

Indeterminizm obliczeniowy w złożonych układach społecznych*

Krzysztof Kułakowski

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH, Kraków

Witam Państwa uprzejmie i dziękuję Organizatorom Zjazdu za zaproszenie, którym czuję się zaszczycony. Będę mówił o działalności fizyków w socjologii. Jest w użyciu termin *socjofizyka*, wprowadzony w 1982 roku [1]. Będę argumentował, że zastosowanie fizyki w socjologii jest sprawą dyskusyjną ze względów metodologicznych. Za myśl przewodnią mojego wystąpienia obrałem twierdzenie Thomasów, dwojga socjologów amerykańskich. Brzmi ono: *If men define situations as real, they are real in their consequences* [2]. Twierdzenie odnosi się więc do relacji między rzeczywistym a wyobrażonym, która to relacja w naukach ścisłych jest dobrze znaną opozycją. Rzeczywistą treścią socjologii jest to co wyobrażone.

O czym będę mówił konkretnie? Skoro fizyka, trzeba powiedzieć coś o danych doświadczalnych. Chcę też powiedzieć o miejscu jakie socjofizyka zajmuje na obrzeżach nauk społecznych. W tej geografii nauk opinia fizyka, Philipa Andersona, laureata nagrody Nobla w 1977 roku, dostarcza pewnego rodzaju mapy drogowej. Centralnym tematem tego wykładu jest przyczynowość w układach społecznych; zaczniemy od automatów komórkowych jako alegorii świata w pełni deterministycznego, odwołamy się też do formalizmu sieci przyczynowych. Te narzędzia wymagają danych liczbowych. W układach społecznych mamy jednak do czynienia z treścią umysłów. Tylko pośrednio poddaje się ona pomiarowi.

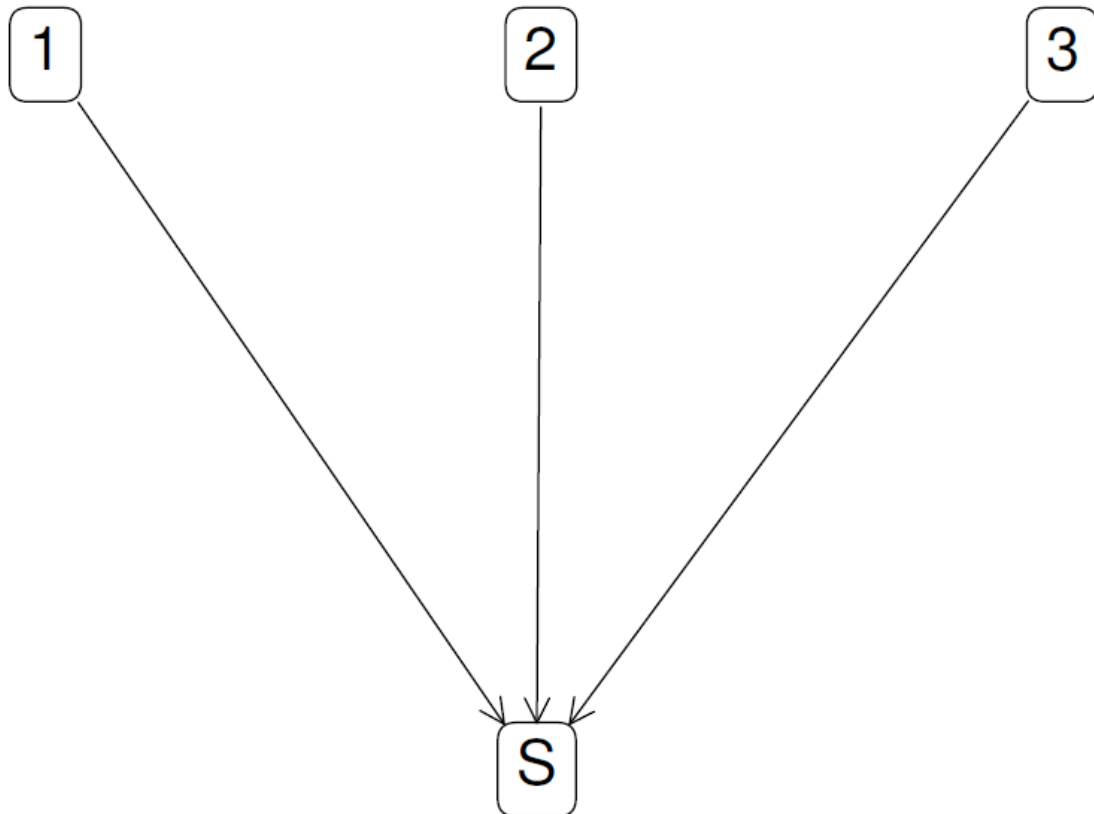
Danych dla socjofizyki dostarcza Internet, na wielką skalę. Można by na ten temat zrobić cykl seminariów; nie jest to moim zadaniem, pokażę tylko trzy przykłady. Spośród osób mających konta na Facebooku, miliony wypełniły ankietę dotyczącą cech osobowości. To pozwoliło na ich opis przy pomocy pięciu parametrów, znanych jako wielka piątka: otwartość, ukierunkowanie na cel, ekstrawersja, ugodowość, stabilność emocjonalna. Jednocześnie kontakt między dwoma osobami, który w XX wieku wyobrażaliśmy sobie jako temat literacki, został zredukowany w portalach społecznościowych do jednego lub kilku parametrów. W szczególności każdej osobie można przypisać ilość kontaktów. Mamy więc temat badawczy: korelacja między ilością kontaktów i cechami osobowości, sparametryzowanymi na podstawie wypełnionych ankiet i zgodnie z zasadami psychologii [3]. Inny przykład: sieci blogów politycznych w USA w 2004 roku, z wiązaniami jeśli jeden blog odwołuje się do innego. Pytaniem badawczym były różnice między sieciami blogów konserwatywnych i liberalnych; struktura pierwszej z nich okazała się bardziej zwarta [4]. Trzeci przykład dotyczy gier online, znanych jako RPG; grają w to na świecie dziesiątki milionów ludzi. Badano proces usuwania dysonansu poznawczego, prowadzący do tzw. równowagi Heidera. W tym stanie równowagi gracze są podzieleni na dwie spójne grupy, z pozytywnymi więziami w ramach każdej grupy i negatywnymi więziami międzygrupowymi; znak więzi to przyjaźń lub wrogość. Badania wykazały, że proces usuwania dysonansu jest obecny w przestrzeni wirtualnej, podobnie jak w rzeczywistej [5].

