, średnią wartość parametru [4] $\langle N\rangle$. Wszechstronność zaproponowanej teorii 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 insektów, 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.

Praca [4] okazała się przełomowa. Stało się tak, ponieważ zapoczątkowane w tej pracy, kombinatoryczne podejście do badania funkcji gęstości stanów w układach złożonych, wykorzystujące tzw. formułę wykładniczą i wielomiany Bella, otworzyło nowe, nieznane dotychczas, możliwości opisu przestrzeni stanów i funkcji gęstości stanów w znanych, klasycznych modelach równowagowej fizyki statystycznej. Kolejne prace habilitantki, [6, 7, 9], dokumentują jej dorobek w tym zakresie badań.

3 Parametr $b = 1$ charakteryzuje fluktuacje w rozkładzie Poissona, stąd nazwa fluktuacje poissonowskie.
4 Z formalnego punktu widzenia, taki zespół jest równoważny zespołowi kanonicznemu, zob. [15].

E.1.4 *Kombinatoryczne podejście do badania funkcji gęstości stanów w fizyce statystycznej stanów równowagi*

Przedstawione w pracach [6, 7, 9] wyniki w pewnym stopniu nawiązują do diagramatycznej teorii gazów oddziałujących zaproponowanej przez Josepha E. Mayera [24, 25], o której Max Born pisał: *We consider these papers* [tj. publikacje Mayera] *as the most important contribution to statistical machanics, and this opinion was shared by the International Conference held in Amsterdam, 26 November 1937, in commemoration of Van de Waals' birth* [26].

W cyklu swoich prac poświęconych fizyce układów kondensujących Mayer rozważał model gazu rzeczywistego - zbiór atomów oddziałujących ze sobą siłami dwucząsteczkowymi wynikającymi z potencjału Lennarda-Jonesa. Badając różne mikrostany takiego gazu, tj. rozważając łączenie się cząsteczek w klastery o różnych rozmiarach, Mayer zauważył, że w pewnych warunkach zewnętrznych, tzn. dla ustalonych wartości temperatury i potencjału chemicznego, badany gaz zaczyna kondensować. Większe klastery, odpowiadające fazie cieczy, nagle stają się znacznie bardziej prawdopodobne niż kilkuatomowe klastery charakteryzujące fazę gazu. W ten sposób Mayer, jako pierwszy, pokazał, że jeden i ten sam hamiltonian może opisywać wiele różnych faz badanych układów.

Co ciekawe, idee Mayera [27], które swego czasu znalazły uznanie w oczach Borna i w fizyce teoretycznej dały początek metodom *rozkładu grupowego* (ang. *cluster expansion methods*) i *statystycznej teorii pola* (ang. *statistical field theory*), zainspirowały również matematyków i bezpośrednio przyczyniły się do rozwoju nowej dziedziny - *kombinatoryki enumeratywnej* (wyliczeniowej) (ang. *enumerative combinatorics*) [28]. Stało się tak, dzięki pracom Uhlenbecka i jego studenta Riddella [29], w którego rozprawie doktorskiej [30] po raz pierwszy pojawiła się tzw. formuła wykładnicza (ang. *exponential formula*), będąca kamieniem węgielnym kombinatoryki enumeratywnej [31].

Formuła wykładnicza w elegancki, ilościowy sposób pozwala opisać różne struktury złożone przy pomocy części składowych tychże struktur. W dużym uproszczeniu, formuła ta dostarcza odpowiedzi na pytanie: Ile struktur złożonych o zadanych własnościach (np. o ustalonym rozmiarze) można zbudować, korzystając z zadanego zbioru struktur podstawowych (cegiełek, części). Formalnie, formuła wykładnicza stwierdza, że wykładnicza funkcja generująca, $F(x)$, opisująca struktury złożone jest funkcją wykładniczą wykładniczej funkcji generującej, $f(x)$, opisującej części składowe, tzn. $F(x) = \exp[f(x)]$.

Znajomość formuły wykładniczej rzuca nowe światło na podstawowe pojęcia fizyki statystycznej stanów równowagi. W szczególności wykładnicze związki między sumami statystycznymi [5], które można interpretować jako swoiste funkcje generujące opisujące przestrzeń stanów badanych układów, i odpowiadającymi im energiami swobodnymi [6], pozwalają na nową, nieznaną dotychczas, mikroskopową interpretację tych drugich. Zasygnalizowane tutaj idee stały się inspiracją dla prac [6, 7, 9] habilitantki. I tak, w pracy [6] omówiono mikroskopową interpretację wielkiego potencjału termodynamicznego dla ogólnego układu oddziałujących cząstek. Pokazano, że w przypadku idealnego gazu klasterów, tj. gazu z oddziaływaniami zdefiniowanymi w taki sposób, że jedynie atomy należące do tego samego klastera mogą wchodzić ze sobą w interakcje, wielki potencjał termodynamiczny jest wykładniczą funkcją generującą opisującą wewnętrzne stany nieoddziałujących

5 zwykłą sumą statystyczną, $Z(\beta)$, w rozkładzie kanonicznym i wielką sumą, $\Xi(\beta, z)$, w rozkładzie wielkim kanonicznym, gdzie $\beta = (k_B T)^{-1}$, zaś $z = e^{\beta\mu}$, μ potencjał chemiczny;

6 odpowiednio, energią swobodną Helmholtza, $F(\beta) = -\ln[Z(\beta)]/\beta$ i wielkim potencjałem termodynamicznym, $\Phi(z) = -\ln[\Xi(z)]/\beta$;

klasterów. W pracy [7], ogólny formalizm opisany we wcześniejszej publikacji [6] zastosowano do opisu własności klasterów w jednowymiarowym gazie sieciowym. Natomiast w pracy [9], zastosowanie formuły wykładniczej umożliwiło uzyskanie ścisłego wzoru na współczynniki *niskotemperaturowego rozwinięcia* (ang. *low-temperature expansion*) zwykłej sumy statystycznej dla modeli sieciowych (ang. *lattice models*), które to współczynniki odpowiadają liczbie stanów o zadanej energii tychże modeli.

E.2 Szczegółowe omówienie prac składających się na cyklu publikacji będących podstawą wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego

[1] A. Fronczak, P. Fronczak, *Networks with given two-point correlations: Hidden correlations from degree correlations*, Phys. Rev. E 74, 026121 (2006).

Przedmiotem badań w tej pracy były równowagowe zespoły sieci przypadkowych z ukrytymi zmiennymi (ang. *random networks with hidden variables*) [32]. Zespoły te charakteryzuje się podając:

- rozkład zmiennych ukrytych, $R(h)$, (każdemu spośród N węzłów sieci przypisuje się zmienną ukrytą z tego rozkładu) oraz
- prawdopodobieństwo, r_{ij}, istnienia połączenia między dowolną parą węzłów i oraz j (w ogólnym przypadku prawdopodobieństwo to zależy od zmiennych ukrytych przypisanych tym węzłom).

Znajomość rozkładu $R(h)$ oraz funkcyjnej postaci prawdopodobieństwa $r_{ij} = r_{ij}(h_i, h_j)$, umożliwia wyznaczenie najważniejszych strukturalnych charakterystyk rozważanych zespołów sieci, na przykład:

- rozkładu stopni węzłów, $P(k)$, który opisuje prawdopodobieństwo, że losowo wybrany węzeł, niezależnie od przypisanej mu zmiennej ukrytej, ma k najbliższych sąsiadów i
- rozkładu $P(k_i, k_j)$, który jest określony na zbiorze krawędzi badanych sieci i opisuje prawdopodobieństwo tego, że losowo wybrana krawędź łączy węzły o stopniach [7] k_i oraz k_j.

Przed powstaniem pracy [1] wiadomo było, że jeśli zmienne ukryte przypisane węzłom sieci mają charakter ciągłych zmiennych losowych i są równe oczekiwanym (pożądanym) stopniom tych węzłów, wówczas rozkłady $P(k)$ oraz $P(k_i, k_j)$ są wyrażone poprzez całkowe transformaty Poissona [8] znanych *a priori* rozkładów $R(h)$ oraz $R(h_i, h_j)$, tj.

$$P(k) = \int g(k; h)R(h)dh, \tag{1}$$

oraz

$$P(k_i, k_j) = \int\int g(k_i - 1; h)\ R(h_i, h_j)\ g(k_j - 1; h_j)dh_i dh_j, \tag{2}$$

7 W tym miejscu należy wyjaśnić, że w teorii sieci przypadkowych rozkład $P(k_i, k_j)$ charakteryzuje korelacje (zależności) między stopniami sąsiadujących węzłów. O sieciach mówi się, że są nieskorelowane, jeśli rozkład stopni najbliższych sąsiadów węzła i-tego, $P(k_j|k_i) = \langle k_i\rangle P(k_i, k_j)/(k_i P(k_i))$, nie zależy od k_i, tzn. jest taki sam dla wszystkich węzłów sieci.

8 tzn. transformaty całkowe z jądrem zadanym przez rozkład Poissona;

gdzie $g(k; h)$ jest rozkładem Poissona o wartości średniej $\langle k \rangle = h$.

Z powyższych wzorów wynika, że jeśli znamy rozkłady prawdopodobieństw $R(h)$ oraz $R(h_i, h_j)$ charakteryzujące badane sieci w przestrzeni zmiennych ukrytych, to posługując się tymi wzorami jesteśmy w stanie wyznaczyć rozkłady $P(k)$ oraz $P(k_i, k_j)$. Innymi słowy, zależności (1) oraz (2) pokazują, w jaki sposób korelacje między zmiennymi ukrytymi wpływają na wzorce połączeń międzywęzłowych. Nie dostarczają one jednak odpowiedzi na inne ważne pytanie: Jaką postać powinien mieć rozkład $R(h_i, h_j)$, by połączenia międzywęzłowe były opisane rozkładem $P(k_i, k_j)$. Celem pracy [1] było znalezienie odpowiedzi na to pytanie. W omawianej pracy pokazaliśmy, w jaki sposób można odwrócić ciągłe transformaty Poissona [9] (1) oraz (2), w celu wyznaczenia rozkładów $R(h)$ oraz $R(h_i, h_j)$, gdy *a priori* znamy rozkłady $P(k)$ oraz $P(k_i, k_j)$.

Opisane w pracy [1] wzory na odwrotne transformaty Poissona, tj.

$$R(h) = e^h \mathcal{F}^{-1}[G(ix)], \tag{3}$$

gdzie $\mathcal{F}^{-1}$ oznacza odwrotną transformatę Fouriera, zaś $G(ix) = \sum_k (ix)^k P(k)$ jest funkcją generującą dla rozkładu, $P(k)$, stopni węzłów oraz

$$\frac{R(h_i, h_j)}{h_i h_j} = e^{h_i + h_j} \mathcal{F}^{-1}\left[\mathcal{F}^{-1}[G(ix, iy)]\right], \tag{4}$$

gdzie $G(ix, iy)$ jest funkcją generującą dla rozkładu $P(k_i, k_j)$, zostały wykorzystane do analizy kilku znanych z literatury zespołów skorelowanych i nieskorelowanych sieci przypadkowych. Posłużyły one również do udoskonalenia opisanego w pracy [32] algorytmu służącego do generowania sieci przypadkowych o zadanych, dwupunktowych korelacjach międzywęzłowych.

[2] **A. Fronczak, P. Fronczak, J.A. Hołyst, *Fluctuation-dissipation relations in complex networks*, Phys. Rev. E 73, 016108 (2006).**

Celem tej pracy było zbadanie fluktuacji w wybranych zespołach wykładniczych grafów przypadkowych. Analizie poddano trzy, dobrze znane zespoły sieci [33] zdefiniowane na zbiorze, $\{G\}$, grafów prostych o N wierzchołkach:

- zespół grafów o określonej, średniej liczbie krawędzi, $\langle E \rangle = const$ (hamiltonian tego zespołu ma postać: $H(G) = \theta E(G)$, co oznacza, że w zespole tym prawdopodobieństwo realizacji dowolnego grafu prostego, G, jest równe $P(G) = e^{-\theta E(G)}/Z(\theta)$, gdzie $\theta = \theta(\langle E \rangle)$),
- zespół o zadanej sekwencji oczekiwanych stopni węzłów, $\{\langle k_1 \rangle, \langle k_2 \rangle, \ldots, \langle k_N \rangle\}$, (hamiltonian charakteryzujący ten zespół sieci ma postać: $H(G) = \sum_{i=1}^{N} \theta_i k_i(G)$) oraz
- ogólny zespół sieci z korelacjami dwupunktowymi (hamiltonian tego zespołu ma postać: $H(G) = \sum_{i<j} \theta_{ij} \sigma_{ij}(G)$, gdzie $\sigma_{ij}(G) = 1$ lub 0 jest zmienną losową opisującą odpowiednio istnienie lub brak krawędzi (i, j)).

