

## **AUTOREFERAT**

**Modelowanie procesów rozprzestrzeniania się  
opinii i emocji w różnych typach grup  
społecznych z wykorzystaniem metod fizyki  
statystycznej i dynamiki wieloagentowej**

**Dr Paweł Sobkowicz**

2 czerwca 2015

# Dane personalne

Paweł Sobkowicz

02-777 Warszawa, Al. Komisji Edukacji Narodowej 94/140

ur. 19.04.1958

## Wykształcenie i stopnie naukowe

- Studia na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego (1977-1983), Magister fizyki, praca magisterska „Macierz dielektryczna grafitu przekładanego”, dyplom z wyróżnieniem;
- Stopień doktora nauk fizycznych, uzyskany w Instytucie Fizyki PAN, rozprawa doktorska „Własności dwuwymiarowych układów elektronowych w półprzewodnikach półmagnetycznych” (1990), promotor prof. dr hab. Jacek Kossut.

## Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- Studia doktoranckie, Instytut Fizyki PAN (1983-1988)
- Starszy asystent, później adiunkt, Instytut Fizyki PAN (1988-1993)
- Kierownik Działu Transferu Technologii, Narodowe Centrum Badań Jądrowych Świerk, od czerwca 2012.

# Wskazanie osiągnięcia stanowiącego podstawę postępowania habilitacyjnego

Podstawą postępowania habilitacyjnego wynikającą z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.) jest jednotematyczny cykl prac poświęconych zagadnieniom modelowania zjawisk społecznych, zatytułowany **Analiza procesów rozprzestrzeniania się opinii i emocji w różnych typach grup społecznych z wykorzystaniem metod fizyki statystycznej i modelowania wieloagentowego**. Prace te, publikowane w latach 2009-2015 przedstawiały zarówno nowe modele teoretyczne, jak i analizy rzeczywistych środowisk społecznych z wykorzystaniem tych modeli.

Interdyscyplinarne podejście badawcze reprezentowane przez omawiane prace, oparte na zastosowaniu metod i pojęć znanych z fizyki do zagadnień socjologicznych staje się coraz popularniejsze, przynosi bowiem realne korzyści obu dziedzinom. Stąd też coraz powszechniejsze użycie dla takich badań określenia **socjofizyka**. Z jednej strony, badanie zjawisk społecznych dostarcza fizykom motywacji do opisywania nietrywialnych układów o skomplikowanej strukturze i dynamice (wewnętrznej i zewnętrznej). Choć częstym punktem startowym są metody fizyki statystycznej, stopień komplikacji zjawisk społecznych i odchylenia od wartości uśrednianych zmuszają do wyjścia poza te metody. Z drugiej strony, modele socjofizyczne pozwalają na wskazanie regularności opisywalnych znanymi z fizyki statystycznej pojęciami, takimi jak entropia, przejścia fazowe, parametry porządku, a dzięki temu na lepsze rozumienie mechanizmów społecznych w skali masowej.

Jednym z ważnych działów socjofizyki jest analiza opinii w grupach społecznych [C1]. Zmiany opinii społecznej wykazują podobieństwo do oddziaływań magnetycznych w układach nieuporządkowanych. Pierwsze prace fizyków poświęcone temu zagadnieniu wskazywały analogie między charakterystycznymi wielkościami i składnikami układów i przenosiły bezpośrednio wyniki fizyczne do socjologii. W podejściu tym odpowiednikiem indywidualnych przekonań czy opinii poszczególnych osób jest spin atomów. Wypadkowej opinii całej grupy odpowiada makroskopowa magnetyzacja. Siły analogii szukać należy w prostocie porównań: konsensus odpowiada całkowitej magnetyzacji, konflikty opinii między osobami odpowiadają frustracji spinów itp. Jednak wartość podejścia wychodzi poza prostotę. Zastosowanie metod socjofizycznych pozwala na efektywne wykorzystanie pojęć i aparatu matematycznego upraszczającego analizę zjawisk socjologicznych (na przykład przez wprowadzenie ekwiwalentów pojęć temperatury czy entropii) i prowadzące do konkretnych wyników – na przykład opisu zmian opinii w grupach opartych o analizę przejść fazowych. Określenie uniwersalnych cech takich przejść, dla różnych „mikroskopowych” wzorców oddziaływań pomiędzy ludźmi jasno wskazuje użyteczność takiego podejścia.

Analiza opinii społecznych z wykorzystaniem aparatu pojęciowego i metod fizycznych ma dość długą historię. Warto zwrócić uwagę, że polscy badacze odegrali znaczącą rolę w rozwoju tej dyscypliny. Wkład ten sięga historycznych prac Nowaka, Latanè, Szamreja i Lewensteina [C2, C3, C4], obejmuje niezwykle popularny model indywidualnej dynamiki opinii zapropono-

wany przez Sznajda i Sznajd-Weron [C5] aż po modele oparte na dynamicznym opisie wpływu (*social influence model*) Hołysta i Kacperskiego [C6, C7, C8].