Mostem między fizyką a socjologią może być mechanika statystyczna [6]; wspólna jest duża ilość zmiennych i metody probabilistyczne. Nie cofając się zbyt daleko, można uznać że pionierem budowy tego mostu był Wolfgang Weidlich ponad 40 lat temu [7]. (O miano ojca socjofizyki ubiega się też Serge Galam [8], argumentując nieco ryzykownie że nie trzeba być pierwszym, żeby być ojcem.) Most o którym mówimy sięga socjologii pozytywistycznej, dotyczącej danych statystycznych, której czołowym reprezentantem był Emil Durkheim. Ale dzisiejsza socjologia w swoim głównym nurcie odrzuca pozytywizm. Główny nurt to tzw. socjologia rozumiejąca, stawiająca sobie za zadanie interpretację społecznych aspektów stanu umysłów. Za inicjatora tej socjologii uważa się Maxa Webera. Paradoksalnie, bliżej Weidlichowi do Durkheima niż Durkheimowi do Webera. Jak socjofizyka może pokonać tę granicę paradygmatu? Może poprzez symulacje agentowe, gdzie człowiek jest reprezentowany przez algorytm podejmujący decyzje na podstawie modelowych przesłanek? Nie wiemy, jak daleko można się posunąć na tej drodze.

Ilustracją rozszczepienia w ramach nauk społecznych może być zestawienie dwóch cytatów. Autorem pierwszego jest Karl Popper, entuzjasta fizyki. Chociaż był znanym krytykiem proroctwa Marksa dotyczącego społeczeństwa bezklasowego, sam popełnił coś na podobną skalę: „...dzięki naszej powoli wzrastającej wiedzy o społeczeństwie, tzn. dzięki badaniom niezamierzonych skutków naszych planów i działań (...) pewnego dnia ludzie będą mogli stać się świadomymi twórcami (...) ogromnej części własnego losu” [9]. Będę argumentował, że do tego nie dojdzie. Autorem drugiego cytatu jest socjolog Norbert Elias: „... że przy takich społecznych oddziaływaniach chodzi o zjawiska zupełnie specyficzne, nie byłoby trudno zrozumieć, gdyby naszego mówienia i myślenia nie przenikały w tak wielkiej mierze słowa i pojęcia w rodzaju „konieczność kauzalna”, „determinizm”, „prawo naukowe” itd., pojęcia, dla których modelem były doświadczenia w obszarze fizykochemicznych nauk przyrodniczych” [10]. Podsumowując, pojęcia fizyczne powinny się trzymać z dala od socjologii. W swoim dominującym nurcie socjologia poszła za opinią wyrażoną przez Eliasa. Może o tym świadczyć pierwsze zdanie z deklaracji programowej światowego kongresu socjologów w 2010 roku: „W naukach społecznych determinizm jest martwy” [11].

