

Michał Tempczyk

Mechanizmy chaosu

Studia Philosophiae Christianae 38/1, 29-40

2002

Artykuł został zdigitalizowany i opracowany do udostępnienia w internecie przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego. Artykuł jest umieszczony w kolekcji cyfrowej bazhum.muzhp.pl, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.

PRACE PRZEGLĄDOWE

MICHAŁ TEMPCZYK

Wydział Filozofii Chrześcijańskiej, UKSW

MECHANIZMY CHAOSU

Teoria chaosu pozwoliła w nowy sposób spojrzeć na skomplikowane procesy dynamiczne, zachodzące w przyrodzie i w społeczeństwie. Dzięki nowym metodom matematycznym i doświadczalnym oraz możliwościom obliczeniowym, które dają nowoczesne komputery, uczeni z wielu dziedzin nauk przyrodniczych, technicznych i społecznych, opracowali adekwatne modele zjawisk, które do niedawna były zbyt trudne, aby opisać je i wyjaśnić w sposób naukowy. Doprowadziło to do ogromnego postępu tych dziedzin. W niektórych naukach były to zmiany rewolucyjne, dlatego niektórzy zwolennicy teorii chaosu uważają ją za nowy paradygmat całej nauki. Paradygmat ten jest dopełnieniem starego, redukcjonistycznego podejścia do procesów przyrody.

Nie jest możliwe w krótkiej pracy wyliczenie, choćby pobieżne, rodzajów zjawisk uporządkowanych dzięki metodom i wynikom teorii chaosu. Pisałem o tym w innych pracach, starając się zainteresować tą teorią naukowców, pracujących w naukach empirycznych, badających skomplikowane procesy dynamiczne, do których analizy teoria chaosu została stworzona¹. Zamiast rysowania szerokiej panoramy osiągnięć tego nowego podejścia do zjawisk, chcę skupić uwagę na jednym rodzaju procesów, które znane i badane od dawna nie dawały się dokładnie opisać, a wszystkie teorie tworzone na ich temat okazywały się w końcu fałszywe lub zbyt ubogie.

¹ Zob. M. Tempczyk, *Świat harmonii i chaosu*, Warszawa 1995.

Chodzi o mechanizmy powstawania chaosu. Na początku opiszę w sposób poglądowy, o co tu chodzi, aby następnie zanalizować wyniki uzyskane przez uczonych pracujących nad tym zagadnieniem.

Zjawisk skomplikowanych, nieregularnych i chaotycznych obserwujemy wokoło nas wiele. Tak naprawdę niewiele jest procesów, które można opisać i wyjaśnić w prosty, zupełny sposób. Takie wyjątkowo proste procesy były przez kilkadziesiąt lat głównym przedmiotem badań nauk przyrodniczych, ponieważ nauki te we wczesnej fazie swego rozwoju mogły poradzić sobie tylko z takimi zjawiskami, które dawały się opisać w stosunkowo prosty sposób. Jednak prawie w każdej dziedzinie od zjawisk prostych szybko dochodzi się do złożonych i wtedy zaczynają się kłopoty z samym opisem i uporządkowaniem tego, co się obserwuje. Wśród tych skomplikowanych, trudnych do zrozumienia zjawisk szczególnie ciekawy i prowokujący jest pewien ich typ, który jest przedmiotem tego artykułu. Są to zjawiska, w których mamy do czynienia zarówno z dynamiką prostą, dającą się stosunkowo łatwo opisać, jak i z dynamiką nieregularną, burzliwą, której opis do niedawna wykraczał poza możliwości nauk empirycznych. Dobrym przykładem takiego zjawiska jest ruch wody w regularnym korycie lub w rurze. Przy małej prędkości wody ruch ten jest regularny, zgodny z prostymi prawami dynamiki. Cząsteczki wody poruszają się po liniach prostych, równoległych do osi rury, a ich prędkość w regularny sposób rośnie od zera przy samej rurze, do prędkości maksymalnej w środku. Jednak w pewnym momencie, gdy prędkość wody przekroczy określoną wartość graniczną, ruch ten staje się gwałtowny i burzliwy. Pojawiają się w nim zawirowania niszczące początkową regularność i prostotę tego ruchu. Ten nieregularny ruch cieczy nosi nazwę ruchu turbulentnego lub turbulencji.