9 W omawianej pracy podaliśmy również wzory na odwrotne dyskretne transformaty Poissona, które pojawiają się wtedy, gdy zmienne ukryte przypisane węzłom mają charakter dyskretnych zmiennych losowych.

W pracy tej, po raz pierwszy w literaturze nt. modeli sieci złożonych, poruszono zagadnienia związane z relacjami fluktuacyjno-dysypacyjnymi dla równowagowych zespołów sieci przypadkowych. Wyprowadzono i omówiono relacje fluktuacyjno-dysypacyjne [10] charakteryzujące wymienione zespoły sieci. W przypadku sieci o zadanej sekwencji stopni węzłów, posługując się wspomnianymi relacjami, pokazano [11], że bezskalowy (potęgowy) charakter rozkładu stopni węzłów w sieciach rzeczywistych możne być związany z tym, że rzadkie sieci z niewielką liczbą silnie usieciowionych węzłów (ang. *hubów*), mają mniejszą, w porównaniu z sieciami o równomiernie rozłożonych krawędziach, podatność na zewnętrzne zaburzenia. Relacje fluktuacyjno-dysypacyjne w sieciach złożonych zostały jeszcze później wykorzystane w pracy [5] do analizy rzeczywistej sieci handlu.

Ponadto, opisana w pracy [2] analiza fluktuacji w zespołach wykładniczych grafów przypadkowych umożliwiła wykazanie równoważności tych zespołów i odpowiednich zespołów sieci przypadkowych z ukrytymi zmiennymi [1].

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

W pracy [3] zbadaliśmy model wykładniczych grafów przypadkowych o hamiltonianie

$$H(G) = \theta P(G) + \alpha C(G), \tag{5}$$

gdzie $C(G)$ oznacza współczynnik gronowania badanych sieci $\{G\}$, zaś $P(G)$ jest średnią produktywnością węzłów, p_i, zdefiniowaną jako nieliniowa funkcja ich stopni,

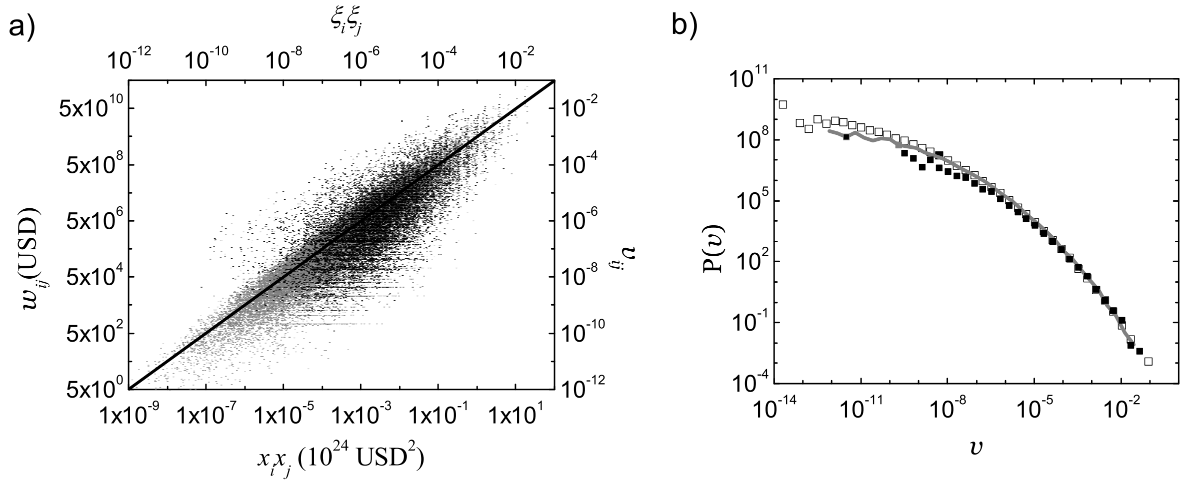
$$p_i = k_i e^{-k_i/h}, \tag{6}$$

gdzie h jest pewnym optymalnym stopniem węzła. Oryginalne oznaczenia, którymi posługiwaliśmy się w publikacji [3], były związane z tym, że praca była finansowana w ramach projektu EU *CREEN* i miała na celu stworzenie modelu, który opisywałby najkorzystniejsze struktury dla współpracy naukowej w ramach projektów europejskich. 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 (6). Jednakże, zbyt wiele równolegle prowadzonych projektów skutkuje obniżeniem efektywności pracy, co opisuje czynnik wykładniczy $e^{-k_i/h}$.

Chociaż badany hamiltonian (5) nawiązywał do znanego z literatury hamiltonianu opisującego tzw. model Straussa [17, 18] (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 [3] pokazaliśmy, że diagram fazowy tego modelu sieci charakteryzuje się ogromnym bogactwem stabilnych i metastabilnych struktur sieciowych.

10 Znaczenie relacji fluktuacyjno-dysypacyjnych w fizyce statystycznej jest związane z tym, że łączą one mikroskopowy opis układu (fluktuacje w stanie równowagi) z jego makroskopowymi własnościami (podatnością), pozwalając w ten sposób wnioskować nt. zachowania się układu w odpowiedzi na zmianę warunków zewnętrznych.

11 rozważając uproszczony model sieci, w której wszystkie węzły, oprócz jednego, miały oczekiwany stopień $\langle k \rangle = 1$, zaś stopień wyróżnionego węzła, $\langle k^* \rangle$, mógł się zmieniać od 1 do $N-1$;



Rys. 1: **Sieć handlu światowego w roku 1995:** porównanie danych rzeczywistych (czarne punkty na wykresach a i b) z wynikami symulacji numerycznych (szare punkty). (a) Wartości wymiany handlowej, w_{ij}, w funkcji iloczynu PKB, $x_i x_j$, handlujących państw. (b) Histogram wag krawędzi, $v_{ij} = w_{ij}/T$, w sieci rzeczywistej i w modelu.

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

Przedmiotem badań w pracy [5] była sieć międzynarodowej wymiany handlowej (ang. *international trade network*), w której handlujące ze sobą państwa były reprezentowane przez węzły sieci, zaś relacje importu/eksportu były wyrażone przez skierowane połączenia międzywęzłowe o wagach odpowiadających wielkości bilateralnej wymiany handlowej.

Analizując dane rzeczywiste nt. międzynarodowego eksportu i importu w latach 1950-2000, pokazaliśmy, że we wszystkich latach z tego okresu badana sieć miała cechy typowego reprezentanta (mikrostanu) zespołu skierowanych sieci ważonych o hamiltonianie będącym sumą wag wszystkich krawędzi

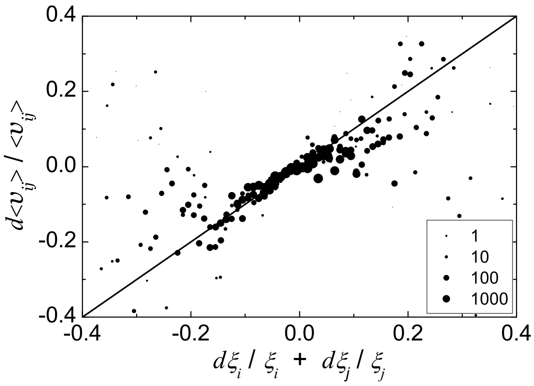
$$H(G) = \sum_i \sum_{j \neq i} \theta_{ij} w_{ij}(G), \tag{7}$$

gdzie $w_{ij}(G)$ oznacza wagę krawędzi $i \to j$ (tj. liczoną w milionach dolarów wielkość całkowitego eksportu/importu z i do j), zaś θ_{ij} jest pewnym parametrem zewnętrznym, sprzężonym z wagą w_{ij}, który warunkuje jej średnią wartość

$$\langle w_{ij} \rangle = \theta_{ij}^{-1}. \tag{8}$$

Korzystając z danych rzeczywistych nt. wymiany handlowej, zaniedbując rolę odległości geograficznych, pokazaliśmy, że parametry θ_{ij} zależą jedynie od iloczynu produktów krajowych brutto (PKB) (ang. *gross domestic product, GDP*) handlujących państw, $x_i x_j$, od globalnego PKB, $X = \sum_i x_i$, oraz od wielkości globalnej wymiany handlowej $T = \sum_i \sum_{j \neq i} w_{ij}$:

$$\theta_{ij} = \frac{X^2}{T}(x_i x_j)^{-1}. \tag{9}$$



Rys. 2: **Odpowiedź sieci handlu na zmianę wskaźników makroekonomicznych.** Linia ciągła wyraża zależność (10), zaś czarne punkty reprezentują dane rzeczywiste. Sposób przygotowania danych rzeczywistych wykorzystanych na tym rysunku został szczegółowo opisany w publikacji [5].

Znając wszystkie parametry $\{\theta_{ij}\}$ hamiltonianu dla modelu sieci handlu światowego w latach 1950 – 2000 wykonaliśmy szereg symulacji numerycznych, których wyniki zostały porównane z danymi rzeczywistymi. Pokazaliśmy, że zaproponowany model doskonale odwzorowuje strukturalne własności badanej sieci (rys. 1), co oznacza, że w krótkich okresach czasu, ewolucja międzynarodowej wymiany handlowej może być traktowana jako proces kwazistatyczny.

Założenie o kwazistatyczności pozwoliło na sformułowanie prostego twierdzenia fluktuacje-odpowiedź (ang. *fluctuation-response theorem*) [2] opisującego, w jaki sposób zmiany wskaźników makroekonomicznych charakteryzujących strukturę światowej sieci handlu przekładają się na fluktuacje bilateralnej wymiany handlowej:

$$\frac{d\langle \nu_{ij}\rangle}{\langle \nu_{ij}\rangle} = \frac{d\langle \xi_i\rangle}{\langle \xi_i\rangle} + \frac{d\langle \xi_j\rangle}{\langle \xi_j\rangle}, \tag{10}$$

gdzie wielkość $\nu_{ij} = w_{ij}/T$ oznacza udział przepływu w_{ij} w globalnej wymianie handlowej T, zaś $\xi_i = x_i/X$ reprezentuje udział państwa i w globalnym PKB. Rysunek 2 pokazuje zgodność twierdzenia (10) z danymi rzeczywistymi.

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

Wiele sieci rzeczywistych ma strukturę modułową (blokową) (ang. *community structure*) [19, 20]. Oznacza to, że w strukturze sieci można wyróżnić grupy węzłów takie, że gęstość połączeń między węzłami należącymi do tej samej grupy (modułu) jest znacznie większa niż gęstość połączeń między węzłami należącymi do różnych grup (modułów). W ostatnich latach różne zagadnienia związane z tą cechą sieci rzeczywistych były intensywnie badane, ponieważ wśród naukowców zaangażowanych w badania sieci złożonych, panowało i wciąż panuje przekonanie, że cecha, o której mowa, i która nosi znamiona fraktalności, może wpływać na wiele kluczowych własności sieci rzeczywistych.

W pracy [8], po raz pierwszy w literaturze na temat sieci złożonych, do modelowania sieci o strukturze modułowej zostały wykorzystane wykładnicze grafy przypadkowe. Oprócz klasycznego modelu blokowego (ang. *classical blockmodel*) [34] o hamiltonianie postaci:

$$H(G) = \sum_{r \leqslant s} \omega_{rs} E_{rs}(G), \tag{11}$$

gdzie E_{rs} jest liczbą krawędzi między modułami r oraz s, zaś E_{rr} reprezentuje liczbę krawędzi wewnątrz modułu r, zbadano również model blokowy z tzw. korektą na stopnie węzłów (ang. *degree-corrected blockmodel*) [35] o hamiltonianie postaci:

$$H(G) = \sum_{i} \nu_i k_i(G) + \sum_{r \leqslant s} \omega_{rs} E_{rs}(G), \tag{12}$$

gdzie k_i oznacza stopień węzła i. Obliczono sumy statystyczne tych zespołów, dzięki czemu 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 ν_i.

W analizie modelu blokowego z korektą na stopnie węzłów, ważną ideą okazało się zdefiniowanie tzw. wewnętrznych i zewnętrznych stopni węzłów (ang. *internal and external degrees*). Stopniem wewnętrznym, k_i^{int}, węzła i nazwano liczbę jego najbliższych sąsiadów należących do tego samego modułu, zaś stopniem zewnętrznym, k_i^{ext}, liczbę jego pozostałych sąsiadów, równą $k_i - k_i^{int}$. Pokazano, że w tym zespole sieci istnieje liniowa zależność między $\langle k_i^{int} \rangle$ oraz $\langle k_i^{ext} \rangle$, która jest koncepcyjnie podobna do relacji skalowania, które zostały zaobserwowane w samopodobnych rzeczywistych sieciach złożonych (ang. *self-similar real-world complex networks*) [36]. Pojawienie się tej zależności w wykładniczych grafach przypadkowych o dość prostym hamiltonianie (12) jest o tyle zaskakujące, że w pracach nt. samopodobnych sieci złożonych [36, 37] podobne zależności zostały zidentyfikowane, jako potencjalne źródło fraktalności wynikające z ewoluującego charakteru badanych sieci.