Interdyscyplinarna metodologia ma jednak, oprócz niewątpliwych zalet, także wady. Niektóre z nich wynikają z różnic pomiędzy głównymi punktami zainteresowania i językiem charakterystycznym dla socjologii i fizyki. Wspomniane podejście do dynamiki opinii jest tu dobrym przykładem: fizyczne opisy zjawisk magnetycznych koncentrują się na przejściach fazowych prowadzących do pełnej magnetyzacji i warunkach ich wystąpienia. Stąd też znacząca część prac socjofizycznych poświęconych zmianom opinii w grupach opisuje warunki powstawania pełnego konsensusu – niejako „zapominając” o fakcie częstego w rzeczywistości społecznej współistnienia skonfliktowanych grup o sprzecznych opiniach – zjawiska niezwykle istotnego z socjologicznego punktu widzenia. Podobnie zależność dynamiki opinii w grupach od kształtu struktur społecznych, charakterystyki wzajemnych kontaktów między ludźmi i dodatkowych zmiennych określających zachowania poszczególnych uczestników procesów społecznych jest dopiero od niedawna wprowadzana do klasycznych modeli socjofizycznych, przybliżając je do realnych systemów społecznych. W badaniach społecznych nie można także zapominać o znaczeniu unikalnych okoliczności i jednostek – czynnikach świadomie pomijanych w podejściu statystycznym.

Chęć rozwiązania przynajmniej części tych problemów była głównym motywem moich prac związanych z modelowaniem zmian opinii. **Celem jest zbliżenie podejścia opartego o pojęcia i metody fizyki (w tym o symulacje komputerowe) z psychologicznymi i społecznymi uwarunkowaniami przetwarzania informacji, emocji i zmian opinii pojedynczych osób oraz współoddziałujących grup.**

# Prace stanowiące podstawę postępowania habilitacyjnego

- [A1] P. Sobkowicz, Studies of opinion stability for small dynamic networks with opportunistic agents *International Journal of Modern Physics C (IJMPC)*, vol. 20, no. 10, pp. 1645–1662, 2009.
- [A2] P. Sobkowicz, M. Kaschesky, and G. Bouchard, Opinion Formation in the Social Web: Agent Based Simulations of Opinion Convergence and Divergence *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 7103, pp. 288–303, 2012.
- [A3] P. Sobkowicz, Effect of leader’s strategy on opinion formation in networked societies with local interactions *International Journal of Modern Physics C (IJMPC)*, vol. 21, no. 6, pp. 839–852, 2010.
- [A4] P. Sobkowicz, Modelling opinion formation with physics tools: call for closer link with reality *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 12, no. 1, p. 11, 2009.
- [A5] P. Sobkowicz and A. Sobkowicz, Dynamics of hate based Internet user networks *The European Physical Journal B*, vol. 73, no. 4, pp. 633–643, 2010.
- [A6] P. Sobkowicz and A. Sobkowicz, Two-Year Study of Emotion and Communication Patterns in a Highly Polarized Political Discussion Forum *Social Science Computer Review*, vol. 30, pp. 448–469, 2012.
- [A7] P. Sobkowicz and A. Sobkowicz, Properties of social network in an Internet political discussion forum *Advances in Complex Systems*, vol. 15, p. 1250062, 2012.
- [A8] A. Chmiel, P. Sobkowicz, J. Sienkiewicz, G. Paltoglou, K. Buckley, M. Thelwall, and J. Holyst, Negative emotions boost users activity at BBC Forum *Physica A*, vol. 390, no. 16, pp. 2936–2944, 2011.
- [A9] P. Sobkowicz, Discrete Model of Opinion Changes Using Knowledge and Emotions as Control Variables *PLoS one*, vol. 7, p. e44489, 09 2012.
- [A10] P. Sobkowicz, Minority persistence in agent based model using information and emotional arousal as control variables *The European Physical Journal B*, vol. 86, no. 7, pp. 1–11, 2013.
- [A11] P. Sobkowicz, Quantitative agent based model of user behavior in an Internet discussion forum *PLoS one*, vol. 8, no. 12, p. e80524, 2013.
- [A12] P. Sobkowicz, M. Kaschesky, and G. Bouchard, Opinion mining in social media: Modeling, simulating, and forecasting political opinions in the web *Government Information Quarterly*, vol. 29, pp. 470–479, 2012.

- [A13] P. Sobkowicz, Simulations of opinion changes in scientific communities *Scientometrics*, vol. 87, no. 2, pp. 233–250, 2011.
- [A14] P. Sobkowicz, Extremism without extremists: Deffuant model with emotions *Frontiers in Physics*, vol. 3, doi: 10.3389/fphy.2015.00017, 2015

# Omówienie celu naukowego prac i osiągniętych wyników

## Wprowadzenie

Prace badawcze stanowiące podstawę postępowania habilitacyjnego stanowią rezultat spójnego tematycznie, choć zróżnicowanego warsztatowo programu badawczego. Jego tematem było zagadnienie zmian opinii w grupach społecznych, opisywane za pomocą modelowania agentowego. Historycznie, pierwsze z tych prac wywodziły się z klasycznego nurtu socjofizyki, przedstawiając konkretne propozycje modyfikacji istniejących modeli wpływu społecznego [C6, C7, C8], uwzględniające nowe efekty mające swoje społeczne i psychologiczne odpowiedniki. Wśród nich były efekty wynikające z dynamicznej natury sieci społecznych (w których nie tylko opinie poszczególnych osób ale także cała sieć wzajemnych powiązań może ulegać zmianie – co z kolei wpływa na dalsze oddziaływania) [A1], skutki uwzględnienia osób o neutralnych poglądach (przejście od modelu dwustanowego  $+/-$  do modelu trójstanowego  $+/0/-$ ) [A2] czy wreszcie efekty oddziaływania liderów, biorące pod uwagę ograniczoność zasobów jakim oni dysponują [A3]. Prace te, pozostając w głównym nurcie socjofizycznych badań dynamiki opinii, wskazały na dość interesujące elementy, w tym na możliwość długotrwałej koegzystencji grup społecznych o odmiennych poglądach. Co istotne, różnice w proponowanych modelach szczegółowych wskazywały na to, że ten sam efekt – istnienie trwałej mniejszości, niepoddającej się wpływom większości – może być wyjaśniony na różne sposoby, poprzez różne mechanizmy.