Turbulencja była od około dwustu lat badana przez inżynierów. Wyjątkowo silne zainteresowanie tym zjawiskiem miało dwie ważne przyczyny. Pierwsza przyczyna ma charakter praktyczny. Wszystkie pojazdy, poruszające się na ziemi, w wodzie i w powietrzu, oddziałują z otaczającym je ośrodkiem i doznają tarcia hamującego ich ruch. Przy stosunkowo wolnym ruchu, tarcie to jest małe i ruch pojazdu odbywa się w regularny, gładki sposób. Jednak przy prędkościach większych, gdy w otaczającym ośrodku, na przykład w wodzie, pojawiają się zawirowania, siły hamujące ruch szybko rosną, a w przypadku samolotów ich działanie może nawet doprowadzić

do katastrofy. W związku z tym dla inżynierów budujących pojazdy ważne było zrozumienie, w jaki sposób pojawia się ruch turbulentny, jak zależy on od kształtu ciała i jak można przeciwdziałać jego negatywnym skutkom. Pracując nad tym problemem, uczeni wymyślili kilka teorii, lecz były one niewystarczające i do niedawna, chcąc dowiedzieć się, jak będzie poruszał się nowy typ samolotu, trzeba było budować jego zmniejszony model i badać go w tunelu aerodynamicznym. Teoria była zbyt słaba, aby na jej podstawie można było precyzyjnie przewidywać dynamikę oddziaływania samolotu z powietrzem go otaczającym.

Drugim podstawowym powodem zainteresowania turbulencją, tym razem teoretycznym, była wielka regularność pojawiania się tego ruchu. Okazało się, że regularny ruch cieczy zamienia się w ruch turbulentny przy określonej wartości liczby Reynoldsa. Liczba Reynoldsa to bezwymiarowa wielkość, określająca stosunek sił bezwładności cieczy do sił lepkości. Jest ona zadana wzorem: $Re = vl/\nu$, gdzie v to prędkość cieczy, l – wymiar liniowy charakteryzujący geometrię układu (dla ruchu w rurze jest to średnica tej rury), a ν to współczynnik lepkości dynamicznej². W tym wzorze zmienną zależną od eksperymentatora jest v – prędkość cieczy. Nazywa się ją ogólnie zmienną kontrolną, lub parametrem kontrolnym, ponieważ od niej zależy rodzaj dynamiki układu i eksperymentator może wpływać na jej liczbową wartość, na przykład przykręcając lub odkręcając kran. Eksperymentator zaczyna doświadczenie od dosyć małych prędkości, dla których ruch jest regularny. Podwyższając prędkość, dochodzi do liczby Reynoldsa krytycznej dla tego ruchu i nagle powstaje turbulencja, czyli całkowicie nowy rodzaj zachowania się cieczy. Ciecz poruszająca się dotychczas w regularny, ukiepunkowany sposób, zaczyna lokalnie wirować, poruszać się w kierunku poprzecznym, co silnie hamuje jej przepływ. Dla cieczy lepkiej, płynącej w cylindrycznej rurze o przekroju kołowym, krytyczna wartość liczby Reynoldsa wynosi około 2200. Z teoretycznego punktu widzenia najważniejsze jest to, że istnieje taka dobrze określona wartość krytyczna, uniwersalna dla przepływów w naczyniu o zadanym kształcie. Na tej podstawie uczeni domyślali się, że ruch turbulentny powstaje w pewien ustalony sposób, podlegający określonym

² Zob. *Encyklopedia Fizyki*, t. III, Warszawa 1974, 177.