W słynnym eseju *More is Different* Philip Anderson sformułował swoistą zasadę korespondencji między różnymi dziedzinami wiedzy, dając jednocześnie podstawę do dzisiejszego rozumienia złożoności i emergencji [12]. Jak pisze Anderson, w ramach każdej dziedziny X możemy formułować prawa dla niej swoiste, jeżeli zdecydujemy się przyjąć założenia dostarczane przez dziedzinę Y. Można więc szukać prawidłowości wyłaniających się w badaniach socjologicznych, zakładając dane własności psychiki ludzkich jednostek. W ten sposób Anderson stał się prekursorem dzisiejszych rozważań o złożoności i emergencji. 27 lat później Bruce Edmonds definiuje złożoność jako charakterystykę teorii [13]: "Złożoność jest własnością modelu, która sprawia, że trudno określić zachowanie układu w danej reprezentacji matematycznej, nawet gdy dana jest niemal pełna informacja o składnikach układu i o ich wzajemnych relacjach". Co uważamy za układ złożony, zależy więc od etapu badań. 30 lat temu przykładem przytoczonym przez Stephena Wolframa był płatek śniegu,

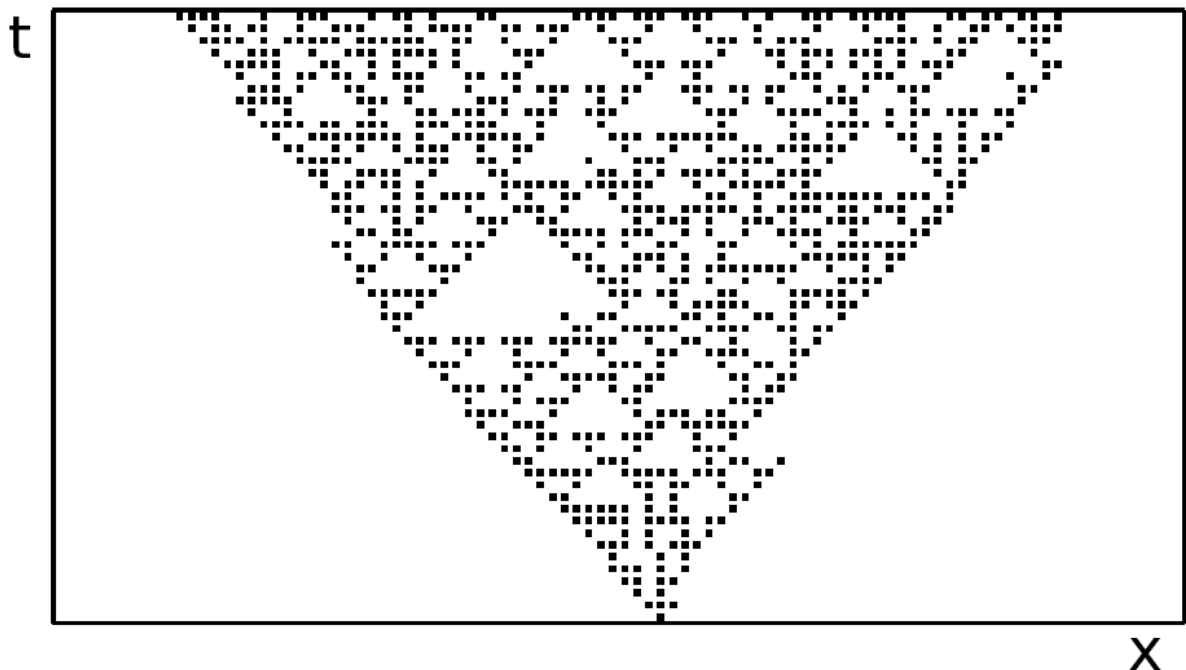
którego proces wzrostu był symulowany techniką automatów komórkowych [14]. W niedawnej pracy przeglądowej Jarosław Kwapien i Stanisław Drożdż przytaczają jako przykłady mózg, tekst literacki i rynek finansowy [15]. W wywiadzie, który przeprowadził z samym sobą, Edmonds stwierdza prowokacyjnie że wyodrębnianie układów złożonych nie ma sensu, ponieważ wszystko co nie jest trywialne jest złożone [16]. Patrząc z tego punktu widzenia, trzeba by uznać że teoria złożoności jest naukowym mitem. Co nie znaczy, że ten mit nie może być użyteczny.