Jednym z pośrednich efektów pracy nad wspomnianymi powyżej publikacjami była obserwacja dotycząca znaczącego oderwania modeli socjofizycznych od realiów zachowań społecznych. Omówiona została ona w przeglądowym artykule [A4]. Tylko kilka z niemal pięćdziesięciu omówionych tam prac próbowało odnieść uzyskane wyniki do konkretnych danych socjologicznych.

Konstatacja potrzeby takich porównań wymusza od teoretyka uzyskanie dostępu do danych obserwacyjnych. Szczególny charakter badań dynamiki opinii w skali masowej uniemożliwia wykorzystanie wyników badań psychologicznych, prowadzonych z reguły w małych kilku- kilkunastoosobowych grupach. Na szczęście, przynajmniej częściowym wyjściem jest wykorzystanie informacji jakie pozostawiają po sobie aktywni użytkownicy Internetu. W tej sytuacji, równolegle do kontynuowanych badań dotyczących modeli teoretycznych, przeprowadzone zostały obserwacje i analizy zachowań uczestników forów dyskusyjnych. Miały one na celu uzyskanie informacji o właściwościach rzeczywistych sieci komunikacji społecznej, dynamice poglądów i wzajemnych relacji, z roboczym założeniem uzyskania danych wspierających bądź osłabiających pozycję poszczególnych modeli dynamiki opinii. Prace te kontynuowane były przez ponad dwa lata [A5, A6, A7] i dostarczyły bogatego materiału, obejmującego nie tylko opinie, ale także zachowania emocjonalne, a nawet odkryte regularności w tak zaskakujących cechach jak lognormalny rozkład długości komentarzy, który okazał się bardzo uniwersalną cechą niezależną od tematyki wypowiedzi, a nawet od języka [C9].

Podjęta w tym czasie współpraca z Pracownią Fizyki w Ekonomii i Naukach Społecznych,

Centrum Doskonałości Badań Układów Złożonych Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej pozwoliła na poszerzenie analizowanych danych o zapisy dotyczące dyskusji internetowych na forach BBC. Proponowany przez autora model zastosowany został do opisu tych danych w zbiorowej pracy [A8]. Szczególnym, nowatorskim elementem tych opracowań było uwzględnienie roli dialogów (kłótni) między użytkownikami w charakterystyce sieci społecznych.

Zaobserwowana w omawianych powyżej analizach silna rola emocji towarzyszących wyrażanym opiniom była motywacją dla stworzenia całkowicie nowego modelu dynamiki opinii. Model ten, wykorzystujący podejście agentowe, oparty był na zmodyfikowanej przez ograniczenia do skończonej liczby stanów teorii katastrof. Traktuje on indywidualne opinie jako zależne od dostępnych agentowi informacji i jego stanu emocjonalnego, oraz od informacji i emocji jakie przekazują danej osobie inni członkowie społeczności lub media; stąd jego nazwa Emocje/Informacje/Opinie (E/I/O). Model był rozwijany począwszy od najprostszych rozwiązań w przybliżeniu pola średniego [A9], przez zbadanie skutków skończonego zasięgu oddziaływań [A10], aż po będącą swoistym ukoronowaniem programu pracę [A11]. Ta ostatnie praca w jednym syntetycznym ujęciu uwzględniała aspekty sieciowe, w tym kłótnie między parami użytkowników, jak też wpływ emocji i różnic poglądów na treść komentarzy. W rezultacie powstał ilościowy model zachowań, zgodny z obserwacjami zarówno w odniesieniu do własności sieci społecznych, wyrażanych emocji i intencji komentarzy.

Model E/I/O dobrze opisuje obserwowaną w zjawiskach społecznych rosnącą rolę postaw ekstremalnych. Zagadnienie to, ze względu na swoje konsekwencje, jest coraz częściej badane metodami socjofizycznymi. Jak się okazuje, może ono występować w stabilny i powtarzalny sposób także w znacznie prostszych modelach, takich jak model Deffuanta – zagadnieniu temu poświęcona jest praca [A14].

Ze względu na interdyscyplinarny charakter zagadnienia, prace związane z omawianą tematyką publikowane były nie tylko w czasopismach fizycznych, ale także socjologicznych, jak na przykład [A2, A6, A12], oraz prezentowane na wielu konferencjach poświęconych naukom społecznym.