W pracy [8] omówiono również algorytmy Monte Carlo służące do generowania modeli blokowych. Na rysunku 3 pokazano przykładowe/typowe realizacje sieci z badanych zespołów.

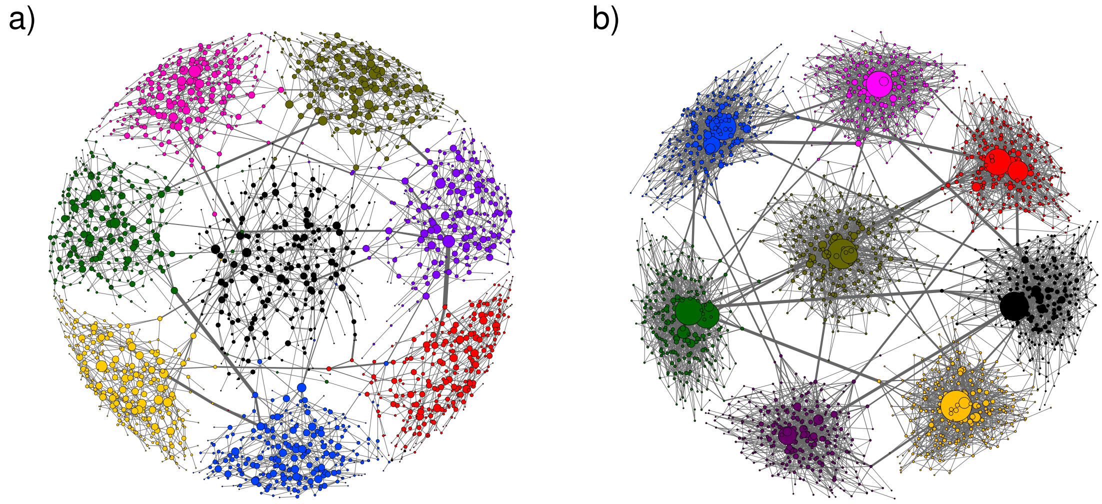
[4] **A. Fronczak, P. Fronczak, *Origins of Taylor's power law for fluctuation scaling in complex systems*, Phys. Rev. E 81, 066112 (2010).**

W pracy [4] pokazaliśmy, że potęgowe skalowanie się fluktuacji [22], znane jako prawo Taylora [23], można obserwować w układach opisywanych przez tradycyjne, równowagowe zespoły fizyki statystycznej, a dzięki formalizmowi zaproponowanemu niedawno przez P. Attarda [38], również w układach będących w nierównowagowych stanach stacjonarnych, w których zamiast fluktuacji po zespole (ang. *ensemble fluctuation scaling*) prawo to dotyczy fluktuacji czasowych (ang. *temporal fluctuation scaling*) (zobacz wykresy A1-A4 na rys. 4).

Prawo Taylora mówi o tym, że w stanie równowagi fluktuacje pewnego parametru ekstensywnego, N, zależą potęgowo od wartości średniej, $\langle N \rangle$, tego parametru:

$$\sigma_N^2 = \langle N^2 \rangle - \langle N \rangle^2 = a \langle N \rangle^b, \tag{13}$$

gdzie b jest z reguły większe od 1. W pracy [4] pokazaliśmy, że w zespole, w którym korzystając z zasady maksymalnej entropii ustali się wartość $\langle N \rangle$, prawo Taylora jest kon-



Rys. 3: **Przykładowe realizacje sieci należących do badanych zespołów wykładniczych grafów przypadkowych**: a) klasycznego modelu blokowego, b) modelu blokowego z potęgowym rozkładem stopni węzłów. W obydwu sieciach, węzły należące do tego samego modułu oznaczono takim samym kolorem. Rozmiary węzłów są proporcjonalne do ich stopni, zaś grubość połączeń odpowiada roli, jaką pełnią one w procesach komunikacji międzywęzłowej całej sieci.

sekwencją odpowiednio dobranej funkcji gęstości stanów, $g(N)$. W takim zespole, funkcja $g(N)$ charakteryzująca rozkład prawdopodobieństwa,

$$P(N;\mu) = g(N)\frac{e^{-\mu N}}{e^{F(\mu)}}, \tag{14}$$

dla zmiennej N jest opisana wzorem

$$g(N) \propto \frac{e^N}{N!} Y_N(f_1, f_2, \ldots, f_N), \tag{15}$$

gdzie $Y_N(f_1, f_2, \ldots f_N)$ jest tzw. kompletnym wielomianem Bella (ang. *complete Bell polynomial*), którego współczynniki f_n dla $n = 1, 2, \ldots N$ są równe współczynnikom rozwinięcia energii swobodnej, $F(\mu)$, w szereg Maclaurina.

Na pierwszy rzut oka, wyrażenie (15) wydaje się dość skomplikowane. W rzeczywistości jednak, matematyczna interpretacja tego wyrażenia jest raczej prosta: Kompletny wielomian Bella,

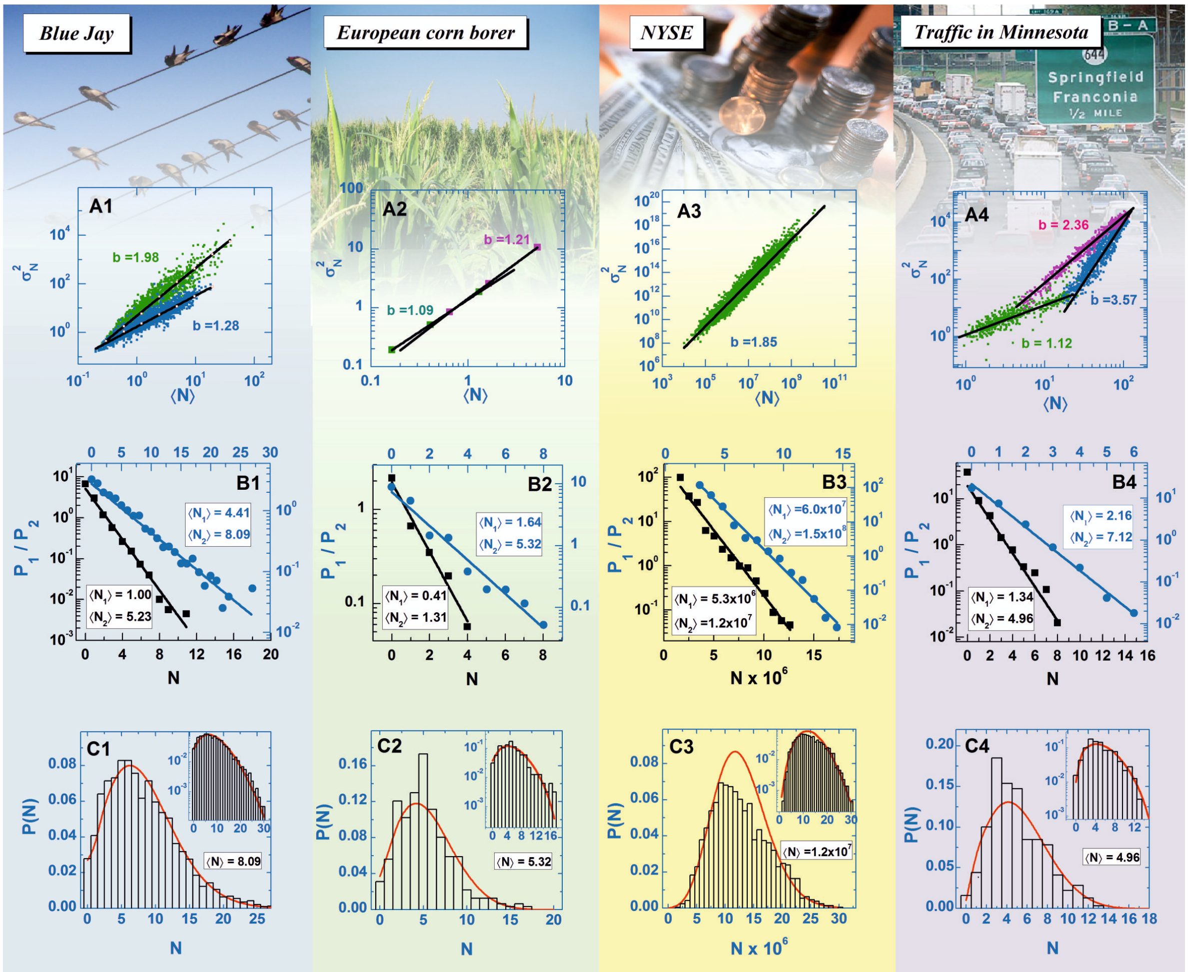
$$Y_N(f_1, f_2, \ldots, f_N) = \sum_{k=1}^{N} B_{N,k}(f_1, f_2, \ldots, f_{N-k+1}), \tag{16}$$

opisuje liczbę wszystkich możliwych podziałów zbioru N-elementowego na dowolną liczbę podzbiorów $k = 1, 2, \ldots N$, gdzie $B_{N,k}(\{f_n\})$ jest tzw. niekompletnym wielomianem Bella [12],

12 Niekompletne wielomiany Bella są opisane wzorem:

$$B_{N,k}(f_1, f_2, \ldots f_{N-k+1}) = \sum_{c_i} \frac{N!}{c_1! c_2! \ldots c_{N-k+1}!} \left(\frac{a_1}{1!}\right)^{c_1} \left(\frac{a_2}{2!}\right)^{c_2} \cdots \left(\frac{a_{N-k+1}}{(N-k+1)!}\right)^{c_{N-k+1}}, \tag{17}$$

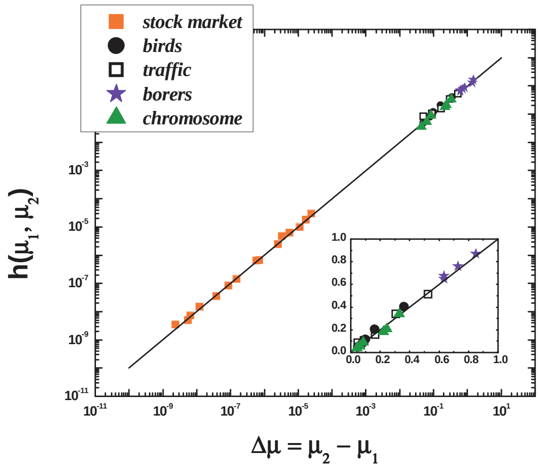
gdzie sumowanie odbywa się po wszystkich nieujemnych liczbach całkowitych $c_1, c_2, \ldots$ takich, że $c_1 + c_2 + \ldots = k$ oraz $c_1 + 2c_2 + 3c_3 + \ldots = N$.



Rys. 4: **Potęgowe skalowanie się fluktuacji w układach złożonych.** W kolejnych kolumnach umieszczono wykresy charakteryzujące fluktuacje w czterech różnych układach złożonych, zgodnie z opisem umieszczonym w tekście. Wykresy A1-A4 ilustrują prawo Taylora w badanych układach. Na pozostałych wykresach pokazano wyniki testów na danych rzeczywistych (wykresy C1-C4 dot. testu nr 1, zaś wykresy B1-B4 testu nr 2), których celem było sprawdzenie, czy zaproponowana w pracy [4] teoria poprawnie opisuje pochodzenie praw Taylora.

który opisuje liczbę takich podziałów, w których liczba podzbiorów jest równa k. Współczynniki f_n określają liczbę tzw. stanów wewnętrznych, które charakteryzują podzbiór n-elementowy. Z tego powodu, mogą być one interpretowane jako pewnego rodzaju preferencje na takie podziały, w których występują podzbiory o określonej liczbie elementów. W szczególności, jeśli $f_1 = f_2 = \ldots = f_N$, wówczas nie ma żadnej preferencji na rozmiary podzbiorów. W takim przypadku rozkład $P(N, \mu)$ (14) jest rozkładem Poissona. Gdy jednak wartość jednego ze współczynników, np. f_m, znacząco przewyższa wartości pozostałych, wtedy podziały, w których występują podzbiory o rozmiarze m, są o wiele bardziej prawdopodobne. Dla przykładu, w odniesieniu do populacji N ptaków, funkcja $g(N)$ określona wzorem (15) mówi o tym, ile jest możliwych (i z uwagi na specyfikę badanego gatunku racjonalnych/korzystnych) podziałów tej populacji na mniejsze n-elementowe podpopulacje.