regularnościom. Odkrycie mechanizmu powstawania turbulencji było wielkim wyzwaniem dla fizyków. Chcieli oni stworzyć teorię powstawania ruchu chaotycznego w takim układzie. Był to jeden z najważniejszych i najtrudniejszych problemów hydrodynamiki. Długa historia tych poszukiwań jest opisana w monografii Chandrasekhara³. Niezależnie od wielu osiągnięć na tej drodze, końcowy wynik był jednak pesymistyczny – zadowalającej teorii turbulencji nie udało się sformułować, chociaż pracowali nad nią uczeni tej klasy co L. Landau. Doprowadziło to do pesymizmu wśród uczonych, którzy przestali wierzyć w to, że teoria turbulencji jest w ogóle możliwa. Gleick przytacza w swojej popularnej książce, poświęconej teorii chaosu, anegdotę o Wernerze Heisenbergu, który na łożu śmierci miał powiedzieć, iż chciałby zadać Panu Bogu dwa pytania, pierwsze dotyczące turbulencji, a drugie teorii względności. W następnej chwili Heisenberg dodał jednak, że spodziewa się odpowiedzi tylko na drugie pytanie. Poznanie mechanizmu powstawania turbulencji uznał za zbyt trudne nawet dla Stwórcy wszechświata⁴.

Turbulencja jest najlepiej znanym i najdłużej badanym procesem tego rodzaju. Nagłe przejście od dynamiki regularnej do chaotycznej zachodzi w wielu rodzajach zjawisk: w reakcjach chemicznych, ruchu podgrzewanej cieczy, zjawiskach atmosferycznych itp. Podobieństwo tego przejścia dla odmiennych zjawisk sugerowało, że mechanizm przejścia jest ten sam. Mechanizmu tego nie udało się jednak zrozumieć, ponieważ brak było odpowiedniej teorii. Sytuacja zmieniła się w ostatnim ćwierćwieczu. Po pierwsze, poznano i dokładnie opisano kilka rodzajów pojawiania się chaosu w układach dynamicznych. Po drugie, sformułowano kilka teorii opisujących te zjawiska, zwanych scenariuszami przejścia do chaosu. Zacznę od krótkiego omówienia dokładnych pomiarów, dzięki którym można było zebrać materiały empiryczne o wiele dokładniejsze od dawnych.

Napisałem powyżej, że turbulencja jest zjawiskiem dobrze znanym i częstym w przyrodzie, dlatego była od dawna badana przez fizyków i inżynierów. Zajmujący się nią uczeni badali te procesy,

³ Zob. S. Chandrasekhar, *Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability*, Oxford 1961.

⁴ Zob. J. Gleick, *Chaos: narodziny nowej nauki*, tłum. z ang. P. Jaśkowski, Poznań 1996, 131.

które znamy z codziennych obserwacji przyrody: przepływ wody w rurach, ruch ciała w powietrzu, gwałtowne zmiany siły i kierunku wiatru. Jedną z przeszkód w dokładnym eksperymentalnym badaniu takich zjawisk jest to, że zachodzą one w dużych układach, złożonych z wielu składników, których ruch i działanie trudno jest dokładnie zaobserwować i pomierzyć. Dobrym przykładem takiego trudnego do badania obiektu jest model samolotu obserwowany w tunelu aerodynamicznym. Dokładny pomiar działających na samolot sił i występujących w nim naprężeń wymaga założenia tysięcy czujników, za pomocą których mierzy się siły działające w poszczególnych kawałkach układu. Z masy uzyskanych tą drogą informacji trudno stworzyć dokładny ilościowy obraz tego, co dzieje się z lecącym samolotem.