Rys. 1. Skutek S może być wywołany przez każdą z trzech przyczyn. W naszym przykładzie są to: motyl, nadużycie alkoholu i zaśmiecone schody. Warunek Hume'a może być spełniony tylko w przypadku motyla.

Ze złudzenia, że przyczynowość jest zagadnieniem prostym, odarł nas jak wiadomo David Hume, bez mała trzysta lat temu [17]. Hume określił warunki, aby można było mówić o przyczynie i skutku, oto jeden z nich: „Ta sama przyczyna zawsze wywołuje ten sam skutek i ten sam skutek może powstać tylko dzięki tej samej przyczynie.” Jak widać, warunek ten określa sytuację wyidealizowaną; często sprawa jest bardziej złożona. Można mówić o różnych rodzajach złożoności, stosunkowo rzadko mówi się o złożoności przyczynowej [18].

Na przykładzie na rysunku 1 widać, że założenia Hume'a nie są spełnione, kiedy dany skutek może być wywołany przez jedną z kilku przyczyn. Dlaczego złamałem nogę na schodach? Może dlatego że pośliznąłem się na jakiejś skórcie? No tak, ale przecież schodzę tam codziennie, tam zawsze pełno różnych śmieci. Może dlatego że wypilem dwa drinki? No tak, ale przecież piję od dwóch lat i dotąd nic się nie stało. No, może dlatego że latał tam piękny, niebieski motyl, a ja się na niego zagapiłem. Takiego motyla widziałem pierwszy raz. I tak, szukając dla wyjątkowego zdarzenia wyjątkowej przyczyny, bezwiednie wracamy w ślady Hume'a.



Rys. 2. Uszkodzenie, rozprzestrzeniające się w wyniku zmiany stanu jednej komórki. Użyto reguły elementarnego automatu jednowymiarowego $22=00010110$ [19].

Jeżeli odwołać się do wizji Laplace'a o świecie całkowicie deterministycznym, to matematyczną alegorią takiego świata jest deterministyczny automat komórkowy [19]. Na rysunku 2 mamy coś w rodzaju stożka światła; w przypadkowym stanie początkowym ktoś zmienił stan jednej komórki. Pokazane są tylko te komórki których stan został zmieniony na skutek tego pojedynczego uszkodzenia [20]. Widzimy że skutki lokalnej zmiany rozchodzą się bez ograniczeń. Takie automaty nazywamy chaotycznymi. A teraz rozpatrzmy sytuację lokalnego obserwatora; zmienne które on może obserwować to stany komórek jego otoczenia. Ponieważ układ nie jest izolowany, obserwator nie będzie w stanie przewidzieć jego dalszej przyszłości. Lokalna zmiana komórki gdzieś daleko będzie miała wpływ na zmienne obserwowane, ale obserwator nie może znać tej przyczyny. To mam na myśli, mówiąc o indeterminizmie. Istnieją przypadki, kiedy wiadomo że automat nie jest chaotyczny; można szukać kryteriów ale generalnie takie kryteria działają tylko w

jednowymiarowej przestrzeni [21] . Mamy tu do czynienia z problemami złożoności obliczeniowej, nieredukowalnością obliczeniową, problemami NP-zupełnymi, nierozstrzygalnością obliczeniową. W świecie deterministycznych automatów komórkowych jest wiele takich problemów [22].

