

Prof. dr hab. Krzysztof Kułakowski
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

**Recenzja rozprawy habilitacyjnej dr Agaty Fronczak
„Koncepcje zespołów statystycznych i przestrzeni stanów w układach złożonych”**

Zainteresowania naukowe habilitantki koncentrują się na teorii sieci i modelowaniu zjawisk przy użyciu sieci. Sformułowana przez autorkę lista pojęć kluczowych obejmuje układ złożony, zespół statystyczny, przestrzeń stanów i gęstość stanów. Głównymi narzędziami badawczymi są mechanika statystyczna i symulacje komputerowe. Badania te można tylko częściowo zakwalifikować jako należące do szerokiego nurtu symulacji sieci modelowych, znajdującego zastosowania we wciąż rosnącej liście gałęzi wiedzy. Większa część dokonań autorki to wyniki teoretyczne, wymagające zaawansowanych formalnych narzędzi i pojęć.

Przedstawiona rozprawa składa się z 9 publikacji w wiodących czasopismach – 7 z tych prac zostało opublikowanych w Physical Review E. Oświadczenia współautorów pozwalają stwierdzić duży, a często zasadniczy wkład habilitantki w przeprowadzone badania i przygotowanie publikacji. Dołączony do prac autoreferat jest zredagowany pieczołowicie i przejrzysty; obok zbiorczego omówienia autorka poświęciła osobne podrozdziały wszystkim publikacjom. Znajdujemy tam staranne omówienie metodyki badań i formalnych wyników, wyprowadzonych w pracach [1-9] (przyjmuję numerację prac jak w części D.2 autoreferatu). Nie byłoby celowe powtarzanie tych informacji w recenzji. Zamierzam tu wyeksponować znaczenie otrzymanych wyników w powiązaniu z przyjętymi założeniami modelowymi.

Tematem publikacji [1] jest możliwość generacji sieci o zadanym rozkładzie stopnia wierzchołka. Autorzy eksplorują tu ideę zmiennych ukrytych, przypisywanych węzłom sieci. Osiągnięciem pracy jest wskazanie metody określenia rozkładu zmiennych ukrytych na podstawie docelowego stopnia wierzchołka. Tak z autoreferatu jak z tekstu [1] wynika, że zmienna ukryta jest tu utożsamiana ze średnim stopniem wierzchołka. W bardziej ogólnej interpretacji za zmienną ukrytą możemy uważać średni stopień wierzchołka który zechcemy przypisać dowolnym atrybutom węzła. Lista przykładów takich atrybutów jest podana we wstępie do pracy [1]. W ten sposób interpretuję odniesienie w tekście tej pracy do układów wielopoziomowych. Wyniki pozwalają sformalizować konstrukcję sieci o zadanym rozkładzie stopnia wierzchołka z uwzględnieniem korelacji dwuwęzłowych. W szczególności prawdopodobieństwo połączenia dwóch węzłów opisanych zmiennymi ukrytymi zostało wyrażone poprzez podwójną odwrotną transformatę Fouriera z dwuwęzłowej funkcji tworzącej rozkładu stopnia wierzchołka.

W pracy [2] kontynuowane są rozważania Parka i Newmana z 2004 roku dotyczące zespołów statystycznych sieci. Celem pracy [2] jest wprowadzenie relacji fluktuacyjno-dyssypacyjnych, wiążących fluktuacje równowagowe sieci w zespole z liniową odpowiedzią układu na zaburzenie pól sprzężonych z wielkościami charakteryzującymi sieć. Te ogólne rozważania są ilustrowane przykładami znanych rodzin sieci. Za interesujące uważam mimochodem podane przypuszczenie, że obserwowane sieci bezskalowe mogą powstawać w procesie samoorganizacji, gdy maleje podatność

na zewnętrzne zaburzenia. Znaczenie tej pracy polega jednak głównie na rozszerzeniu koncepcji twierdzeń fluktuacyjno-dyssypacyjnych na sieci przypadkowe. Autorzy przywiązują też wagę do równoważności między zespołem statystycznym sieci a sieciami otrzymanymi przy zastosowaniu zmiennych ukrytych. Wydaje mi się jednak że ten ostatni wynik był do przewidzenia jako konsekwencja samej idei zespołu statystycznego.