Około trzydziestu lat temu kilku fizyków postanowiło dokładnie przyjrzeć się chaotycznym zjawiskom zachodzącym w różnych sytuacjach, a nowością w ich podejściu do tego zagadnienia było to, że zaczęli obserwować układy bardzo małe i proste, dzięki czemu ich wyniki były niezwykle dokładne i dawały pełny obraz tego, co działo się w tych układach. Różnicę między podejściem tradycyjnym, a tym nowym można metaforycznie opisać jako różnicę między pełną podziwu obserwacją rwącej rzeki górskiej, a dokładnym przyglądaniem się przepływowi wody w małym strumyku. W strumyku możemy oczywiście dostrzec znacznie mniej niż w rzece, ale za to nasze obserwacje i pomiary są znacznie dokładniejsze i pełniejsze. Dwa eksperymenty tego typu miały największy wpływ na rozwój teorii chaosu, dlatego warto są opisać.

Pierwsze doświadczenie wykonali w 1973 roku Harry Swinney i Jerry Gollub⁵. Postanowili oni zbudować prosty układ dynamiczny i zbadać, jak pojawiają się w nim zaburzenia, gdy jego ruch staje się coraz szybszy. W tym celu zbudowali szklany cylinder, o wymiarach 30 cm wysokości i 5 cm średnicy, w który włożyli cylinder ze stali. Między obu cylindrami była przerwa o szerokości 3 mm, w którą wlewano wodę. Doświadczenie polegało na tym, że środkowy cylinder kręcił się, a obaj fizycy obserwowali powodowany przez niego ruch wody uwięzionej między obu cylindrami. Ruch ten był zbadany w 1923 roku i nosił nazwę przepływu Couette'a–Taylora. Specja-

⁵ Zob. Tamże, 131–142.

liści od dynamiki cieczy dobrze wiedzieli, że początkowo ruch cieczy jest gładki, a w miarę wzrostu prędkości cylindra środkowego robi się coraz bardziej skomplikowany. Z tego powodu nie spodziewali się oni żadnych rewelacji. Gollub i Swinney mieli jednak do swej dyspozycji wiele dokładniejsze przyrządy pomiarowe. Ruch wody obserwowali za pomocą wiązki spolaryzowanego światła laserowego, dzięki czemu mogli dokładnie określić, jaki jest ruch cieczy w poszczególnych obszarach. Cieczy tej było mało i miała małe możliwości ruchu, dlatego powstał obraz jasny i precyzyjny. Eksperymentatorzy chcieli potwierdzić teorię Landaua powstawania turbulencji. Teoria ta przewidywała, że w wyniku rosnącej prędkości wody pojawiają się w niej kolejno oscylacje o coraz wyższych częstościach. Obserwacje pokazały jednak jasno, że niekontrolowany, burzliwy ruch powstaje nagle, bez pośredniczącego stanu przewidywanego przez Landaua.

Podobny eksperyment wykonał w 1977 roku Albert Libchaber⁶. Był on specjalistą od niskich temperatur i nadprzewodnictwa, dlatego, gdy zainteresował się przejściami fazowymi, postanowił zbadać, jak zachowuje się mała ilość ciekłego helu, podgrzewanego w pojemniku stalowym, mieszczącym się w pudełku od zapatek. Sam hel znajdował się w komórce o szerokości 1 mm. Konwekcyjny ruch cieczy rozpoczynał się przy różnicy temperatur między dnem a górą równej jednej tysięcznej stopnia. Libchaber obserwował, co dzieje się z helem, gdy różnica ta staje się coraz większa. Najpierw pojawiły się oscylacje o okresie około dwóch sekund. Później powstały oscylacje dwa razy częstsze, następnie cztery razy częstsze i tak dalej. Libchaber nie wiedział, jak zinterpretować swoje wyniki, ponieważ żadna ze znanych mu teorii nie przewidywała takiego zachowania cieczy i dopiero dzięki spotkaniu z Feigenbaumem w 1979 roku zrozumiał, że badany przez niego układ zachowuje się zgodnie z odkrytym przez Feigenbauma scenariuszem bifurkacji. Tak oto po raz pierwszy udało się dokładnie pomierzyć dynamikę układu tak prostego, że jego zachowanie dokładnie odpowiadało teoretycznemu schematowi odkrytemu przez fizyka, który nie miał żadnego kontaktu z doświadczeniem, a swojego odkrycia dokonał tylko bawiąc się kalkulatorem. Z powodu swej prostoty teoria bifur-

⁶ Zob. Tamże, 199–218.

kacji Feigenbauma jest najlepiej poznaną drogą pojawiania się chaosu. Opisuje ona wiele rodzajów układów zbadanych empirycznie. Nie będę wyjaśniał jej istoty, zainteresowanego czytelnika odsyłając do popularnych prac o teorii chaosu⁷.