Nasz problem jest jednak jeszcze trudniejszy. Trudność polega na tym, że nie znamy rzeczywistych reguł automatu, który mógłby nam służyć jako model zjawisk społecznych. Szukamy reguły, znając tylko wyniki lokalnych obserwacji. Możemy wysuwać hipotezy, ale ich weryfikacja nigdy nie będzie pewna. W tym sensie o deterministycznych automatach można powiedzieć to samo co powiedział Stephen Hawking o fizyce w ogóle: "Każda teoria fizyczna jest zawsze prowizoryczna, pozostaje tylko hipotezą; nigdy nie można jej udowodnić. Niezależnie od tego, ile razy rezultaty eksperymentu zgadzały się z teorią, nadal nie można mieć pewności, czy kolejne doświadczenie jej nie zaprzeczy. Z drugiej strony łatwo obalić teorię, znajdując choć jeden wynik eksperymentalny sprzeczny z jej przewidywaniami." [23]. Okazuje się więc, że nawet jeżeli reguły istnieją, ich określenie uniemożliwia niekontrolowany wpływ otoczenia oraz związana z nim niepowtarzalność pomiaru.

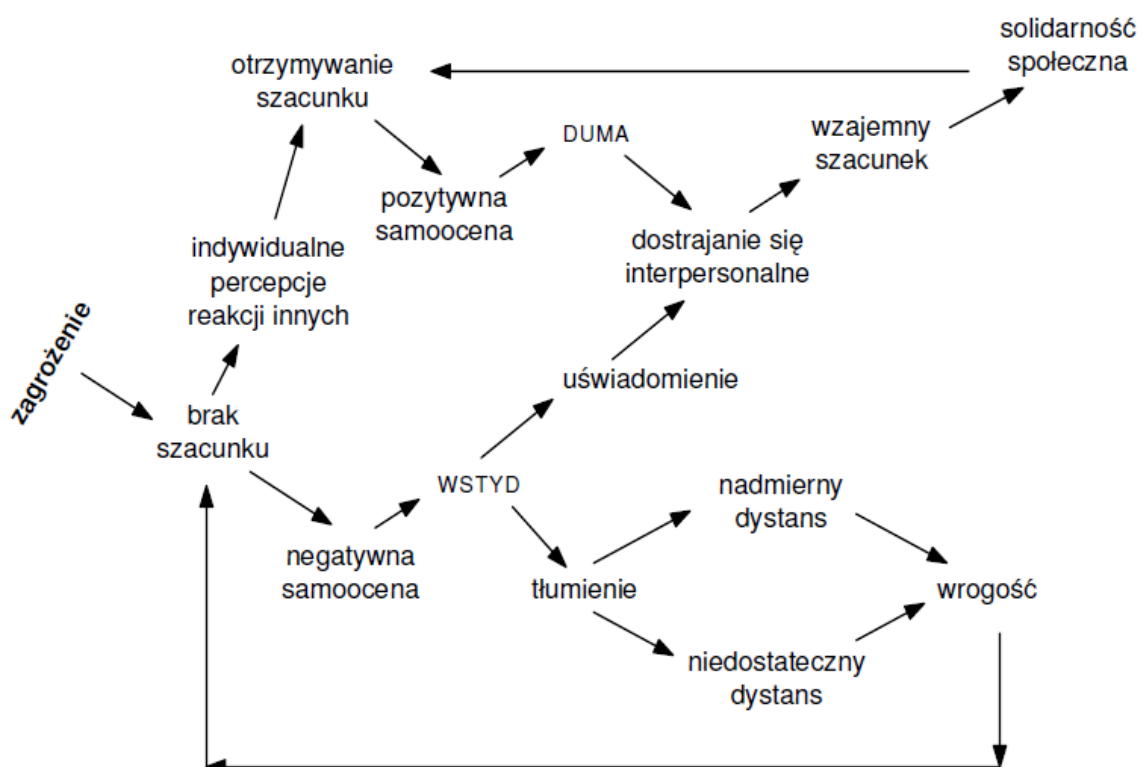
Trudność, jaką zarysowaliśmy na przykładzie deterministycznych automatów komórkowych, ukazuje się jeszcze wyraźniej, jeśli sięgniemy po narzędzia bardziej specjalistyczne: modele równań strukturalnych czy sieci Bayesa [24,25]. Oba wymagają wstępnej orientacji w związkach między zdarzeniami, opisanych czy to przez odpowiednie współczynniki równań, czy przez prawdopodobieństwa warunkowe. Jeżeli tych zmiennych jest więcej, gubimy się w ich wielowymiarowej przestrzeni. Mogłaby je podpowiedzieć teoria, ale gdy właśnie teorii szukamy, koło się zamyka. Kluczowym pytaniem jest, co można zaniedbać? W praktyce trzeba mieć doświadczenie w badanej materii, zdać się na modele robocze i zdrowy rozsądek. Ale regułą jest, że relacje przyczyny i skutku trzeba postulować; samo doświadczenie ich nie określi.