## Rozwinięcie modelu wpływu społecznego: dynamika opinii w aktywnie zmieniającej się sieci społecznej

Pierwsza z prac stanowiących podstawę habilitacji, *Studies of opinion stability for small dynamic networks with opportunistic agents* [A1] wprowadzała do istniejącego modelu teoretycznego *social influence* Hołysta i Kacperskiego badanie skutków zmienności sieci relacji pomiędzy osobami. Znacząca większość wcześniejszych prac różnych autorów traktowała takie powiązania jako niezmiennie w czasie. W najprostszych modelach członkowie grup społecznych opisywani byli w języku atomów umieszczonych na geometrycznej sieci (najczęściej dwuwymiarowej), oddziałujących między najbliższymi sąsiadami. Wraz ze wzrostem zainteresowania realnymi sieciami społecznymi, spopularyzowanymi pracami Watta i Strogatza [C10, C11], Alberta i Barabásiego [C12, C13] i innych, prosta geometryczna topologia zastępowana jest coraz częściej modelami, w których oddziałujące atomy są węzłami sieci, której struktura odpowiadała typowym sieciom społecznym [C14]. Praca [A1] przyjęła za punkt wyjścia obserwację, że w realnych sytuacjach możliwa jest koewolucja sieci powiązań społecznych i poszczególnych opinii: opinie mogą wpływać na kształt sieci, a struktura sieci na odczuwane wpływy innych osób. W większości modeli socjofizycznych, kontakt dwóch osób o przeciwnych opiniach może prowadzić do zmiany opinii przez jedną z tych osób, „przekonanej” przez rozmówcę lub rozmówców (model wyborcy, model Sznajdów, model wpływu społecznego, [C15, C5, C2, C3, C4]), do zbliżenia poglądów obu osób (model ograniczonego zaufania [C16, C17]), lub wreszcie do pozostania przy poprzednio przyjmowanych opiniach. Zauważmy jednak, że w realnych sytuacjach częstą reakcją na fundamentalne różnice poglądów (na przy-



kład politycznych) nie są próby wzajemnego porozumienia i związane z nimi zmiany opinii przez jednego z dyskutantów, ale raczej **zerwanie więzi z osobą żywiącą „wrogie” przekonania**, a także **poszukiwanie kontaktu z osobami o podobnych poglądach**. Prowadzi to do wybiórczego grupowania i zmniejszenia znaczenia kontaktów z osobami o odmiennych opiniach. Zjawiska te są dobrze znane w socjologii (*false consensus*, *selective exposure*). Prowadzi to z kolei do lokalnej stabilizacji opinii: osoby znajdujące się (z własnego wyboru) w środowisku podzielaającym ich opinię, są mniej podatne na zmiany i wpływ opinii przeciwnych.

Drugim elementem wprowadzonym w omawianej pracy było wprowadzenie niewielkiej liczby „fanatyków” – agentów o niezmiennych opiniach, i zbadanie wpływu ich obecności na statystyczne zachowania całego systemu.

Główne założenia modelu przedstawić można następująco:

- Opisany układ społeczny składa się z  $N$  oddziałujących agentów. Zmiany realizowane są w dyskretnych krokach czasowych.
- Każdy agent  $i$  charakteryzowany jest przez opinię  $\sigma(i)$ , mogącą przyjąć dyskretne wartości (+ lub -). Początkowa liczebność agentów o opinii +,  $N_+^{ini}$ , jest jednym z kluczowych parametrów kontrolnych modelu – opisując początkową asymetrię układu.
- Agenci połączeni są siecią społeczną. Początkowa struktura sieci oparta jest o bezskalową sieć Barabasięgo-Albert.
- Niektóre z powiązań w tej sieci traktowane są jako trwałe (statyczne), co odpowiada, przykładowo, powiązaniom rodzinnym czy związanych z miejscem pracy. Powiązanie takie są trudne rozerwania, nawet jeśli pomiędzy poszczególnymi osobami występują różnice poglądów. Pozostałe powiązania traktowane są jako swobodne – mogą zostać zerwane jeśli dane osoby różnią się poglądami i „nie chcą mieć ze sobą nic wspólnego”. W miejsce tak zerwanych powiązań mogą powstać nowe, łącząc osoby o podobnych opiniach. Takie nowe powiązania traktowane są jako swobodne. W celu zachowania ogólnych cech sieci społecznej procesy zrywania i nawiązywania powiązań realizowane są w sposób utrzymujący całkowitą liczbę powiązań na stałym poziomie.
- Każdy agent  $i$  charakteryzuje się dodatkowo swoim oportunizmem. Opisuje to parametr  $\omega(i)$  ( $0 \leq \omega(i) \leq 1$ ). Małe wartości  $\omega(i)$  odpowiadają agentom, u których prawdopodobieństwo zmiany opinii pod wpływem innych (lub pod wpływem oddziaływań zewnętrznych) jest bardzo małe. Takich agentów określamy jako „fanatyków”. Z kolei duże wartości  $\omega(i)$  odpowiadają „oportunistom” – agentom, którzy chętnie zmieniają swój pogląd, przyłączając się do większości lub ulegając zewnętrznej propagandzie. Ogólny model pozwala na zastosowanie dowolnego rozkładu  $\omega(i)$ , jednak w prezentowanych rezultatach zastosowano prosty dwuwartościowy rozkład, w którym niewielka grupa fanatyków ma bardzo małe wartości  $\omega(i) = \omega_f$  a pozostali oportuniści mają  $\omega(i) = \omega_o$ , ( $\omega_f \ll \omega_o$ ).
- Wpływ poszczególnych agentów na innych zależy od ich opinii oraz od odległości społecznej, przy czym odległość ta obliczamy jako najkrótszą ścieżkę łączącą parę agentów. Jak we wszystkich modelach wpływu społecznego wpływ ten jest sumowany – zatem kluczową rolę odgrywają wartości uśrednione.

Sam proces symulacji składa się z następujących etapów:

1. Utworzenie początkowej konfiguracji sieci, przypisanie początkowych opinii  $\sigma(i)$  i oportunizmu  $\omega(i)$  agentom, oraz określenie, które powiązania w sieci będą statyczne a które wolne. Średnia ilość powiązań na agenta powinna odpowiadać z grubsza wartościom z realnych sieci społecznych, stąd wybrano średnią wartość 6 dwustronnych połączeń na agenta. Oczywiście bezskalowa natura sieci początkowej oznacza, że obok dużej liczby

agentów o mniejszej niż ta wartość ilości połączeń, w sieci znajdzie się pewna ilość agentów o znacząco większej liczbie powiązań.