Od czasu tych pionierskich prac w dziedzinie badania układów o nieregularnej dynamice dokonał się ogromny postęp i obecnie wiedza o mechanizmach powstawania chaosu jest bardzo bogata, zarówno w aspekcie teorii, jak i doświadczenia. Fizycy opracowali kilka teoretycznych modeli scenariuszy pojawiania się chaosu i o nich będzie teraz mowa⁸. Zacznę od intermitencji.

Intermitencja jest ciekawym rodzajem przejścia od ruchu uporządkowanego do burzliwego, ponieważ przeplatają się w niej oba rodzaje ruchu. Weźmy pod uwagę układ, w którym zmieniamy parametr kontrolny r , przez co zmienia się sposób działania układu. W przypadku dynamiki cieczy podgrzewanej od spodu, parametrem kontrolnym jest różnica temperatur między dnem a górą cieczy. Przy małej wielkości parametru kontrolnego ruch jest uporządkowany. Po podwyższeniu wielkości parametru i przekroczeniu wielkości krytycznej r_{kr} ruch układu staje się nieregularny, jest to jednak nieregularność bardzo specyficzna. Polega ona na tym, że przeważa działanie regularne, a od czasu do czasu następuje okres działania nieuporządkowanego. Potem znowu mamy działanie regularne – nieregularne – regularne itd. Na początku, gdy różnica wartości parametru kontrolnego i wartości krytycznej jest niewielka, okresy ruchu nieregularnego są krótkie, natomiast przeważa ruch regularny. Dalszy wzrost wartości parametru kontrolnego powoduje powiększenie ilości ruchu nieregularnego; staje się on coraz częstszy i trwa coraz dłużej. W końcu mamy tylko ruch nieregularny, czyli całkowicie chaotyczny.

Intermitencję można opisać jako stopniowe przechodzenie od porządku do chaosu. Jest ona pod tym względem odmienna od innych scenariuszy przechodzenia do chaosu i nie może do niej, na przykład, należeć ruch cieczy badany przez Swinneya i Golluba, ponieważ w tym przypadku nie było żadnego okresu przejściowego, w którym oba rodzaje ruchu występowałyby na przemian. W 1979

⁷ Zob. np. Tamże, rozdz. pt. *Uniwersalność*; M. Tempczyk, dz. cyt., rozdz. 5.

⁸ Zob. H. G. Schuster, *Chaos deterministyczny. Wprowadzenie*, tłum. z ang. P. Peplowski, K. Stefański, Warszawa 1993, rozdz. 6.

roku dwaj fizycy francuscy, P. Menneville i Y. Pomeau dokładnie zbadali równania Lorenza i stworzyli w następnym roku ogólną teorię intermitencji⁹, pokazując, że istnieją trzy rodzaje tego ruchu, zależne do tego, w jaki sposób wartość parametru dynamicznego zależy od wartości poprzedniej. Nie będę wchodził w szczegóły matematyczne, ponieważ są one zbyt trudne na pracę filozoficzną. Można je znaleźć w cytowanej książce Schustera¹⁰. Rodzaje te zostały nazwane intermitencją typu I, II i III. Te ciekawe i ogólne wyniki teoretyczne stały się punktem wyjścia dla dalszych prac matematycznych i do poszukiwań realnych układów, których dynamika może być opisana przez jeden z modeli intermitencji. Schuster podaje w swojej książce, wydanej w roku 1988, że znaleziono eksperymentalnie tylko układy zgodne z rodzajami I i III.