Praca [3] jest formalnie rzecz biorąc opisem modelowym sieci współpracujących zespołów naukowych. Założenia modelu są jednak tak proste, że wskazane zastosowanie prowadzonych w pracy rozważań musi być uważane za symboliczne. Hamiltonian układu zawiera dwa człony: jeden jest proporcjonalny do współczynnika klasteryzacji, a drugi zawiera nieliniową funkcję stopnia wierzchołka, do której ma być proporcjonalna produktywność naukowa modelowanych zespołów. Jednak przedstawiony model wynagradza nam skromność tych założeń bogactwem wyników – jak wiadomo, ta kombinacja jest najbardziej cenna. Bogactwo dotyczy różnorodności otrzymanych struktur sieci, które tworzą mozaikę faz w przestrzeni parametrów: pól sprzężonych z obserwabkami i rozmiaru sieci. Głównym narzędziem są symulacje, z uzupełnieniami analitycznymi.

W kolejnej pracy [5] poświęconej sieciom idea i formalizm zespołu statystycznego są zastosowane do modelowania handlu międzynarodowego w ramach tzw. modelu grawitacyjnego. W ujęciu [5] hamiltonian grafu wymiany towarów zawiera wagi skierowanych linków; sprzężone z takim linkiem pole ma być odwrotnie proporcjonalne do iloczynu całkowitych produktów GDP partnerów wymiany bilateralnej. Taka formalizacja pozwala na sformułowanie twierdzenia fluktuacyjno-dyssypacyjnego w odniesieniu do rynków. Wyniki teoretyczne nieźle się zgadzają z zaprezentowanymi danymi makroekonomicznymi. Ważnym wynikiem pracy [5] jest konkluzja, że ewolucja rynku międzynarodowego w krótkich okresach czasu może być traktowany jako przemiana kwazystatyczna.

Teoria sieci eksponencjalnych została również zastosowana do badania klastrowej struktury sieci. W pracy [8] zaproponowano hamiltonian dla tradycyjnego modelu sieci złożonej z jednakowych klastrow. Podano również uogólnienie teoretyczne na przypadek fluktuacji rozmiaru klastrow i gęstości sieci. Wyniki są wsparte algorytmem symulacji i przykładami numerycznymi. Autorzy [8] przywiązują szczególną wagę do otrzymanej teoretycznie liniowej relacji między średnią ilością linków wewnątrz klastra i międzyklastrowej, porównując ten wynik z literaturowymi relacjami skalowania w strukturach fraktalnych. Moim zdaniem to porównanie wymagałoby głębszego uzasadnienia.

W pracy [4] podane jest teoretyczne uzasadnienie dla fenomenologicznego prawa Taylora, wiążącego wariancję zmiennej ekstensywnej opisującej układ i średnią wartość z tej zmiennej, podniesioną do pewnej potęgi. Autorzy argumentują, że wartość tego wykładnika jest określona przez własności funkcji gęstości stanów. Teoria [4] opiera się na rzadko używanym przez fizyków formalizmie kombinatoryki enumeratywnej. W skonstruowanym przybliżeniu transformata Poissona z funkcji gęstości stanów jest opisana takim samym wzorem, jak funkcja wyjściowa. Odwołanie do niedawno sformułowanej przez Attarda teorii procesów nierównowagowych pozwala rozszerzyć otrzymane wyniki na fluktuacje w czasie. Tekst [4] zawiera porównanie wyników teoretycznych z obserwacjami dotyczącymi zupełnie różnych dziedzin, od genetyki do ruchu drogowego; bogactwo tych zastosowań jest znakomitym potwierdzeniem uniwersalności teorii. Co do omówienia tej pracy w autoreferacie, mam drobną uwagę krytyczną: we wzorze (17) ta sama zmienna jest oznaczona dwoma różnymi symbolami.

Praca [6] jest dokonaniem czysto teoretycznym. Pracując w tym samym formalizmie kombinatorycznym autorka zidentyfikowała nową własność wielkiego potencjału statystycznego; może on być mianowicie traktowany jako generator termodynamicznego prawdopodobieństwa stanów układu. Otrzymana formuła wiąże wielki potencjał statystyczny z gęstością stanów, która określa wspomniane prawdopodobieństwo termodynamiczne. Praca [6] zawiera przejrzysty podrozdział poświęcony interpretacji wielomianów Bella, która leży u podstaw tej terminologii.