W omawianej pracy [4], wzory na energię swobodną, $F(\mu)$, charakteryzującą układy, które spełniają prawo Taylora, uzyskano całkując relacje fluktuacyjno-dysypacyjne, $\langle N^2\rangle - \langle N\rangle^2 =$



Rys. 5: **Prawo Taylora w rzeczywistych układach złożonych:** weryfikacja równania (19). Symbole umieszczone na wykresie reprezentują dane rzeczywiste odpowiadające różnym układom złożonym.

$-\partial\langle N\rangle/\partial\mu$, badanego zespołu, przy założeniu prawdziwości równania (13). Dzięki temu otrzymano wyrażenia opisujące, w jaki sposób energia swobodna, $F(\mu)$, oraz średnia wartość zmiennej N, tj. $\langle N\rangle$, zależą od parametru μ, który pełni rolę podobną do tej, jaką w rozkładzie kanonicznym pełni parametr $\beta = (k_B T)^{-1}$.

Uzyskane wzory umożliwiły sformułowanie trzech ilościowych testów, których celem było pokazanie, że zaproponowany formalizm faktycznie może być wykorzystany do analizy rzeczywistych układów złożonych wykazujących potęgowe skalowanie się fluktuacji. Pierwszy test polegał na bezpośrednim porównaniu rozkładów prawdopodobieństw charakteryzujących dane rzeczywiste z rozkładami teoretycznymi (14). W drugim teście zbadano, czy iloraz rozkładów opisujących ten sam układ rzeczywisty scharakteryzowany dwiema różnymi wartościami średnimi, $\langle N_1\rangle$ oraz $\langle N_2\rangle$, spełnia poniższą zależność:

$$\frac{P(N;\mu_1)}{P(N;\mu_2)} \propto e^{(\mu_2-\mu_1)N}. \tag{18}$$

W końcu, trzeci test miał na celu sprawdzenie, czy uzyskana w teście nr 2 różnica $\mu_2 - \mu_1$ przekłada się na określoną dla zadanego zespołu, funkcyjną zależność między wartościami średnimi zmiennej N:

$$\mu_2 - \mu_1 = \frac{\langle N_2\rangle^{1-b} - \langle N_1\rangle^{1-b}}{a(1-b)} = h\left(\langle N_1\rangle, \langle N_2\rangle\right). \tag{19}$$

Na rys. 4 pokazano wyniki zastosowania dwóch pierwszych testów do danych rzeczywistych nt.: 1) miejsca występowania i wielkości populacji jednego z najpopularniejszych w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej gatunku ptaków zwanego modrosójką błękitną (ang. *blue jay*), 2) charakteru rozmieszczenia i wielkości populacji szkodnika roślin zwanego omacnicą prosowianką (ang. *European corn borer*), 3) notowań akcji na Nowojorskiej Giełdzie Papierów Wartościowych (NYSE), oraz 4) intensywności ruchu ulicznego w stanie Minnesota. Wyniki testu nr 3 pokazano na rys. 5. Wykonane testy ilustrują bardzo dobrą zgodność danych rzeczywistych z przewidywaniami teoretycznymi.

[6] **A. Fronczak, *Microscopic meaning of grand potential resulting from combinatorial approach to a general system of particles*, Phys. Rev. E 86, 041139 (2012).**

W pracy [6] zbadano otwarty układ klasycznych cząstek oddziałujących między sobą siłami krótkozasięgowymi. Dzięki założeniu o krótkozasięgowym charakterze oddziaływań, badany układ można traktować jako zbiór nieoddziałujących klasterów, tzw. idealny gaz klasterów (ang. *perfect gas of clusters*) [39], w którym oddziaływania między cząsteczkami należącymi do różnych klasterów można zaniedbać.

Opisując termodynamiczne własności takiego układu posłużyliśmy się formalizmem wielkiego zespołu kanonicznego, w którym stan układu charakteryzuje się podając jego temperaturę, T, i potencjał chemiczny pojedynczej cząsteczki, μ. Korzystając ze wspomnianej już w tym opisie tzw. formuły wykładniczej (zob. str. 8), pokazaliśmy, że w granicy termodynamicznej, wielka suma statystyczna badanego układu,

$$\Xi(\beta, z) = 1 + \sum_{N=1}^{\infty} z^N \sum_{k=1}^{N} \int_0^{\infty} f(k, E) g(E, N) e^{-\beta E} dE, \tag{20}$$

gdzie $\beta = (k_B T)^{-1}$, $z = e^{\beta\mu}$, zaś $f(k, E)$ jest prawdopodobieństwem [13], że układ N cząstek o energii E składa się z k nieoddziałujących klasterów, może być zapisana w postaci:

$$\Xi(\beta, z) = e^{-\beta\Phi(\beta,z)} = 1 + \sum_{N=1}^{\infty} \frac{z^N}{N!} \sum_{k=1}^{N} B_{N,k}(\{-\beta\phi_n(\beta)\}), \tag{21}$$

gdzie $\Phi(\beta, z)$ jest wielkim potencjałem termodynamicznym, $\phi_n(\beta)$ są współczynnikami w rozwinięciu $\Phi(\beta, z)$ w szereg Maclaurina względem zmiennej z, zaś $B_{N,k}(\{\phi_n\})$ reprezentują omówione wcześniej tzw. niekompletne wielomiany Bella (zob. str. 15).

Porównując wyrażenia (20) oraz (21) otrzymaliśmy wzór:

$$\int_0^{\infty} f(k, E) g(E, N) e^{-\beta E} dE = \frac{1}{N!} B_{N,k}(\{-\beta\phi_n(\beta)\}). \tag{22}$$

Lewa strona powyższego wzoru wyraża prawdopodobieństwo, że w temperaturze $T = (k_B\beta)^{-1}$, badany układ N cząstek będzie się składał z k klasterów. Prawa strona tego wyrażenia mówi natomiast, że prawdopodobieństwo to jest równe liczbie podziałów N cząstek na k niepustych podzbiorów (tj. nieoddziałujących klasterów), przy czym prawdopodobieństwo n-klastera [14] jest proporcjonalne do pochodnej cząstkowej wielkiego potencjału termodynamicznego $\phi_n(\beta)$.

Wyrażenie (22) umożliwiło, nieznaną dotychczas, mikroskopową interpretację wielkiego potencjału termodynamicznego, jako wykładniczej funkcji generującej dla prawdopodobieństw termodynamicznych nieoddziałujących klasterów w ogólnym układzie oddziałujących cząstek.

13 Z definicji $f(k, E) \geqslant 0$ wynika, że $\sum_{k=1}^{N} f(k, E) = h(E) \equiv 1$.
14 tj. klastera o rozmiarze n;

[7] **A. Fronczak, *Cluster properties of the one-dimensional lattice gas: The microscopic meaning of the grand potential*, Phys. Rev. E 87, 022131 (2013).**

Celem pracy [7] było pokazanie, w jaki sposób kombinatoryczny formalizm omówiony we wcześniejszej pracy [6] można wykorzystać do analizy konkretnych modeli fizyki statystycznej. Przy realizacji tego zadania posłużono się modelem jednowymiarowego gazu sieciowego z oddziaływaniami między najbliższymi sąsiadami. Analiza tego dobrze znanego modelu fizyki statystycznej okazała się interesującym problemem badawczym. O ile bowiem jednowymiarowy gaz sieciowy uchodzi za układ ściśle rozwiązany w sensie znajomości sumy statystycznej, to niektóre z jego własności, jak na przykład zależny od temperatury rozkład wielkości klasterów zostały zbadane stosunkowo niedawno (zob. ref. [15-18] w [7]). W pracy [7] wyprowadzono szereg zależności opisujących własności klasterów w jednowymiarowym gazie sieciowym. Uzyskane wyniki zostały porównane z wynikami symulacji numerycznych, potwierdzając poprawność opisu teoretycznego.

Oprócz zbadania własności klasterów jednowymiarowego gazu sieciowego, celem pracy [7] było również sprawdzenie, czy zaproponowany w pracy [6] kombinatoryczny formalizm można wykorzystać do opisu własności układów z przemianami fazowymi. W pracy [7] pokazano, że zaproponowane podejście dobrze opisuje nieanalityczność wielkiego potencjału termodynamicznego, $\Phi(\beta, z)$, dla $T = 0K$. Pokazano również, że wspomniana nieanalityczność wynika z nietrywialnych własności klasterów badanego gazu.

[9] **A. Fronczak, P. Fronczak, *Exact expression for the number of energy states in lattice models*, Rep. Math. Phys. 73(1), 1 (2014).**

W pracy [9] wyprowadzono ścisłe wyrażenie opisujące liczbę stanów o energii [15] E (ang. *number of energy states*), tj. $g(E)$, dla dowolnych modeli sieciowych rozważanych w fizyce statystycznej.

Wyrażenie, o którym mowa, otrzymano rozwijając sumę statystyczną w rozkładzie kanonicznym, w niskotemperaturowy szereg potęgowy [40]:

$$Z(x) = \sum_{N=0}^{\infty} g(\varepsilon N) x^N, \tag{23}$$

dla $x = e^{-\beta\varepsilon}$, gdzie ε jest najmniejszą porcją energii rozważanego modelu, która definiuje jego dyskretne poziomy energetyczne: $E = \varepsilon N$, dla $N = 0, 1, \ldots$. Wykorzystując, znaną z kombinatoryki przeliczeniowej, formułę wykładniczą pokazano, że

$$g(\varepsilon N) = \frac{e^{a_0}}{N!} Y_N(\{a_n\}), \tag{24}$$

gdzie Y_N jest kompletnym wielomianem Bella (zob. str. 15) o parametrach $\{a_n\}$ będących współczynnikami w rozwinięciu logarytmu sumy statystycznej w szereg potęgowy względem zmiennej x, tj.

$$A(x) = \ln Z(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \frac{x^n}{n!}. \tag{25}$$

15 W przypadku, gdy energia ma charakter ciągły, zamiast mówić o liczbie stanów o zadanej energii, mówi się o funkcji gęstości stanów.

Pokazano, że kombinatoryczna formuła (24) opisująca liczbę mikroskopowych stanów/realizacji układu o energii $E = \varepsilon N$ umożliwia sformułowanie ciekawych wniosków dot. przestrzeni stanów badanych modeli sieciowych. W szczególności, jeśli wszystkie współczynniki a_n są większe od zera, wtedy okazuje się, że można je interpretować jako termodynamiczne prawdopodobieństwa oddzielnych porcji energii: $E = n\varepsilon$. W modelach sieciowych takie porcje energii przekładają się zazwyczaj na pewne dobrze określone własności badanych układów (np. w jednowymiarowym gazie sieciowym, w którym energia oddziaływania między sąsiadującymi cząsteczkami jest równa ε, energia $E = n\varepsilon$ charakteryzuje klaster składający się z $n+1$ cząsteczek).

W tym duchu, w pracy [9] przedyskutowano podstawowe dyskretne rozkłady prawdopodobieństw, m.in. rozkład Poissona, geometryczny i ujemny dwumianowy, wskazując na te cechy przestrzeni stanów modeli sieciowych, które mogą prowadzić do pojawienia się takich rozkładów. W pracy tej omówiono również własności jednowymiarowego modelu Isinga, otwierając tym samym drogę do analizy przypadku dwuwymiarowego. W chwili obecnej praca [41], w której wzór (24) został wykorzystany do wyznaczenia funkcji $g(E)$ dla modelu Isinga zdefiniowanego na siatce kwadratowej, jest w trakcie spisywania przed wysłaniem jej do recenzji. Opisane w tej nowej pracy wyniki potwierdzają numeryczne wyniki uzyskane we wcześniejszych pracach innych autorów [42–45].

E.3 Podsumowanie

Do najważniejszych osiągnięć opisanych w cyklu publikacji [1–9], które stanowią podstawę wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego można zaliczyć:

1. Sformułowanie relacji fluktuacyjno-dysypacyjnych dla wybranych równowagowych zespołów sieci przypadkowych [2] i wykorzystanie tych relacji w badaniach sieci rzeczywistych, czego wynikiem było sformułowanie prostego twierdzenia typu fluktuacje-odpowiedź dla sieci handlu światowego [5],

2. Sformułowanie hamiltonianów sieciowych i omówienie podstawowych własności wykładniczych grafów przypadkowych o strukturze sieci blokowych [8],

3. Wyjaśnienie przyczyn i teoretyczny opis zjawiska potęgowego skalowania się fluktuacji w układach złożonych [4],

4. Wykorzystanie znanej w kombinatoryce wyliczeniowej tzw. formuły wykładniczej do rozwiązania wybranych problemów fizyki statystycznej stanów równowagi, w tym do interpretacji mikroskopowego znaczenia wielkiego potencjału termodynamicznego w ogólnym układzie oddziałujących cząstek [6, 7] oraz do wyprowadzenia ścisłego wyrażenia opisującego liczbę stanów o zadanej energii w modelach sieciowych [9].