Ostatnim omawianym przez Schustera scenariuszem jest model opracowany w roku 1978 przez Ruelle'a, Takensa i Newhouse'a, noszący imię swoich twórców. Model ten jest rozszerzeniem na trzy wymiary bifurkacji Hopfa. Jest on prosty matematycznie. Pokazuje, że pojawienie się w układzie trzech niezależnych od siebie drgań harmoniczych może doprowadzić do chaosu całości, ponieważ drgania te przeplatają się ze sobą. Bardzo szybko stwierdzono, że kilka dobrze znanych układów, na przykład układ badany przez Swinneya i Golluba, należy do tej klasy. Tak więc w książce Schustera opisane są trzy rodzaje przejścia do chaosu: scenariusz bifurkacyjny Feigenbauma, intermitencja i scenariusz Ruelle'a-Takensa-Newhouse'a.

Uczni wcióż pracowali intensywnie nad tym zagadnieniem, dlatego w wydanej 5 lat później książce Otta na problem przejścia od ruchu regularnego do chaotycznego patrzy się z szerszej perspektywy, ponieważ w międzyczasie odkryto inne scenariusze tego zjawiska. Polegają one głównie na tym, że układ dynamiczny posiada atraktor, którego kształt i porządkujący wpływ na dynamikę układu może ulec zmianie, gdy zmieniamy wartość parametru kontrolnego. Takie gwałtowne zmiany nazywane są kryzysami¹¹.

⁹ Zob. P. Manneville, Y. Pomeau, *Different Ways to Turbulence in Dissipative Dynamical Systems*, Physica 1D(1980), 219.

¹⁰ Zob. H. G. Schuster, dz. cyt., 88.

¹¹ Zob. E. Ott, *Chaos w układach dynamicznych*, tłum. z ang. S. Jankowski, Warszawa 1997, rozdz. 8.

Ott wymienia następujące rodzaje zmian dynamiki, spowodowane wzrostem wartości parametru kontrolnego, które prowadzą do pojawienia się działania chaotycznego, lub do zmiany rodzaju tego działania:

„– Jeżeli zmienia się parametr układu, to pojawia się atraktor chaotyczny.

– Jeżeli zmienia się parametr układu, to tworzy się przejście chaotyczne w sytuacji wyjściowej, w której istniały tylko orbity niechaotyczne.

– Jeżeli zmienia się parametr układu, to brzegi zbioru przyciągania, które nie miały struktury fraktalnej, stają się fraktalami.

– Jeżeli zmienia się parametr układu, to zmienia się charakter problemu rozpraszania z niechaotycznego na chaotyczny.

– Jeżeli zmienia się parametr układu, to rozmiar zbioru chaotycznego doznaje nagłych skoków w przestrzeni fazowej (zbiór nie musi być atraktorem, np. mógłby też być fraktalnym brzegiem zbioru przyciągania)”¹².

Scenariusze przejścia do chaosu opisane w książce Schustera należą do dwóch pierwszych rodzajów wymienionych przez Otta. Pozostałe trzy rodzaje są nowe. Mamy w nich do czynienia z sytuacjami jeszcze bardziej skomplikowanymi niż omawiane przez Schustera. Najciekawszy jest rodzaj ostatni – nagła zmiana rozmiaru zbioru chaotycznego. Jest to proces, w którym istniejący w układzie ruch chaotyczny gwałtownie zmienia swoje własności. Nie będę omawiał tych skomplikowanych i trudnych do zrozumienia zagadnień bardziej szczegółowo, ponieważ praca ma charakter ogólny; zamiast tego opiszę sytuację z metodologicznego punktu widzenia.