A najwyższa bariera stoi przed zastosowaniami fizyki w socjologii rozumiejącej. Bariery jest nieokreślony charakter zmiennych które trzeba by uwzględnić żeby ująć działanie ludzkiego umysłu. Umysł interpretuje całość odbieranych wrażeń w ramach pewnej teorii, którą wypracowuje w ciągu całego życia. Socjologia rozumiejąca stawia sobie zadanie odtworzenia tej interpretacji. Nie można tego opisać jedną czy dwoma zmiennymi, których zakresy można by potem zbadać. Nikt tych zmiennych nie zdefiniował w powszechnie akceptowany sposób, a jeśli je zdefiniować, trzeba by je umieć mierzyć.

Rozdział między naukami ścisłymi i socjologią rozumiejącą jest pogłębiony przez fakt, że te atrybuty rzeczywistości, które fizyka traktuje jako przeszkody, socjologia rozumiejąca wzięła na sztandar. Jeżeli układ jest izolowany i powtarzalny, to – powiadają - nie jest to rozumiejący człowiek, albo rozumienie nie gra tu żadnej roli, więc nie jest to problem który socjologa interesuje. Taki jest na przykład model dynamiki tłumu Helbinga, gdzie przechodnie są opisani jako cząstki gazu, każda z własnym napędem; pęd i energia nie są w

tym gazie zachowane [26]. Dla fizyka jest to opis zachowania się ludzi, ale taki opis będzie całkowicie zignorowany przez socjologa spod znaku Maxa Webera.

Przykładem zjawisk których przewidzenie jest dla nas zbyt trudnym wyzwaniem są ruchy społeczne. Wymieńmy cztery: słynny Marsz Solny prowadzony przez Gandhiego w 1930 roku, a z bardziej współczesnych protesty mnichów buddyjskich przeciw okupacji Tybetu podczas olimpiady w Pekinie w 2008 roku, demonstrację poparcia dla WikiLeaks w Sydney w 2010 roku oraz protesty przeciw uniewinnieniu mordercy Trayvona Martina w Baltimore, 2013. Teorie działań zbiorowych istnieją, owszem. Przykładem niech będzie teoria dumy i wstydu, sformułowana przez Thomasa Scheffa [27]. Uproszczony schemat tej teorii przytoczony jest na rysunku 3. Jak widać z tego schematu, teoria używa wielu zmiennych które poddają się pomiarowi tylko pośrednio. W szczególności kluczowy okazuje się poziom świadomości, który decyduje o interpretacji danego zdarzenia. Pod hasłem „poziom świadomości” kryją się jednak nienazwane indywidualne czynniki, które są *określone* – jeżeli wolno użyć tego słowa- przez historię danego umysłu, i których nikt jeszcze nie wydzielił.



Rys.3. Pętla dumy i wstydu w modelu Thomasa Scheffa. Rysunek jest nieznaczną modyfikacją schematu podanego w pracy [27] (wykorzystane za zgodą Wydawnictwa Naukowego PWN).

Te ograniczenia mają konsekwencje; chciałbym wymienić dwie. Pierwsza dotyczy modelowania. Spotyka się czasem prace w których postuluje się związki między wielkościami, opisującymi liczne własności umysłów, nie podając sposobu pomiaru tych wielkości. Nie bada się przy tym, jak przyjęte wartości tych wielkości wpływają na wyniki badań. Wszyscy wiemy że jeśli tych parametrów jest wiele, zrobić tego się nie da. Jaki stąd wniosek? Nie da się ocenić wyników liczbowych tych prac. Wyniki liczbowe nie mogą więc być argumentem na rzecz ich publikacji.