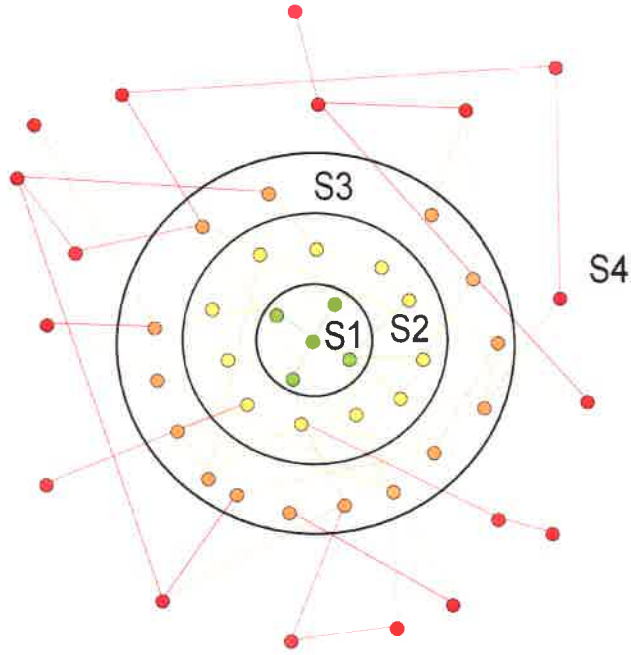
2. Przypisanie wartości i układu sieci opisane powyżej oparte jest na pełnej przypadkowości w ramach zadanych rozkładów. Struktura taka ma mało wspólnego z realnymi warunkami społecznymi. **Ten problem – ustalenia sensownych warunków początkowych dla symulacji, tak aby nie zakłócały one wyników modelu – będzie jeszcze wielokrotnie wspomniany w niniejszej rozprawie.** W szczególności, już startowe warunki powinny uwzględniać pewien stopień rozdzielania między zwolennikami przeciwnych opinii. W tym celu początkowa, w pełni przypadkowa konfiguracja sieci poddana jest w czasie stosunkowo niewielkiej liczby pierwszych iteracji modyfikacji mającej nadać jej taki kształt. W toku pierwszych 5000 iteracji proces obejmuje jedynie zrywanie i tworzenie powiązań, agenci nie zmieniają przy tym swoich opinii. To prowadzi do powstania sieci, w której zwolennicy przeciwnych poglądów są od siebie częściowo oddzieleni. Rozpoczynanie symulacji zmian opinii w konfiguracji całkowicie przypadkowej – typowe dla wielu prac – prowadzi niekiedy do dość nietypowych zachowań, nieznanymi w naukach społecznych. Zaznaczenie wymaga fakt, że w symulacjach, w których wszystkie powiązania traktowane są jako statyczne, ta wstępna faza po prostu nie występuje i konfiguracja pozostaje przypadkowa.
3. Późniejsza faza symulacji, składająca się z o wiele większej liczby iteracji ( $< 200000$ ), opiera się na dwóch kolejnych krokach: możliwej zmiany opinii u przypadkowo wybranego agenta oraz zmiany powiązań społecznych tego agenta, poprzez ewentualne zerwanie istniejących połączeń, w przypadku różnic poglądów i nawiązania nowych powiązań z kimś o poglądach podobnych.

### Wpływ innych osób: model stref oddziaływania

Pierwotny model wpływu społecznego zakładał uzależnienie siły oddziaływania między parami agentów od ich odległości społecznej. Typowe założenie potęgowe spadku siły tego oddziaływania z odległością w formie potęgowej  $\sim x_{ij}^{-\alpha}$  miało sens w szczególności w rozważaniach geometrii 2D i 3D (jak to miało miejsce w pracach Nowaka i in. [C2, C3, C4]). Jednak sieci bezskalowe, spotykane w wielu systemach społecznych charakteryzują się stosunkowo bliskimi odległościami między uczestnikami (będąc jedną z topologii realizujących słynne „7 stopni oddalenia”, wprowadzone przez Wattsa [C11]). Ilość agentów oddalonych o dwa, trzy, cztery kroki w sieciach bezskalowych gwałtownie rośnie. To oznaczałoby nieproporcjonalnie duży wpływ oddziaływań z osobami „oddalonymi”, po prostu ze względu na ich ilość. A doświadczenie socjologiczne i psychologiczne wskazuje, że istotniejsza powinna być rola osób z najbliższego otoczenia.

W celu rozwiązania tego problemu **zaproponowany został przez autora model sfer oddziaływania, bazujący w zasadniczych koncepcjach na modelu wpływu, ale inaczej traktujący wkład do siły oddziaływania pochodzący od coraz bardziej odległych agentów.**

Dla każdego z agentów  $i$  obliczamy odległość społeczną innych agentów  $j$  (liczoną jako najkrótsza ścieżka między tymi agentami). Agentów tych dzielimy następnie na 4 grupy (sfery)  $S_1, S_2, S_3$  i  $S_4$ , składające się, odpowiednio, z najbliższych sąsiadów, drugich i trzecich sąsiadów oraz reszty społeczności. Siła oddziaływania agenta  $j$  na  $i$  zależy od sfery, w której się znajduje. Siła ta uzależniona jest także od czynnika  $f_o(i, j)$ , który odzwierciedla naturalną tendencję do przypisywania większego znaczenia opiniom osób, które zgadzają się z nami, niż opiniom osób wyrażających opinie przeciwne. Przyjęto  $f_o(i, j) = 2$  jeśli  $o(i) = o(j)$  oraz  $f_o(i, j) = 1$  gdy  $o(i) \neq o(j)$



Rysunek 1: Schematyczne zobrazowanie czterech sfer oddziaływania: najbliższych sąsiadów społecznych (S1), drugich (S2) i trzecich (S3) sąsiadów oraz „reszty społeczeństwa” (S4).