Wyniki omówionych prac, wskazują na to, że interdyscyplinarne zastosowania fizyki do modelowania i predykcji układów złożonych są interesującymi kierunkami przyszłych badań. Pogląd ten jest tym bardziej uzasadniony, że po kilku dekadach elementarnych analiz i modeli (ang. *toy models*), fizyka układów złożonych zaczęła wreszcie wychodzić poza fazę prostego modelowania i symulacji numerycznych. Nowo uzyskane, ilościowe, a nie tylko jakościowe, wyniki zdają się przekonywać naukowców z innych dziedzin, w których fizyka statystyczna znalazła zastosowanie, że warto poszukiwać rozwiązań fundamentalnych problemów w tychże dziedzinach we współpracy z fizykami. Dowodem na to są odbywające się corocznie od 10 lat konferencje poświęcone układom złożonym *European Conferences on Complex Systems (ECCS)* oraz liczne programy badawcze Komisji Europejskiej dedykowane interdyscyplinarnym badaniom układów złożonych.

Wreszcie, próby wyjścia fizyki poza sztywne ramy układów tradycyjnie traktowanych jako fizyczne, wbrew pozorom może ułatwić znalezienie rozwiązań dla tradycyjnych problemów fizyki. Doskonałym przykładem jest tutaj praca habilitantki nt. praw Taylora [4], w której pokazano, że potęgowe skalowanie się fluktuacji może wynikać z nietrywialnych własności przestrzeni stanów badanych układów złożonych. Metody kombinatoryki matematycznej, które zastosowano we wspomnianej pracy zostały później wykorzystane/zaadoptowane do rozwiązania dobrze znanych problemów klasycznej fizyki statystycznej [6, 7, 9].

F OMÓWIENIE POZOSTAŁYCH OSIĄGNIĘĆ NAUKOWO-BADAWCZYCH

F.1 Przed uzyskaniem stopnia doktora

W czasie studiów doktoranckich na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej (1999-2003) pozostawałam pod naukową opieką prof. dr hab. Janusza Hołysta. W tym czasie zajmowałam się dwoma różnymi zagadnieniami badawczymi.

Na początku studiów, w okresie od października 1999 r. do końca 2001 r., badałam zjawiska perkolacji w układach o strukturze sieci regularnych. W tym czasie powstała praca nt. losowej perkolacji skierowanej [46], której wyniki zostały wykorzystane do badania zjawiska kolektywnych bankructw w sieciach bankowych [47].

W okresie od listopada 2001 r. do lutego 2002 r. przebywałam na stypendium DAAD w Kolonii (Niemcy), w grupie badawczej prof. Dietricha Stauffera, autora znanego podręcznika nt. perkolacji [48] i wielkiego propagatora interdyscyplinarnych zastosowań fizyki statystycznej i badań układów złożonych. Prof. Stauffer zainteresował mnie tematyką sieci złożonych, która od tego czasu, tj. od listopada 2001 r., stała się moją podstawową tematyką badawczą. W czasie mojego pobytu w Niemczech powstały dwie prace nt. modelu Isinga w ewoluujących sieciach bezskalowych Barabasiego-Albert [49, 50]. Po powrocie ze stypendium kontynuowałam badania sieci ewoluujących uzupełniając te badania rozważaniami nt. klasycznych grafów przypadkowych i grafów przypadkowych o zadanej sekwencji stopni węzłów. W tym czasie powstały prace, które stanowiły podstawę mojej rozprawy doktorskiej [51–55]. Najważniejszą z tych prac była praca [54], w której wyprowadziłam wyrażenie na średnią drogę w sieciach przypadkowych o zadanym rozkładzie stopni węzłów. Przed opublikowaniem tej pracy znane były jedynie relacje skalowania opisujące, w jaki sposób średnia droga zależy od rozmiaru sieci. Formalizm matematyczny, którego podstawy opisano w tej pracy, posłużył później do zbadania perkolacyjnej przemiany fazowej w sieciach przypadkowych [55].

F.2 Po uzyskaniu stopnia doktora

Po obronie doktoratu, zostałam zatrudniona na stanowisku adiunkta na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej. W okresie od września 2004 do sierpnia 2008, byłam związana z Pracownią Dynamiki Nieliniowej Układów Złożonych kierowaną przez prof. J. Hołysta.

W chwili obecnej, od września 2008, jestem pracownikiem w Zakładzie Fizyki Układów Złożonych Wydziału Fizyki PW.

Po ukończeniu studiów dokoranckich kontynuowałam badania sieci złożonych. O ile jednak przedmiotem badań w mojej rozprawie doktorskiej były przede wszystkim sieci ewoluujące (większość prac z okresu przed obroną doktoratu dotyczy modelu bezskalowej sieci Barabásiego-Albert), o tyle po doktoracie moje badania koncentrowały się przede wszystkim na sieciach równowagowych (ze szczególnym uwzględnieniem formalizmu wykładniczych grafów przypadkowych). W tym czasie byłam współautorką wielu prac nt. krytycznych własności takich sieci oraz wpływu podstawowych charakterystyk strukturalnych na różne procesy dynamiczne zachodzące w tych układach. I tak, w pracy [56] rozważaliśmy zjawisko samoorganizującej się krytyczności w sieciach złożonych. W pracach [57, 58] badaliśmy wpływ struktury sieci na krytyczne własności modelu Kauffamana. W pracy [59] rozważaliśmy proces błądzenia przypadkowego w sieciach przypadkowych.

W tym okresie powstało również kilka prac, o których nie można powiedzieć, że były częścią jakiegoś większego projektu, czy cyklu tematycznego. Pomysły tych prac powstawały zwykle podczas dyskusji, spotkań lub seminariów naukowych. Przykładem takiej pracy jest np. praca poświęcona wyjaśnieniu przyczyn niedebyeowskiej relaksacji w zjawisku przekazu ciepła [60], której pomysł narodził się po seminarium prof. R. Kutnera na ten temat. Innym przykładem jest praca [61], w której przeanalizowano dane bibliometryczne nt. dynamiki produktywności naukowej naukowców z różnych dziedzin, której pomysł powstał po spotkaniu grup roboczych w ramach projektu EU CREEN, i której celem było sprawdzenie, czy i w jakim stopniu zjawisko *publikuj albo giń* (ang. *publish or perish*), dotyka społeczność naukową, jakie są możliwości ilościowego opisu tego zjawiska. Wchodząca do cyklu publikacji, stanowiącego osiągnięcie naukowe habilitantki, praca [4] nt. potęgowego skalowania się fluktuacji, również powstała w sposób dość przypadkowy. Pomysł tej pracy narodził się po przeczytaniu pracy przeglądowej [22] nt. praw Taylora. Praca ta stała się jednak kopalnią wielu wartościowych pomysłów badawczych, których realizacja została już rozpoczęta (zob. [6, 7, 9]) i zapewne potrwa jeszcze wiele lat.

BIBLIOGRAFIA

[1] A. Fronczak, P. Fronczak, *Networks with given two point correlations: Hidden correlations from degree correlations*, Phys. Rev. E **74**, 026121 (2006).

[2] A. Fronczak, P. Fronczak, J.A. Hołyst, *Fluctuation-dissipation relations in complex networks*, Phys. Rev. E **73**, 016108 (2006).

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

[4] A. Fronczak, P. Fronczak, *Origins of Taylor's power law for fluctuation scaling in complex systems*, Phys. Rev. E **81**, 066112 (2010).

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

[6] A. Fronczak, *Microscopic meaning of grand potential resulting from combinatorial approach to a general system of particles*, Phys. Rev. E **86**, 041139 (2012).

[7] A. Fronczak, *Cluster properties of the one-dimensional lattice gas: The microscopic meaning of the grand potential*, Phys. Rev. E **87**, 022131 (2013).

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

[9] A. Fronczak, P. Fronczak, *Exact expression for the number of energy states in lattice models*, Rep. Math. Phys. **73**(1), pp. 1-9 (2014).

[10] M.E.J. Newman, *Networks. An Introduction*, Oxford University Press, 2010.

[11] A. Fronczak, P. Fronczak, *Świat Sieci Złożonych. Od Fizyki do Internetu*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2009.

[12] S.N. Dorogovtsev, J.F.F. Mendes, *Evolution of Networks. From Biological Nets to the Internet and WWW*, Oxford University Press, 2003.

[13] A.-L. Barabási, R. Albert, *Emergence of scaling in random networks*, Science **286**, 509 (1999).

[14] A. Fronczak, *Exponential random graphs*, rozdział w *Encycloipedia of Social Network Analysis and Mining*, R. Alhajj, J. Rokne (Eds.), Springer-Verlag, 2014 [16].

[15] E.T. Jaynes, *Information theory and statistical mechanics*, Phys. Rev. **106**, 620 (1957).

[16] E.T. Jaynes, *Information theory and statistical mechanics. II*, Phys. Rev. **108**, 171 (1957).

[17] D. Strauss, *On a general class of models for interaction*, SIAM Rev **28**, 513 (1986).

16 arXiv:1210.7828

[18] J. Park, M.E.J. Newman, *Solution for the properties of a clustered network*, Phys. Rev. E **72**, 026136 (2005).

[19] S. Frotunato, *Community detection in graphs*, Phys. Rep. **486**, 75 (2010).

[20] M.E.J. Newman, *Communities, modules and large-scale structure in networks*, Nature Phys. **8**, 25 (2012).

[21] J.H. Bergstrand, *The gravity equation in international trade: some microeconomic foundations and empirical evidence*, Rev. Econ. Stat. **67**(3), 474 (1985).

[22] Z. Eisler, I. Bartos, J. Kertesz, *Fluctuation scaling in complex systems: Taylor's law and beyond*, Ad. Phys. **57**, 89 (2008).

[23] L.R. Taylor, *Aggregation, variance and the mean*, Nature **189**, 732 (1961).

[24] J.E. Mayer, *The statistical mechanics of condensing systems. I*, J. Chem. Phys. **5**, 67 (1937).

[25] J.E. Mayer, P.G. Ackermann, *The statistical mechanics of condensing systems. II*, J. Chem. Phys. **5**, 74 (1937).

[26] M. Born, M. Fuchs, *The Statistical Mechanics of Condensing Systems*, Proc. Roy. Soc. Lond. Math. Phys. Sci. **166**(926), 391 (1938).

[27] J.E. Mayer, M. Goeppaert-Mayer, *Statistical Mechanics*, John Wiley & Sons Inc (1940).

[28] R.P. Stanley, *Enumerative Combinatorics*, vol. 1 Cambridge University Press (1997).

[29] R.J. Riddell, G.E. Uhlenbeck, *On the theory of the virial development of the equation of state of monoatomic gases*, J. Chem. Phys. **21**, 2056 (1953).

[30] R.J. Riddell, *Contributions to the theory of condensation*, PhD Dissertation, University of Michigan (1951).

[31] H.S. Wilf, *Generatingfunctionology*, Academic Press (1990).

[32] M. Boguñá, R. Pastor-Satorras, *Class of correlated random networks with hidden variables*, Phys. Rev. E **68**, 036112 (2003).

[33] J. Park, M.E.J. Newman, *Statistical mechanics of complex networks*, Phys. Rev. E **70**, 066117 (2004).

[34] P.W. Holland, K.B. Laskey, S. Leinhardt, *Stochastic blockmodels: first steps*, Soc. Networks **5**, 109 (1983).

[35] B. Karrer, M.E.J. Newman, *Stochastic blockmodels and community structure in networks*, Phys. Rev. E **83**, 016107 (2011).

[36] C. Song, S. Havlin, H.A. Makse, *Self-similarity of complex networks*, Nature **433**, 392 (2005).

[37] C. Song, S. Havlin, H.A. Makse, *Origins of fractality in the growth of complex networks*, Nature Phys. **2**, 275 (2006).

[38] P. Attard, *The second entropy: a general theory for non-equilibrium thermodynamics and statistical mechanics*, Annu. Rep. Prog. Chem., Sect. C: Phys. Chem. **105**, 63 (2009).

[39] N. Sator, *Clusters in simple fuids*, Phys. Rep. **376**, 1 (2003).