Druga konsekwencja jest poważniejsza. Gdy nie potrafimy budować relacji przyczyny i skutku w wielu sytuacjach naszego codziennego życia, to nie możemy opierać naszych decyzji na argumentach racjonalnych. Racjonalność zakłada bowiem, że jesteśmy w stanie przewidzieć skutki naszych decyzji; wizja tych skutków pozwala na wybór między decyzjami. Nie znając skutków, jaki jest sens decydować o przyczynach? Stąd – powtórzmy – tytułowy indeterminizm, nasza główna teza. Jak w takiej sytuacji podejmujemy decyzje? Proces ten, znany jako heureka, został opisany w literaturze psychologii społecznej. Jak pisze Cristina Bicchieri [28] polega on na klasyfikacji sytuacji przez porównanie wskazówek – okoliczności i kontekstu - z doświadczeniem przeszłości, w której podobna sytuacja była już napotkana. Proces heureka przebiega bez analizowania argumentów a nawet bez udziału świadomości, i może trwać ułamki sekund. Po sklasyfikowaniu sytuacji aktywizowany jest skrypt, czyli podstawowa teoria sytuacji, zawierająca nasze przekonania, role, preferencje i normy które wobec danej sytuacji powinny być przestrzegane.

Kończąc, nie chcę pominąć okazji do nawiązania do odwiecznej dyskusji implikacji determinizmu dla wolnej woli, w której mają już zwolenników wszystkie możliwe koncepcje [29]. Chciałbym jednak odnotować stanowiska zajęte przez dwóch fizyków. Pierwszym jest Artur Compton; rozważania nad mechaniką kwantową doprowadziły go do wniosku, że zasada nieoznaczoności uwalnia nasze decyzje od determinizmu praw fizyki [30]. Compton, którego drugim powołaniem było nauczanie religii [31], witał ten wniosek z radością jako argument na rzecz wiary w wolną wolę. Drugim jest Włodzisław Duch, profesor fizyki na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu, zajmujący się kognitywistyką i neurofizjologią. Duch powołuje się na fakt, że decyzje podejmowane są w mózgu wcześniej, niż mamy tego świadomość i wnioskuje że wolna wola jest iluzją [32]. Jak widać, argument Ducha jest wsparciem opisu heureka, przytoczonego powyżej. Co do mechaniki kwantowej, świadomie pominęliśmy tu indeterminizm mikroskopowy, aby wyeksponować rolę klasycznej złożoności przyczynowej. Z tego samego powodu pominięty został chaos deterministyczny związany z niestabilnością rozwiązań równań różniczkowych. Czy nasze konkluzje wzmacniają wnioskowanie Comptona? Powiedziałbym, że nie; trudności w ocenie sytuacji nie zwiększają naszych możliwości decydowania. Co do opinii Ducha, dotyczy ona decyzji podejmowanych nieświadomie. Nie podważamy tej opinii w żaden sposób. Naszą tezą jest, że w opisie zjawisk społecznych nawet racjonalne i świadome rozumowanie przeprowadzone w świecie klasycznych i dyskretnych zmiennych napotyka swoiste bariery obliczeniowe i pojęciowe.

Przedstawiłem główne - moim zdaniem - problemy związane z uprawianiem socjofizyki. Fizyk może działać w ramach socjologii empirystycznej, i to się robi. Pułapką na tej drodze jest chęć wiernego opisu wielu zjawisk jednocześnie; jeżeli użyjemy zbyt wielu parametrów, nasz model stanie się nieużyteczny. Kolejnym celem jest nawiązanie do socjologii rozumiejącej, ale tu osiągnąć coś jest bardzo trudno. Na szali zysków jest nadzieja, że można się uwolnić od zachowania określonego deterministycznie, do którego nas skłaniają różne mechanizmy społeczne. Jak to osiągnąć? Co w ogóle jest osiągnięciem w socjologii? Najlepsza odpowiedź, jaką słyszałem, brzmi „trafny opis”. Fizyk, który uprawia socjologię, powinien chyba zaakceptować skromność tego celu.

Podziękowania. Pani dr Małgorzacie Krawczyk jestem wdzięczny za pomoc w przygotowaniu rysunków do tego tekstu.