Dla każdej z czterech sfer  $K$  obliczana jest uśredniona, znormalizowana wartość wpływu na agenta  $i$  od agentów znajdujących się w tej sferze  $I_K$ :

$$I_K = \frac{-\sum_{j \in S_K} f_o(i, j) o(i) o(j)}{\sum_{j \in S_K} f_o(i, j)} \quad (1)$$

Mianownik w tym wyrażeniu ma za zadanie normalizować  $I_K$ , tak aby w przypadku gdy wszyscy agenci  $j$  z danej sfery nie zgadzali się z  $i$  wartość  $I_K = 1$ , a gdy wszyscy agenci zgadzali się z  $i$  wartość ta wynosiłaby  $I_K = -1$ .

Całkowity wpływ społeczeństwa  $I(i)$  na agenta  $i$  obliczany jest jako ważona średnia z  $I_K$ . W celu uwzględnienia faktu, że wpływ bliskich znajomych jest większy niż odległych, wagi przypisywane poszczególnym sferom maleją w postępie geometrycznym, określonym zmienną  $d$ .

$$I(i) = \sum_{K=1}^4 I_K d^{(K-1)} \frac{1-d}{1-d^4}, \quad (2)$$

gdzie mianownik zapewnia normalizację. W pracy [A1] przyjęto  $d = 0.5$  i  $d = 0.3$ , co odpowiada przypisaniu odpowiednio 53% i 70.5% wpływu sferze  $S_1$  najbliższych sąsiadów każdego z agentów.

Podobnie jak w pracach Hołysta i Kacperskiego [C6, C7, C8], obok wpływu innych agentów, model uwzględnia także oddziaływanie zewnętrznych czynników, takich jak propaganda czy media. W analogii fizycznej odpowiada to zewnętrznemu polu magnetycznemu. Realizowane jest to poprzez czynnik  $h(i) = -ho(i)$ , gdzie  $h$  jest prostym współczynnikiem numerycznym, będącym jednym z parametrów zmienianych w symulacjach. Drugim podstawowym parametrem jest początkowa ilość agentów o opinii +,  $N_+^{ini}$ .

Wybrany przypadkowo agent  $i$  zmienia swoją opinię z prawdopodobieństwem  $P = (I(i) + h(i)) \omega(i)$ , gdzie  $\omega(i)$  jest miarą jego oportunisty. Duże wartości  $\omega(i) \approx 1$  odpowiadają agentom „normalnym”. Małe,  $\omega(i) \ll 0.1$ , odpowiadają agentom trwającym przy swoich poglądach, określanym jako „fanatyczny”. Kiedy suma  $I(i) + h(i)$  jest mniejsza niż zero (ogólny wpływ otoczenia

i czynników zewnętrznych jest zgodny z aktualną opinią agenta  $i$ ) nie ma „powodów” do zmiany opinii. Z drugiej strony, kiedy  $I(i) + h(i) > 0$ , prawdopodobieństwo zmiany zależy zarówno od siły wpływu jak też od oportunistycznego agenta  $i$ .

W propozycji sfer wpływu istotny jest rosnący stopień uśredniania opinii i wpływu wraz ze wzrostem odległości od agenta  $i$ . Indywidualny wpływ pojedynczych agentów w sferze  $S_4$  jest bardzo mały. Odlegli agenci stanowią zatem zuniformizowane tło, którego opinie dochodzą do konkretnego agenta pośrednio, element zblizający model do realnych obserwacji psychologicznych.

### Modyfikacja sieci na skutek różnic poglądów

Drugim elementem symulacji jest modyfikacja sieci w odpowiedzi na różnice poglądów między poszczególnymi agentami. Mając na celu zachowanie ogólnych statystyk sieci powiązań procesy zrywania i nawiązywania powiązań zostały połączone. Oczywiście, w odniesieniu do realnych zjawisk społecznych jest to uproszczenie: warunek zamrożenia ogólnej liczby powiązań społecznych nie musi być – i najczęściej nie jest – spełniony. Jednak jego przyjęcie pozwala na skoncentrowanie analizy na efektach zmiany topologii połączeń wymuszanej przez różnice opinii, a nie zmianach wynikających z ewolucji średniej liczby połączeń.

Przebieg procesu można opisać następująco. Wyselekcjonowany na poprzednim etapie agent  $i$  wybiera w sposób przypadkowy spośród swoich sąsiadów agenta  $t$ , którego opinia  $o(t)$  jest niezgodna z opinią  $o(i)$ . Połączenie między  $i$  a  $t$  zostaje zerwane. Oczywiście, jeśli wszyscy sąsiedzi  $i$  podziela ją jego opinię, nie dochodzi do zrywania połączeń.