[40] C. Domb, M.S. Green, *Phase Transitions and Critical Phenomena. Series Expansions for Lattice Models*, 1st ed., Academic Press, New York (1974).

[41] G. Siudem, A. Fronczak, *Exact expresion for the number of energy states in the two-dimensional Ising model* (2014).

[42] P.D. Beale, *Exact distribution of energies in the two-dimensional Ising model*, Phys. Rev. Lett. **76**, 78 (1996).

[43] F. Wang, D.P. Landau, *Efficient multiple-range random walk algorithm to calculate the density of states*, Phys. Rev. Lett. **86**, 2050 (2001).

[44] C. Micheletti, A. Laio, M. Parrinello, *Reconstructing the density of states by history-dependent metadynamics*, Phys. Rev. Lett. **92**, 170601 (2004).

[45] M. Habeck, *Bayesian reconstruction of the density of states*, Phys. Rev. Lett. **98**, 200601 (2007).

[46] A. Aleksiejuk [17], J.A. Hołyst, *A simple model of bank bankruptcies*, Physica A **299**, 198 (2001).

[47] A. Aleksiejuk, J.A. Hołyst, G. Kossinets, *Self-organized criticality in a model of collective bank bankruptcies*, Int. J. Mod. Phys. C **13**, 333 (2002).

[48] D. Stauffer, A. Aharony, *Introduction to Percolation Theory* (2nd Ed.), Taylor & Francis (2003).

[49] A. Aleksiejuk, J.A. Hołyst, D. Stauffer, *Ferromagnetic phase transition in Barabási-Albert networks*, Physica A **310**, 260 (2002).

[50] A. Aleksiejuk, *Microscopic model for the logarithmic size effect on the Curie point in Barabási-Albert networks*, Int. J. Mod. Phys. C **13**, 1415 (2002).

[51] A. Fronczak, J.A. Hołyst, M. Jedynak, J. Sienkiewicz, *Higher order clustering coefficients in Barabási-Albert networks*, Physica A **316**, 688 (2002).

[52] A. Fronczak, P. Fronczak, J.A. Hołyst, *Mean-field theory for clustering coefficients in Barabási-Albert networks*, Phys. Rev. E **68**, 046126 (2003).

[53] J.A. Hołyst, A. Fronczak, P. Fronczak, *Supremacy distribution in evolving networks*, Phys. Rev. E **70**, 046119 (2004).

[54] A. Fronczak, P. Fronczak, J.A. Hołyst, *Average path length in random networks*, Phys. Rev. E 70, 056110 (2004).

17 *Aleksiejuk* to moje nazwisko rodowe. W roku 2002 wyszłam za mąż i przyjęłam nazwisko męża - *Fronczak*.

[55] 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 Infernet and WWW (Aveiro, Potrugal, 29 August - 2 September 2004), J.F.F. Mendes et al. (Eds.), AIP Conf. Proc. **776**, 52 (2005).

[56] P. Fronczak, A. Fronczak, J. A. Hołyst, *Self-organized criticality and coevolution of network structure and dynamics*, Phys. Rev. E **73**, 046117 (2006).

[57] P. Fronczak, A. Fronczak, J. A. Hołyst, *Kauffman Boolean model in undirected scale-free networks*, Phys. Rev. E **77**, 036119 (2008).

[58] P. Fronczak, A. Fronczak, *Critical line in undirected Kauffman Boolean networks - The role of percolation*, J. Phys. A Math. Theor. **41**, 224009 (2008).

[59] A. Fronczak, P. Fronczak, *Biased random walks in complex networks: The role of local navigation rules*, Phys. Rev. E 80, 016107 (2009).

[60] A. Fronczak, P. Fronczak, J.A. Hołyst, *Microscopic explanation of non-Debye relaxation for heat transfer*, Physica A **375**, 571 (2007).

[61] 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).

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 sie w bazie Journal Citation Reports (JCR)

a-9 A. Fronczak, P. Fronczak, *Exact expression for the number of states in lattice models*, Reports on Mathematical Physics, vol. **73**(1), pp. 1-9 (2014). $\mathrm{IF}_{2012} = 0,756$ [18]

Wkład habilitantki: Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaplanowaniu i wykonaniu obliczeń analitycznych zamieszczonych w rozdziale 2 "Derivation of the main result". Wykonałam również część obliczeń analitycznych umieszczonych w rozdziale 3 "Examples" (podrozdziały 3.1 "Poisson dystribution", 3.2 "Negative binomial distribution"). Przygotowałam całość manuskryptu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 80%.

a-8 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). $\mathrm{IF}_{2012} = 2,313$

Wkład habilitantki: Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wykonaniu części obliczeń analitycznych, głównie tych dot. modelu blokowego z korekcją na stopnie węzłów. Uczestniczyłam w dyskusji wszystkich wyników. Brałam udział w redagowaniu tekstu manuskryptu, szczególnie w przygotowaniu rozdziału 3-ego "Degree-corrrected blockmodel". Byłam kierownikiem projektu, z którego finansowana była ta praca [19]*. Mój udział procentowy szacuję na* 40%.

a-7 A. Fronczak, *Cluster properties of the one-dimensional lattice gas: The microscopic meaning of the grand potential*, Physical Review E, vol. **87**(2), art. no. 022131 (2013). $\mathrm{IF}_{2012} = 2,313$

Wkład habilitantki: Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaplanowaniu badań i wykonaniu wszystkich obliczeń analitycznych. Ponadto, samodzielnie przygotowałam i zredagowałam manuskrypt publikacji. Mój udział procentowy wynosi 100%.

a-6 A. Fronczak, *Microscopic meaning of grand potential resulting from combinatorial approach to a general system of particles*, Physical Review E, vol. **86**(4), art. no. 041139 (2012). $\mathrm{IF}_{2012} = 2,313$

Wkład habilitantki: Byłam pomysłodawcą wykorzystania formuły wykładniczej do zbadania podstawowych zagadnień fizyki statystycznej stanów równowagi. Zaplanowałam i wykonałam wszystkie obliczenia analityczne opisane w pracy. Ponadto, samodzielnie przygotowałam i zredagowałam manuskrypt publikacji. Mój udział procentowy wynosi 100%.

a-5 A. Fronczak, P. Fronczak, *Statistical mechanics of the international trade network*, Physical Review E, vol. **85**(5), art. no. 056113 (2012). $\mathrm{IF}_{2012} = 2,313$

Wkład habilitantki: Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu założeń modelu światowej sieci handlu oraz wykonaniu obliczeń analitycznych do tego modelu. Brałam również udział w dyskusjach poświęconych analizie danych rzeczywistych i projektowaniu eksperymentów numerycznych. Przygotowałam całość manuskryptu publikacji. Mój udział szacuję na 70%.

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

19 Tytuł projektu: *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 FNP.

a-4 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 habilitantki: Byłam pomysłodawcą badań nad zjawiskiem potęgowego skalowania się fluktuacji w układach złożonych. Zaproponowałam teoretyczny opis tego zjawiska w oparciu o zasadę maksymalnej entropii i koncepcję funkcji gęstości stanów. Wykonałam wszystkie obliczenia analityczne opisane w pracy. Brałam również udział w dyskusjach dotyczących analizy danych rzeczywistych. Zredagowałam większą część manuskryptu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 70%.

a-3 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 habilitantki: Brałam udział w opracowaniu założeń modelu wykładniczych grafów przypadkowych, który został omówiony w tej pracy. Wykonałam część analiz teoretycznych. Uczestniczyłam w przygotowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 40%.

a-2 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 habilitantki: Zaplanowałam i wykonałam wszystkie obliczenia analityczne opisane w tej pracy. W szczególności, opracowałam wzory na odwrotne transformaty Poissona (ciągłe i dyskretne), które zostały wykorzystane do wyznaczenia rozkładów prawdopodobieństw charakteryzujących przestrzeń zmiennych ukrytych w badanych sieciach. Przygotowałam całość manuskryptu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 80%.

a-1 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 habilitantki: Zaproponowałam model wykładniczych grafów przypadkowych, jako odpowiedni model sieci równowagowych do badania relacji fluktuacyjno-dysypacyjnych. Wykonałam obliczenia analityczne opisane w rozdz. III "Fluctuations and responses". Przygotowałam całość manuskryptu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 60%.

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 sie w bazie Journal Citation Reports (JCR)

Po uzyskaniu stopnia doktora

b-10 A. Fronczak, P. Fronczak, *Biased random walks in complex networks: The role of local navigation rules*, Physical Review E, vol. **80**(1), art. no. 016107 (2009). IF $= 2,400$

Wkład habilitantki: Wspólnie z dr P. Fronczakiem byłam pomysłodawcą pracy. Uczestniczyłam w wykonywaniu obliczeń analitycznych i w dyskusji symulacji numerycznych. Brałam również udział w przygotowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 50%.

b-9 P. Fronczak, A. Fronczak, *Critical line in undirected Kauffman Boolean networks - The role of percolation*, Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical, vol. **41**(22), art. no. 224009 (2008). IF $= 1,540$

Wkład habilitantki: Brałam udział w przygotowaniu części rozwiązań analitycznych modelu i ich dyskusji. Mój udział procentowy szacuję na 20%.

b-8 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 habilitantki: Brałam udział w dyskusji rozwiązań analitycznych modelu. Mój udział procentowy szacuję na 10%.

b-7 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 habilitantki: Byłam pomysłodawcą pracy. Wykonałam większość obliczeń analitycznych opisanych w publikacji. Brałam udział w dyskusji wyników analitycznych i wyników symulacji numerycznych. Przygotowałam całość manuskryptu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 50%.

b-6 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 habilitantki: Byłam pomysłodawcą wykorzystania zasady maksymalnej entropii do badania produktywności naukowej. Brałam udział w dyskusjach poświęconych analizie danych rzeczywistych. Mój udział procentowy szacuję na 25%.

b-5 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 habilitantki: Byłam pomysłodawcą i głównym autorem obliczeń analitycznych opisanych w publikacji. Przygotowałam całość manuskryptu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 60%.

b-4 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 habilitantki: Brałam udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy szacuję na 10%.

b-3 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 habilitantki: Brałam udział w dyskusji rozwiązań analitycznych modelu SOC na sieciach złożonych. Mój udział procentowy szacuję na 10%.

b-2 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 habilitantki: Brałam udział w dyskusji danych rzeczywistych i rozwiązań analitycznych modelu. Mój udział procentowy szacuję na 10%.

b-1 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 habilitantki: Brałam udział w dyskusji danych rzeczywistych i rozwiązań analitycznych modelu. Mój udział procentowy szacuję na 10%.

Przed uzyskaniem stopnia doktora

c-9 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 habilitantki: Byłam pomysłodawcą pracy. Wspólnie z dr P. Fronczakiem (wtedy mgr) wyprowadziliśmy i udowodniliśmy (w formie matematycznego twierdzenia) wyrażenie opisujące prawdopodobieństwo dużej liczby zdarzeń niezależnych. Wykonałam większość obliczeń analitycznych opisanych w pracy. Uczestniczyłam w dyskusji symulacji numerycznych potwierdzających wyniki analityczne. Przygotowałam całość manuskryptu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 60%.

c-8 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 habilitantki: Byłam autorką teoretycznych obliczeń dla rozkładów supremacji z wykorzystaniem metody opartej na równaniu "rate". Wyniki uzyskane dzięki tej metodzie zostały opisane w rozdziale 4. i 5. Uczestniczyłam w przygotowaniu manuskryptu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 30%.

c-7 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 habilitantki: Byłam pomysłodawcą wykorzystania metody opartej na równaniu "rate" do wyznaczenia współczynników gronowania w sieciach BA. Samodzielnie wykonałam wszystkie obliczenia analityczne opisane w pracy. Uczestniczyłam w dyskusji symulacji numerycznych. Przygotowałam całość manuskryptu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 80%.

c-6 A. Fronczak, J.A. Hołyst, M. Jedynak, J. Sienkiewicz, *Higher order clustering coefficients in Barabási-Albert networks*, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, vol. **316**, pp. 688-694 (2002). IF = 1,369

Wkład habilitantki: Byłam pomysłodawcą pracy. Zaproponowałam współczynniki gronowania wyższych rzędów jako rozszerzenie definicji standardowych współczynników gornowania. Zaproponowałam zbadanie tych współczynników w sieciach BA. Uczestniczyłam w dyskusji wyników symulacji numerycznych. Przygotowałam całość manuskryptu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 75%.

c-5 A. Aleksiejuk [20], *Microscopic model for the logarithmic size effect on the Curie point in Barabási-Albert networks*, International Journal of Modern Physics C, vol. **13**(10), pp. 1415-1418 (2002). IF = 0,784

Wkład habilitantki: Jestem jedyną autorką tej pracy. Mój udział procentowy wynosił 100%.