Praca [7] zawiera dalsze zastosowanie formalizmu kombinatoryki enumeratywnej do dwóch równoważnych modeli: jednowymiarowego gazu sieciowego i jednowymiarowego modelu Isinga. Jak wiadomo, te układy nie wykazują przejścia fazowego w skończonych temperaturach. Celem pracy [7] jest eksploracja osobliwości wielkiego potencjału statystycznego w $T = 0$. Zwraca uwagę przejrzysta dyskusja interpretacji kombinatorycznej strony zagadnienia. Podobnie praca [9] ma charakter demonstracji działania formalizmu na przykładach zagadnień dyskretnych, m. in. rozkładu Poissona energii.

Jest regułą, że teksty publikacji habilitantki są znakomicie zredagowane. Zwraca uwagę umiejętność jasnego i precyzyjnego formułowania myśli, logiczna konstrukcja tekstu, pieczołowite odniesienia do prac innych autorów, wielkie walory dydaktyczne. W szczególności odnosi się to do autoreferatu. Pewnym potknięciem tekstu autoreferatu jest krótki podrozdział E.1.1. Rolą tego podrozdziału było przekonanie czytelnika, że wszystkie układy rozpatrywane w rozprawie są złożone. Nie mam powodu by kwestionować tę tezę, jednak tytuł *Pojęcie układu złożonego* obiecuje zbyt wiele. Odnosińnikiem literaturowym może tu być praca doktorska Bruce'a Edmonsa *Syntactic Measures of Complexity*, Manchester University, 1999, dostępna na stronie internetowej autora.

Podsumowując ocenę rozprawy, za najważniejsze w niej opisane osiągnięcia naukowe uważam:

- rozwinięcie teorii hamiltonowskiej sieci, a w szczególności relacji fluktuacyjno-dyssypacyjnych, co pozwoliło na dyskusję szeregu interesujących przypadków, w tym z zakresu ekonomii,
- powiązanie wielkiego potencjału termodynamicznego z funkcją gęstości stanów, co wzbogaciło nasz punkt widzenia na koncepcję zespołu statystycznego.

Nie mam żadnych wątpliwości, że przedstawiona rozprawa z naddatkiem spełnia wszystkie wymagania stawiane przed pracami habilitacyjnymi.

Ogólnie biorąc, dorobek naukowy habilitantki imponuje jakością. Bardzo dobre opanowanie warsztatu teoretycznego pozwala autorce utrzymywać kontakt z światową czołówką badaczy zajmujących się mechaniką statystyczną. Po uzyskaniu stopnia doktora, poza pracami wchodzącymi w skład rozprawy jest ona współautorką 10 publikacji w wiodących czasopiśmie międzynarodowych, jak *Physical Review E* i *Physica A*. Większość tych prac dotyczy teorii sieci. Aktywność naukowa habilitantki zasługuje na wysoką ocenę według wszystkich znanych mi kryteriów. Z konieczności narzuconej rozporządzeniem ministerialnym do tych kryteriów zaliczamy również sumaryczny *impact factor*, liczbę cytowań i indeks Hirscha; trudno nie zauważyć, że wartości tych wskaźników w przypadku habilitantki pozostają na dobrym międzynarodowym poziomie. Mocnym punktem wniosku jest również jej uczestnictwo w europejskich programach COST, CREEN i 6 Programu Ramowego UE, jak również w szeregu projektów krajowych. Po uzyskaniu stopnia doktora

habilitantka wygłosiła referaty na siedmiu konferencjach międzynarodowych, nie licząc kilkunastu plakatów i współautorstwa prezentacji.

Podsumowując, uważam że dr Agata Fronczak jest badaczem samodzielnym, pełnym inicjatywy i o wielkich zdolnościach naukowych i dydaktycznych. Z pełnym przekonaniem wnioskuję o dopuszczenie jej rozprawy do dalszych etapów przewodu habilitacyjnego. Uważam też, że wysoki poziom przedstawionej rozprawy zasługuje na wyróżnienie.

Kraków, 28.04.2014

Handwritten signature in black ink, reading "Krzysztof Kwak". The signature is written in a cursive style with a large initial 'K'.