Tworzenie nowych powiązań jest nieco bardziej skomplikowane – trzeba bowiem rozróżnić prawdopodobieństwa nawiązania bezpośredniego kontaktu w zależności od oddalenia agentów. Nowy „sąsiad”  $s$  nie jest wybrany w sposób całkiem przypadkowy, ale z prawdopodobieństwem malejącym z rosnącą odległością między  $i$  a  $s$ . Prawdopodobieństwo to, w przypadku gdy  $s$  należy do sfery  $S_K$  ( $K \geq 2$ ) przyjęto jako

$$p(s) = \frac{A}{N_K^{agr}} \left(\frac{1}{2}\right)^{K-1}, \quad (3)$$

gdzie  $N_K^{agr}$  jest liczbą agentów w sferze  $S_K$ , których poglądy są zgodne z opinią  $i$ , a czynnik  $A$  jest globalnym czynnikiem normalizującym tak aby  $\sum_s p(s) = 1$ . Czynnik  $(1/2)^{K-1}$  odpowiada za zmniejszające się prawdopodobieństwo wyboru agentów  $s$  z odległych sfer wokół  $i$ . Powyższa forma nie ma szczególnego uzasadnienia (fizycznego ani socjologicznego) i wybrana została jedynie ze względu na swoją prostotę obliczeniową.

Przy dominacji powiązań swobodnych następuje szybka separacja sieci na dwie niemal rozdzielne podsieci, łączące agentów o dodatnich i ujemnych wartościach opinii. Finalna charakterystyka takiej podzielonej sieci okazuje się odpowiadać konkretnym przykładom znanym ze studiów społecznych, na przykład tym opisanym przez Adamic i Glance’a [C18].

Podczas gdy średnia liczba powiązań przypadających na agenta a nawet potęgowe rozkłady *indegree* i *outdegree* pozostają niezmienione, inne cechy sieci społecznej ulegają radykalnej ewolucji. Przykładem może być rozkład najkrótszych ścieżek pomiędzy agentami (skracający się dla agentów o tych samych opiniach i rosnący dla par agentów o różniących się opiniach) oraz współczynnik klastrowania. Obliczając te wielkości dla obu podsieci osobno (szczególnie w przypadku sieci agentów o poglądach stanowiących większość) uzyskamy wyniki podobne do początkowej sieci. Z kolei dla sieci mniejszościowej, szczególnie w przypadkach gdy takich agentów jest niewielu, są oni znacząco izolowani od siebie i podsieć mniejszościowa może mieć zupełnie nową charakterystykę.

## Efekty równoczesnych zmian opinii indywidualnych i sieci społecznej

Przeprowadzone w pracy [A1] symulacje zakładały początkową sieć bezskalową o średnio 6 powiązaniach na agenta. Poszczególne wyniki otrzymywano przyjmując odpowiednio różne proporcje powiązań swobodnych i statycznych: poczynając od 100% powiązań statycznych (oznaczanych na ilustracjach jako  $F = 0, S = 6$ ), 66% powiązań statycznych ( $F = 2, S = 4$ ); 33% takich powiązań ( $F = 4, S = 2$ ) oraz układów wyłącznie ze swobodnymi powiązaniemiami ( $F = 6, S = 0$ ). Symulacje były prowadzone dla układu o 500 agentach.

Pierwsza obserwacja odnosiła się do nieprzewidywalności wyników poszczególnych symulacji, szczególnie dla pewnych zakresów parametrów (takich jak oddziaływanie zewnętrzne  $h$  czy początkowy udział agentów o dodatniej opinii  $N_+^{ini}$ ). Symulacje stabilizowały się na bardzo różnych poziomach wartości końcowej ilości agentów o dodatnich opiniach  $N_+$  (parametru mierzącego stopień konsensusu). Konkretny przebieg symulacji, przy zadanych parametrach, mógł prowadzić do  $N_+ \approx 300$ , a więc podziału społeczności na prawie równe części, podczas gdy inny przebieg prowadził do  $N_+ = 490$ , czyli niemal pełnego konsensusu. Szczegółowa analiza wykazała, że różnice te wynikały w znacznym stopniu z pozycji, jakie w sieci zajmowali agenci-fanatyki, niezmiennie poglądów. Zajęcie przez takiego agenta pozycji z dużą ilością powiązań znacząco wpływało na zachowanie systemu – obserwacja ta była bodźcem do prac związanych z rolą liderów, których rezultaty omówione zostaną w dalszej części rozprawy. Posługując się językiem potocznym, takie różnice pomiędzy wynikami symulacji odzwierciedlały „rolę jednostki w procesie historycznym”. Przypomina to nam, że realne zjawiska społeczne mają charakter jednorazowy i unikalny, a metody statystyczne mają w ich opisie istotne ograniczenia.

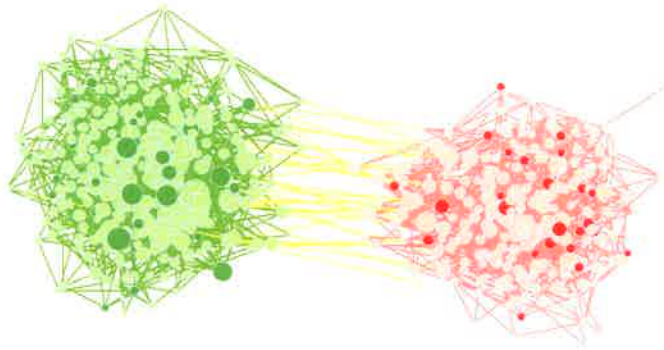
Ponieważ wyniki poszczególnych symulacji mogły różnić się między sobą, analiza skoncentrowana została na statystycznych rozkładach tych wyników w zależności od parametrów modelu. Jak już wspomniano, podstawowym parametrem końcowym wybrana została liczba agentów z  $\sigma(i) = +1$ , oznaczana jako  $N_+$ . Poszukiwaliśmy warunków, w których badana społeczność składałaby się głównie z agentów jednego typu ( $N_+ \approx 0$  lub  $N_+ \approx 500$ ) oraz warunków dla współistnienia obu opinii. W szczególności poszukiwaliśmy warunków, w których istniałyby asymetryczne układy końcowe składające się ze znaczącej większości (na przykład  $N_+ = 420$ ) i małej ale stabilnej mniejszości ( $N_- = 80$ ).