- [1] S. Galam, Y. Gefen, Y. Shapir, Sociophysics: a new approach of sociological collective behaviour, *J. Math. Sociology* 9 (1982) 1.
- [2] R. K. Merton, The Thomas theorem and the Matthew effect, *Social Forces* 74 (1995) 379.
- [3] D. Quercia, R. Lambiotte, D. Stillwell, M. Kosinski, J. Crowcroft, The personality of popular Facebook users, *CSCW'12 Proceedings of the ACM 2012 Conference on Computer Supported Cooperative Work*, ACM New York, NY, 2012, p. 955.
- [4] L. A. Adamic, N. Glance, The political blogosphere and the 2004 U.S. election: divided they blog, *LinkKDD '05 Proceedings of the 3rd International Workshop on Link Discovery*, ACM New York, NY, 2005, p. 36.
- [5] M. Szell, R. Lambiotte, S. Thurner, Multirelational organization of large-scale social networks in an online world, *PNAS* 107 (2010) 13636.
- [6] C. Castellano, S. Fortunato, V. Loreto, Statistical physics of social dynamics, *Rev. Mod. Phys.* 81 (2009) 591.
- [7] W. Weidlich, The statistical description of polarization phenomena in society, *Br. J. Math. Statist. Psychol.* 24 (1971) 251.
- [8] S. Galam, Sociophysics – a personal testimony, *Physica A* 336 (2004) 49.
- [9] K. Popper, *Społeczeństwo otwarte i jego wrogowie*, Wyd. Nauk. PWN 2007, t.2, s. 132.
- [10] N. Elias, *Czym jest socjologia?* Aletheia 2010, s. 22.
- [11] XVII ISA World Congress of Sociology, Gothenburg, 11-17 lipca 2010.
- [12] P. W. Anderson, More is different, *Science* 177 (4 August 1972) 393.
- [13] B. Edmonds, *Syntactic Measures of Complexity*, PhD Thesis, 1999, University of Manchester, Manchester, UK (bruce.edmonds.name/thesis/).
- [14] S. Wolfram, *Complex system theory*, based on a talk presented at a workshop on “A response to the challenge of emerging syntheses in science” held in Santa Fe, NM, October 6-7, 1984 (www.stephenwolfram.com/pdf/Complex-Systems-Theory-Stephen-Wolfram-Article.pdf)
- [15] J. Kwapien, S. Drożdż, Physical approach to complex systems, *Physics Reports* 515 (2012) 115.
- [16] B. Edmonds, 5 questions about complexity, (bruce.edmonds.name/5qu/be-5qu.html).

- [17] D. Hume, Traktat o naturze ludzkiej, 1739, r. XV
(www.4shared.com/office/rqQScXIp/Hume_David_-_Traktat_o_naturze.html)
- [18] M. Baumgartner, Inferring causal complexity, *Sociological Methods Research*, 38 (August 2009) 71.
- [19] S. Wolfram, *A New Kind of Science*, Wolfram Media, Inc., May 14, 2002.
- [20] G. Bofetta, M. Cencini, M. Falcioni, A. Vulpiani, Predictability – a way to characterize complexity, *Phys. Reports* 356 (2002) 367.
- [21] K. Culik II, Sheng Yu, Undecidability of CA classification scheme, *Complex Systems*, 2 (1988) 177.
- [22] S. Wolfram, Undecidability and intractability in theoretical physics, *Phys. Rev. Lett.* 54 (1985) 735.
- [23] S. Hawking, *Krótką historia czasu*, Zysk I S-ka, 2007.
- [24] P. Spirtes, C. Glymour, R. Scheines, *Causation, Prediction, and Search*, MIT 2000.
- [25] F. V. Jensen, T. D. Nielsen, *Bayesian Networks and Decision Graphs*, Springer 2007.
- [26] D. Helbing, I. Farkas, T. Vicsek, Simulating dynamical features of escape panic, *Nature* 407 (2000) 487.
- [27] J. H. Turner, J. E. Stets, *Socjologia emocji*, Wyd. Nauk. PWN, 2009.
- [28] C. Bicchieri, *The Grammar of Society*, Cambridge UP, 2006, s. 5.
- [29] D. Pereboom, *Living Without Free Will*, Cambridge UP, 2001, s. xix.
- [30] A. H. Compton, The uncertainty principle and free will, *Science* 74 (August 14, 1931) 1911.
- [31] www.aip.org/history/gap/Compton/Compton.html
- [32] Włodzisław Duch, cytowany w A. Wojnar, O mózgu interdyscyplinarnie, „Alma Mater”, nr 134–135, kwiecień-maj 2011, s. 23.

(*) wykład wygłoszony na 42 Zjeździe Fizyków Polskich w Poznaniu, 8-13.09.2013. Tekst złożony do *Postępów Fizyki*.