20 zob. przypis na str. 25;

c-4 A. Aleksiejuk, J.A. Hołyst, G. Kossinets, *Self-organized criticality in a model of collective bank bankruptcies*, International Journal of Modern Physics C, vol. **13**(3), pp. 333-341 (2002). IF $= 0,784$

Wkład habilitantki: Byłam pomysłodawcą pracy. Samodzielnie wykonałam wszystkie symulacje numeryczne. Uczestniczyłam w dyskusji wyników. Przygotowałam całość manuskryptu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 85%.

c-3 A. Aleksiejuk, J.A. Hołyst, D. Stauffer, *Ferromagnetic phase transition in Barabási-Albert networks*, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, vol. **310**, pp. 260-266 (2002). IF $= 1,369$

Wkład habilitantki: Byłam autorką programu komputerowego przy pomocy którego uzyskano wyniki numeryczne opisane w pracy. Uczestniczyłam w dyskusji uzyskanych wyników i w przygotowaniu tekstu manuskryptu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 35%.

c-2 A. Aleksiejuk, J.A. Hołyst, *A simple model of bank bankruptcies*, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, vol. **299**, pp. 198-204 (2001). IF $= 1,295$

Wkład habilitantki: Byłam pomysłodawcą modelu przypadkowej perkolacji skierowanej (ang. random directed percolation) na sieciach regularnych. Samodzielnie wykonałam symulacje numeryczne i analizy skalowania opisane w publikacji. Przygotowałam całość manuskryptu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 90%.

c-1 J.E. Garbarczyk, P. Machowski, M. Wasiucionek, L. Tykarski, R. Bacewicz, A. Aleksiejuk, *Studies of silver-vanadate-phosphate glasses by Raman, EPR and impedance spectroscopy methods*, Solid State Ionics vol. **136-137**, pp. 1077-1083 (2000). IF $= 1,529$

Wkład habilitantki: Podczas przygotowywania pracy magisterskiej pod kierunkiem prof. J. Garbarczyka we współpracy z dr L. Tykarskim wykonałam pomiary elektronowego rezonansu paramagnetycznego (EPR) w szkłach układu $\mathrm{AgI} - \mathrm{Ag_2O} - \mathrm{V_2O_5} - \mathrm{P_2O_5}$. *Mój udział procentowy szacuję na 5%.*

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-2 A. Fronczak, P. Fronczak, *Świat sieci złożonych. Od fizyki do Internetu*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2009. (320 stron)

Wkład habilitantki: Byłam współtwórcą koncepcji naukowej zawartości książki i jej poszczególnych rozdziałów. Jestem autorką rozdziałów: 3. "Prawa potęgowe w przyrodzie i fizyce", 4. "Modele sieci" oraz kilku podrozdziałów w rozdziale 5: 5.3. "Przypadkowe uszkodzenia i celowe ataki w sieciach złożonych", 5.4. "Epidemie w sieciach złożonych". Mój udział procentowy szacuję na 50%.

d-1 A. Fronczak, *Zadania i problemy z rozwiązaniami z termodynamiki i fizyki statystycznej*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2006. (214 stron)

Wkład habilitantki: Jestem jedyną autorką tego zbioru zadań, twórcą koncepcji naukowej podręcznika i podziału materiału na poszczególne rozdziały. Samodzielnie wyszukałam, obmyśliłam i rozwiązałam wszystkie zadania umieszczone w podręczniku. Mój udział procentowy wynosi 100%.

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-Verglag, 2008.

Wkład habilitantki: Byłam autorką podrozdziałów: 4.1. "Hidden variables", 4.2. "Average internode distance", 4.3. "Average path length" w rozdziale 4. "Log-periodic oscilations on path lenghts" omawianego artykułu. W rozdziałach tych zostały omówione wyniki uzyskane przeze mnie podczas przygotowywania rozprawy doktorskiej i opisane w publikacji c-9 (Phys. Rev. E ***70****, 056110). Mój udział procentowy szacuję na* 10%.

Artykuły naukowe w recenzowanych materiałach pokonferencyjnych

f-4 A. Fronczak, *Structural Hamiltonian of the international trade network*, Proceedings of the Summer Solstice 2011 International Conference on Discrete Models of Complex Systems (Turku, Finland, June 6-10, 2011), D. Makowiec, A.T. Lawniczak, B. N. Di Stefoano (Eds.), Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement, vol. **5**(1), pp. 31-46 (2012).

Wkład habilitantki: W pracy omówiono modele wykładniczych grafów przypadkowych dla światowej sieci handlu. Byłam pomysłodawcą tej pracy, jedynym autorem modelu sieci handlu w reprezentacji binarnej (założenia dla ważonej sieci handlu zostały opisane we wcześniejszej pracy a-5, Phys. Rev. E 85, 056113). Przygotowałam całość manuskryptu publikacji. Mój udział procentowy wynosi 100%.

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 habilitantki: Brałam udział w opracowaniu metodyki badań praw Taylora (zob. praca a-4) w modelu automatów komórkowych Nagela–Schreckenberga dla ruchu pojazdów. Uczestniczyłam również w dyskusji wyników symulacji numerycznych i dyskusji wyników analizy danych rzeczywistych nt. natężenia ruchu ulicznego. Przygotowałam całość manuskryptu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 40%.

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 Infernet 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 habilitantki: Wspólnie z dr P. Fronczakiem byłam pomysłodawcą tej publikacji. W omawianej pracy, zaproponowane we wcześniejszej pracy c-9, mikroskopowe podejście do opisu strukturalnych własności grafów przypadkowych o zadanej sekwencji stopni węzłów zostało wykorzystane do opisu zjawiska perkolacji. Wykonałam większość obliczeń analitycznych opisanych w pracy. Uczestniczyłam w przygotowaniu manuskryptu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 50%.

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 Infernet 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 habilitantki: Uczestniczyłam w dyskusji danych rzeczywistych nt. zależności odległości między dowolną parą węzłów od logarytmu iloczynu ich stopni. Brałam 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 A. Fronczak, *Exponential random graph models*, rozdział w *Encyclopedia of Social Network Analysis and Mining* [21], R. Alhajj, J. Rokne (Eds.), Springer-Verlag, 2014.

Wkład habilitantki: Samodzielnie przygotowałam cały esej, w którym omówiłam teoretyczne podstawy wykładniczych grafów przypadkowych, przykładowe zespoły statystyczne tych grafów oraz ich zastosowania w analizie sieci społecznych. Mój udział procentowy wynosi 100%.

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

Mój dorobek naukowy obejmuje 34 publikacje naukowe (wymienione w pkt. G oraz H), z których 28 ukazało się w czasopismach z bazy Journal Citation Reports (JCR). Spośród tych 28 publikacji, 19 ukazało się po uzyskaniu przeze mnie stopnia naukowego doktora (w kwietniu 2004 r.). Spośród 28 publikacji z bazy JCR, w 3 publikacjach występuję jako jedyny autor, zaś w 14 jako pierwszy współautor.

Sumaryczny impact factor moich publikacji wynosi 52,580, w tym 38,544 po uzyskaniu stopnia naukowego doktora.

H.6 Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science

Łączna liczba cytowań publikacji wynosi 462, w tym 440 bez autocytowań [22].

21 Dokładna data publikacji jest przewidziana na dzień 30 września 2014.
22 Dane z dnia 7 lutego 2014.

H.7 Indeks Hirscha według bazy Web of Science

Indeks Hirscha, h=12.

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

Projekty międzynarodowe (po uzyskaniu stopnia doktora)

1. *Critical events in evolving networks* (CREEN), 2005-2008, projekt finansowany przez Komisję Europejską w ramach 6 Programu Ramowego UE (wykonawca).

Projekty krajowe (po uzyskaniu stopnia doktora)

6. *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 (wykonawca).

5. *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 [23] FNP (kierownik projektu).

4. *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 MP0801 "Physics of Competition and Conflicts", nr projektu: 496/N-COST/2009/0 (wykonawca).

3. *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).

2. *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).

1. *Struktura, dynamika i własności krytyczne sieci przypadkowych*, 2004-2007, projekt finansowany przez Komitet Badań Naukowych (KBN), typ projektu: własny, nr projektu: 1P03B04727 (główny wykonawca).

Inne projekty badawcze (po uzyskaniu stopnia doktora)

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

3. *Wykorzystanie zasady maksymalnej entropii do konstrukcji równowagowych zespołów fizyki statystycznej*, 2008, projekt finansowany przez Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej (tzw. grant dziekański) (kierownik projektu).

2. *Samopodobieństwo i wymiar fraktalny sieci złożonych*, 2007, projekt finansowany przez Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej (tzw. grant dziekański) (kierownik projektu).

1. *Ekstensywny i nieekstensywny przekaz ciepła: analiza zjawiska relaksacji temperaturowej*, 2005, projekt finansowany przez Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej (tzw. grant dziekański) (kierownik projektu).

Projekty naukowo-badawcze przed uzyskaniem stopnia doktora

2. *Dynamika układów złożonych*, 2002-2004, Program Priorytetowy Politechniki Warszawskiej finansowany przez Rektora Politechniki Warszawskiej (sekretarz projektu, wykonawca).

1. *Wpływ gronowania węzłów na na przejścia fazowe w modelach ewoluujących sieci przypadkowych*, 2002-2003, projekt finansowany przez Komitet Badań Naukowych (KBN), typ projektu: promotorski, nr projektu: 2P03B01323 (główny wykonawca).

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

6. Stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla Wybitnych Młodych Naukowców, rok przyznania 2010.

5. Laureatka konkursu o stypendium konferencyjne organizowanego przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej we współpracy z Towarzystwem Naukowym Warszawskim, 2009. Podstawą uzyskania stypendium było wyróżnienie przez organizatorów konferencji *European Conference on Complex Systems 2009* (Warwick, UK) zgłoszonego przeze mnie referatu i zaproszenie mnie do wygłoszenia go na specjalnej sesji plenarnej tej konferencji.

4. 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.

3. Dwukrotna laureatka konkursu o stypendium krajowe Fundacji na rzecz Nauki Polskiej dla wyróżniających się młodych naukowców (program START), w latach 2005 i 2006.

2. Wyróżnienie rozprawy doktorskiej przez Radę Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej, 2004.

1. Laureatka III edycji Konkursu FIATA na najlepszą pracę magisterską wykonaną na Politechnice Warszawskiej, 1999.

H.10 Wygłoszenie referatów na międzynarodowych i krajowych konferencjach tematycznych

Referaty wygłoszone na konferencjach międzynarodowych (po uzyskaniu stopnia doktora)

7. P. Fronczak, A. Fronczak, M. Bujok, *Exponential random graph models for networks with community structure*, Summer Solstice 2013 International Conference on Discrete Models of Complex Systems, Warszawa, Polska, June 27-29, 2013.

6. A. Fronczak, P. Fronczak, *International trade network: a statistical mechanics perspective*, International Conference on Statistical Physics: SigmaPhi'11, Larnaca, Cypr, July 11-15, 2011.

5. A. Fronczak, P. Fronczak, *Statistical mechanics of the international trade network*, Summer Solstice 2011 International Conference on Discrete Models of Complex Systems, Turku, Finlandia, June 6-10, 2011.

4. A. Fronczak, P. Fronczak, *Origins of Taylor's power law for fluctuation scaling in complex systems: the case of WWW and the Internet*, ESF-COST Conference Future Internet and Society: A Complex Systems Perspective, Acquafredda di Maratea, Włochy, Oct. 2-7, 2010.

3. A. Fronczak, P. Fronczak, *Origins of Taylor's power law for fluctuation scaling in complex systems*, European Conference on Complex Systems ECCS'09, Warwick, Wielka Brytania, Sept. 21-25, 2009.

2. A. Fronczak, P. Fronczak, *Taylor's power law in complex systems*, Summer Solstice 2009 International Conference on Discrete Models of Complex Systems, Gdańsk, Polska, June 22-24, 2009.

1. A. Fronczak, P. Fronczak, *Random walks and transport phenomena in complex networks*, Applications of Networks: from Fundamental Physics to Complex networks (ANet07), Kraków, Polska, Nov. 2-4, 2007.

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

7. A. Fronczak, P. Fronczak, M. Karpiarz, *Sieci handlu światowego: badania metodami fizyki statystycznej*, wykład na seminarium Zakładu Fizyki Statystycznej w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie (na zaproszenie Prof. Ewy Gudowskiej-Nowak, kierownika zakładu), kwiecień 2012.

6. A. Fronczak, *Sieci złożone. Modele wykładniczych grafów przypadkowych*, wykład na seminarium Pracowni Social Network Group w Instytucie Informatyki Politechniki Wrocławskiej we Wrocławiu (na zaproszenie Prof. Przemysława Kazienko, kierownika pracowni), luty 2012.