Obok końcowych wartości  $N_+$ , badane było także tempo w jakim układ osiąga stan stabilizacji, rozkład opinii wśród fanatyków i oportunistów oraz średnie ilości powiązań pomiędzy agentami różnych typów.

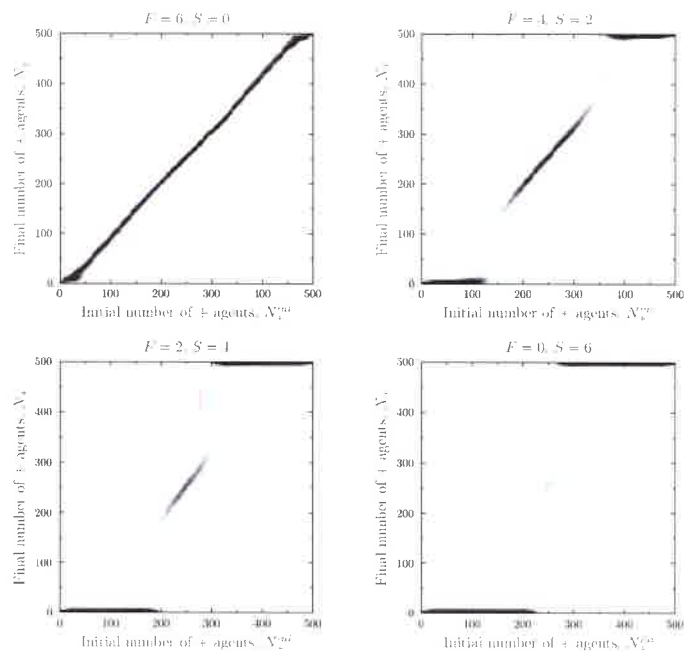
Zestawienie wyników wielu tysięcy indywidualnych symulacji pozwoliło na odkrycie dość nieoczekiwanych cech systemu. Rysunek 3 przedstawia rozkład końcowych wartości  $N_+$  dla różnych proporcji między powiązaniemiami statycznymi a swobodnymi, przy założeniu braku wpływu zewnętrznego  $h = 0$ , oraz wartościach oportunistów  $\omega_f = 0.02, \omega_o = 0.9$  ( $\omega_f = 0.02$  oznacza, że część fanatyków w toku symulacji może zostać „przekonana” do odmiennych poglądów). Tempo spadku siły oddziaływania z odległością społeczną określone zostało przez  $d = 0.5$ . Odcienie szarości odpowiadają prawdopodobieństwu, że konkretna realizacja symulacji doprowadzi przy wartości startowej  $N_+^{ini}$  do wyniku końcowego  $N_+$ .

Zacznijmy od „klasycznego” modelu, w którym cała sieć jest zamrożona (prawy dolny wykres,  $F = 0, S = 6$ ). Jak widać, mieszane społeczeństwo występuje jedynie w bardzo wąskim zakresie wartości początkowych  $N_+^{ini}$ , między 230 and 270 – czyli w bezpośrednim otoczeniu równowagi początkowej. Jakakolwiek większa asymetria w początkowym rozkładzie zwolenników  $+$  i  $-$  prowadzi do konsensusu i zaniknięcia początkowej mniejszości. W rejonie centralnym rozkład wyników układu się z grubsza wzdłuż linii o nachyleniu 5/3. Przejście od konsensusu  $N_+ = 0$  do konsensusu  $N_+ = 500$  jest dość gwałtowne i sugeruje obecność przejścia fazowego.

Na drugim krańcu zakresu „elastyczności” sieci, czyli dla 100% swobodnych powiązań



Rysunek 2: Przykład końcowej konfiguracji sieci otrzymanej przy założeniu 100% swobodnych powiązań ( $S = 0, F = 6$ ). Ciemny kolor oznacza fanatyków, jasny oportunistów, a rozmiar koła liczbę powiązań agenta. Widoczny jest podział między zwolennikami opinii + i -. Wynik odpowiada obserwacjom dotyczącym układu politycznych blogów przez wyborami prezydenckimi w USA w 2004 roku przez Adamic i Glance'a.



Rysunek 3: Rozkład prawdopodobieństwa końcowych wartości ilości zwolenników opinii +,  $N_+$ , jako funkcja początkowej wartości  $N_+^{ini}$  przy braku zewnętrznego wpływu,  $h = 0.0$ . Poszczególne wykresy odpowiadają różnym proporcjom swobodnych i statycznych powiązań. Kolejne panele odpowiadają 100% powiązań swobodnych, 1/3 powiązań niezmiennych, 2/3 i sieci statycznej. Symulacje przeprowadzane były z 10% fanatyków, dla których prawdopodobieństwo zmiany opinii wynosiło  $\omega_f = 0.02$ . Czynnikiem określający spadek wpływu z odległością społeczną wynosił  $d = 0.5$  (co oznacza, że około 50% wpływu pochodzi od najbliższych sąsiadów).