5. A. Fronczak, *Wykładnicze grafy przypadkowe - sieci o zadanym hamiltonianie*, wykład na seminarium z Fizyki Układów Złożonych na Wydziale Fizyki na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie (na zaproszenie Prof. Krzysztofa Kułakowskiego), kwiecień 2008.

4. A. Fronczak, *Struktura i modelowanie sieci handlu światowego*, wykład na Seminarium z Ekonofizyki na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w Warszawie (na zaproszenie Prof. Ryszarda Kutnera), luty 2008.

3. A. Fronczak, P. Fronczak, J.A. Hołyst, *Information-theoretic approach to random networks: fluctuations and responses*, wykład na spotkaniu grup roboczych współpracujących w ramach projektu badawczego EU CREEN, Karlsruhe, Niemcy, czerwiec 2004.

2. A. Fronczak, P. Fronczak, J.A. Hołyst, *Structural properties of random networks with hidden variables*, wykład na seminarium w Institute for Cross-Disciplinary Physics and Complex Systems, University of the Balearic Islands, Palma de Mallorca, Hiszpania (na zaproszenie Prof. Maxi San Miguela), lipiec 2004.

1. A. Fronczak, *Struktura sieci złożonych*, Sympozjum Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej, Warszawa, maj 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: *New Frontiers of Peer Review (PEERE)*, 2014-2016, projekt finansowany przez Komisję Europejską w ramach European Concerted Research Action – COST, członek Komitetu Zarządzającego projektem [24].

2. COST Action MP0801: *Physica 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:

21. G. Siudem, A. Fronczak, prezentacja pt.: *Combinatorial meaning of the low-temperature series expansion's coefficients for the two-dimensional Ising model*, European Conference on Complex Systems ECCS'13, Barcelona, Hiszpania, Sept. 16-20, 2013.

24 Projekt został zaakceptowany do finansowania w październiku 2013. Dokument *Memorandum of Understanding* został podpisany dn. 15 listopada 2013.

20. 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.
19. 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.
18. 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.
17. 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.
16. 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.
15. 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.
14. M. Bujok, A. Fronczak, P. Fronczak, plakat pt.: *Percolation transition in the classical blockmodel*, International School and Conference on Network Science NetSci2013, Kopenhaga, Dania, June 3-7, 2013.
13. A. Fronczak, plakat pt.: *Exaxt expression for the number of energy states in lattice models*, 38th Conference of the Middle European Cooperation in Statistical Physics MECO38, Trieste, Włochy, March 25-27, 2013.
12. 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.
11. 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.
10. P. Fronczak, A. Fronczak, plakat pt.: *Origins of Taylor'spower law for fluctuation scaling in ecology and biology*, Physics Meets Biology, Oxford, Wielka Brytania, Sept. 1-3, 2010.
9. A. Fronczak, P. Fronczak, prezentacja pt. *Transport in complex networks*, workshop of the CREEN EU Project: Critical Events in Complex Networks, NetSCI'08 Satellite Meeting, Norwich, Wielka Brytania, June 23-27, 2008.
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. P. Fronczak, A. Fronczak, prezentacja pt.: *Critical line in undirected Kauffman Boolean networks - The role of percolation*, 401.WE-Heraeus Seminar: Evolution and Physics, Bad Honnef, Niemcy, Jan. 21-23, 2008.

6. 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.

5. P. Fronczak, A. Fronczak. J.A. Hołyst, prezentacja pt.: *Onsager relations in random networks with a given node degree distribution*, Complex Networks: from Biology to Information Technology, StatPhys23 Satellite Meeting, Pula (Cagliari), Włochy, July 2-6, 2007.

4. 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.

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

2. 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).

1. 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.

Komunikaty i plakaty konferencyjne prezentowane przed uzyskaniem stopnia doktora:

5. 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.

4. A. Fronczak, P. Fronczak, J.A. Hołyst, plakat pt.: *Average path length in complex networks*, XVIII Sympozjum Maksa Borna "Fizyka statystyczna poza fizykąŁądek Zdrój, Polska, Sept. 22-25, 2003.

3. 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.

2. A. Aleksiejuk, J.A. Hołyst, plakat pt.: *Random directed percolation*, International Workshops on Complex Systems in Natural and Social Sciences CSSNS'2001, Toruń, Polska, wrzesień 2001.

1. A. Aleksiejuk, J.A. Hołyst, prezentacja pt.: *A simple model of bank bankruptcies*, Application of Physics in Economic Modelling (NATO ARW), Praga, Czechy, Feb. 8-10, 2001.

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

Po uzyskaniu stopnia doktora

2. Summer Solstice 2013: International Conference on Discrete Models of Complex Systems, 2013, Warszawa, Polska (członek komitetu organizacyjnego).

1. Symposium on Dynamics of Complex Systems in honour of the 65th birthday of Dietrich Stauffer, 2008, Warszawa, Polska (przewodnicząca komitetu organizacyjnego).

Przed uzyskaniem stopnia doktora

3. Applications of Physics in Financial Analysis APFA4, 2003, Warszawa, Polska (członek lokalnego komitetu organizacyjnego).

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, 2010. Podstawą przyznania nagrody było współautorstwo książki *Świat sieci złożonych. Od fizyki do Internetu*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2009.

1. Nagroda indywidualna stopnia II Rektora Politechniki Warszawskiej za osiągnięcia dydaktyczne, 2007. Podstawą przyznania nagrody było autorstwo podręcznika akademickiego *Zadania i problemy z rozwiązaniami z termodynamiki i fizyki statystycznej*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2006.

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 inż. P. Fronczakiem, 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.

3. Wykłady popularnonaukowe dla uczniów szkół średnich

   - Wykład w Zespole Szkół nr 36 im. Kasprzaka w Warszawie, tytuł wykładu: *Egzotyczne zastosowania fizyki w informatyce, ekonomii i naukach społecznych*, maj 2008.
   - Wykład na uroczystości rozdania dyplomów Laureatom Olimpiady Fizycznej (Wydział Fizyki PW), tytuł wykładu: *Egzotyczne zastosowania fizyki*, kwiecień 2007.

2. Zajęcia dydaktyczne ze studentami

   Jako nauczyciel akademicki prowadziłam następujące zajęcia ze studentami Politechniki Warszawskiej:

   - *Fizyka sieci złożonych*, autorski wykład monograficzny dla studentów specjalności Modelowanie Układów Złożonych na Wydziale Fizyki, od 2009.
   - *Fizyka ogólna*, wykład i ćwiczenia rachunkowe dla studentów 2-ego semestru Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych, od 2009.
   - *Wstęp do fizyki*, wykład i ćwiczenia rachunkowe dla studentów 1-ego semestru Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych, od 2008.
   - *Fizyka statystyczna i termodynamika*, wykład (w roku 2007) i ćwiczenia rachunkowe dla studentów 3-ego roku Wydziału Fizyki, 2004-2009.
   - *Sieci ewoluujące: od fizyki do internetu*, autorski wykład monograficzny dla studentów specjalności Fizyka Komputerowa na Wydziale Fizyki, 2003-2008.
   - *Podstawy Programowania*, laboratorium komputerowe dla studentów 1-ego roku Wydziału Fizyki, 2003-2008.

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:

5. 2011/2012, M. Karpiarz, *Modelowanie sieci handlu światowego z wykorzystaniem formalizmu sieci przypadkowych o zadanym hamiltonianie*.
4. 2008/2009, M. Bujok, *Prawo Taylora skalowania się fluktuacji w układach złożonych*.
3. 2007/2008, P. Grabowicz, *Przejścia fazowe w eksponencjalnych grafach przypadkowych*.
2. 2006/2007, P. Ludwiczuk, *Samopodobieństwo i wymiar fraktalny sieci złożonych*.
1. 2005/2006, M. Adamski, *Sieć handlu światowego: badania metodami fiz. statystycznej*.

Opiekun naukowy prac inżynierskich wykonywanych na Wydziale Fizyki PW:

2. 2013/2014, P. Skowron, *Minimalne drzewo rozpinające sieci handlu światowego*.
1. 2011/2012, P. Błażejewski, *Symulacja komputerowa miedzynarodowej wymiany handlowej*.

Recenzent prac magisterskich i inżynierkich na Wydziale Fizyki PW, od roku 2004, łączna liczba wykonanych recenzji: 7.

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

3. mgr inż. Mariusz Karpiarz, początek studiów doktoranckich: październik 2012; przewidywany termin otwarcia przewodu doktorskiego: październik 2014, tematyka pracy: modelowanie sieci złożonych, grawitacyjny model handlu, ekonofizyka; (opiekun pomocniczy, opiekunem formalnym jest prof. dr hab. Robert Kosiński).

2. mgr inż. Grzegorz Siudem, początek studiów doktoranckich: październiak 2011; data wszczęcia przewodu: 21 listopada 2013; tytuł rozprawy doktorskiej: *Zastosowanie metod kombinatoryki do badania przestrzeni stanów w wybranych modelach fizyki statystycznej* (promotor pomocniczy, promotorem formalnym jest prof. dr hab. Jan J. Żebrowski).

1. mgr inż. Maksymilian Bujok, początek studiów doktoranckich: luty 2010, przewidywany termin otwarcia przewodu doktorskiego: październik 2014, tematyka pracy: sieci hierarchiczne i rekurencyjne, zjawisko perkolacji (opiekun pomocniczy, opiekunem formalnym jest prof. dr hab. Robert Kosiński).

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

5. 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*.

4. Institute for Theoretical Physics, Cologne University, Niemcy, listopad 2001 - styczeń 2002, staż w grupie prof. D. Stauffera finansowany przez German Academic Exchange Service DAAD.

3. Institute for Economic and Traffic, Dresden University of Technology, Niemcy, wrzesień 2001, staż w grupie prof. D. Helbinga finansowany przez Quandt Foundation.

2. Complex Systems Summer School 2001 zorganizowana przez Santa Fe Institute for Complex Systems Research, Budapeszt, Węgry, lipiec 2001 - sierpień 2001, udział w tzw. szkole letniej finansowany przez Santa Fe Institute.

1. Wydział Fizyki, Uniwersytet we Florencji, Włochy, luty 1999 - lipiec 1999, stypendium w ramach wymiany studenckiej - Program Erasmus / Socrates.

I.13 Wykonane ekspertyzy lub inne opracowania na zamówienie

Brak.

I.14 Udział w zespołach eksperckich i konkursowych

Członek Komitetu Naukowego i Programowego konferencji *Summer Solstice: International Conference on Discrete Models of Complex Systems* w latach:

- 2013, Warszawa, Polska, http://summersolstice2013.if.pw.edu.pl/,
- 2011, Turku, Finlandia, http://iftia.univ.gda.pl/solstice/,
- 2009, Gdańsk, Polska, http://www.iftia.univ.gda.pl/solstice/.

I.15 Recenzowanie projektów międzynarodowych i krajowych

Brak.

I.16 Recenzowanie publikacji w czasopismach międzynarodowych i krajowych

Przygotowywałam recenzję manuskryptów publikacji dla następujących czasopismach:

- *Physical Review E: Statistical, Nonlinear and Soft Matter Physics),* $\mathrm{IF}_{2012} = 2,313$,
  liczba zrecenzowanych manuskryptów publikacji: 30 od 2004.
- *Physical Review Letters*, $\mathrm{IF}_{2012} = 7,943$,
  liczba zrecenzowanych manuskryptów publikacji: 8 od 2005.
- *Europhysics Letters*, $\mathrm{IF}_{2012} = 2,260$,
  liczba zrecenzowanych manuskryptów publikacji: 1 w 2005.
- *European Physical Journal B: Condensed Matter and Complex Systems*, $\mathrm{IF}_{2012} = 1,282$,
  liczba zrecenzowanych manuskryptów publikacji: 6 od 2008.
- *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, $\mathrm{IF}_{2012} = 1,676$,
  liczba zrecenzowanych manuskryptów publikacji: 2 od 2008.
- *Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement*,
  liczba zrecenzowanych manuskryptów publikacji: 4 od 2009.

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

Działalność organizacyjna na rzecz Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej:

- Sekretarz Komisji ds. Egzaminów Dyplomowych na studiach 2-ego stopnia (magisterskich) dla studentów specjalności Modelowanie Układów Złożonych, od 2011.
- Pełnomocnik Dziekana ds. międzynarodowej wymiany studenckiej, koordynator programów LLP-Erasmus i Leonardo da Vinci, 2007-2009.
- Sekretarz Komisji ds. Egzaminów Dyplomowych dla studentów specjalności Fizyka Komputerowa, 2004-2007.