Zastanawiając się nad logiczną strukturą teorii wyjaśniających różne rodzaje przejść od ruchu regularnego do chaotycznego, łatwo zauważymy, że teorie te mają inną budowę formalną od klasycznych teorii dynamicznych. Różnica ta polega na tym, że w scenariuszach chaosu występuje dodatkowy poziom wyjaśniania. Aby to zrozumieć, opiszmy na początku schemat wyjaśniania klasycznej teorii dynamicznej, na przykład teorii ruchu planet. W teorii tej dana jest uniwersalna siła grawitacji, której wpływ na ruch planet i Słońca opisany jest przez równania ruchu zawierające tę siłę. Roz-

¹² Tamże, 307.

wiążąc te równania otrzymujemy ogólny wzór na orbity planet. Wstawiając do tego wzoru dane początkowe wybieramy jedną z możliwych orbit, otrzymując w ten sposób tor określonej planety, który możemy porównywać z obserwacjami ruchu tej planety na sferze niebieskiej. Jest to powszechnie stosowany sposób postępowania. Podobnie liczy się orbity innych ciał, na przykład pocisków, sztucznych satelitów, zderzających się kul itp.

Powszechnie tworzone i stosowane w nauce teorie dynamiczne mają więc budowę dwustopniową. Na poziomie podstawowym znajdują się równania ruchu, do których wstawia się siły i warunki dynamiczne charakterystyczne dla danego modelu ruchu. Otrzymuje się dzięki temu klasę rozwiązań, zawierającą wszystkie możliwe ruchy danego typu układów. Ucząc fizyki w szkole lub na studiach, zatrzymujemy się często na tym etapie opisu danych układów, ponieważ jest w nim zawarta pełna informacja o rodzaju ruchu, jaki się w nich odbywa. Na przykład, rozwiązując równania Newtona z siłą grawitacji i przyjmując pewne upraszczające założenia, dowiadujemy się, że ruch planet odbywa się wokół Słońca po eliptycznych orbitach. Możemy ponadto wyprowadzić dwa pozostałe prawa Keplera. Jednak astronomowi, który chce wiedzieć, jak porusza się konkretna planeta, te ogólne rozwiązania nie wystarczą. Chce on znać jedno, interesujące go rozwiązanie. Uzyskuje je poprzez wstawienie do ogólnego wzoru na rozwiązania warunków początkowych lub brzegowych, uzupełniających informację o danym układzie i wybierających go z całego zbioru możliwych układów podobnych. Jest to drugi poziom wyjaśniania; otrzymuje się na nim jedno konkretne rozwiązanie, które powinno być opisem ruchu danego układu. Rozwiązanie to można wykorzystać w obserwacjach do odtworzenia ruchu planety na sferze niebieskiej.

Tak opisuje się i wyjaśnia działanie regularnych, stabilnych układów dynamicznych, znanych z fizyki szkolnej lub uniwersyteckiej. Dla układów skomplikowanych, zachowujących się w nieregularny, chaotyczny sposób, taki opis nie wystarczy. Nie można ich potraktować jak drobnych ciał, zajmujących mały obszar przestrzeni i poruszających się po jednoznacznie zadanej trajektorii. Skomplikowany układ dynamiczny zajmuje obszar nie dający się w sensowny sposób opisać za pomocą kilku liczb. Jest to proces rozciągły, w którego działaniu zachodzi wiele lokalnych procesów tworzących skomplikowaną całość. Wyjaśnienie globalnych sposobów zacho-

wania się tej całości wymaga stworzenia w modelu jeszcze jednego, wyższego poziomu abstrakcji. Na tym poziomie, znając lokalny sposób zachowania się drobnych składników układu, wyciągamy teoretyczne wnioski na temat działania całości. Na przykład, znając dynamikę lokalnego przenoszenia ciepła w podgrzewanej cieczy, tworzymy model sposobu, w jaki poruszać się będzie cała ciecz. W cieczy tej powstają ciekawe struktury dynamiczne: fale, drgania, rolki itp. Struktury te obserwuje się i porównuje z przewidywaniami teoretycznymi. Przewidywania te nie dotyczą pojedynczych dynamik składników, ponieważ nie są one obserwowalne, lecz zachowania złożonej z nich całości. Na przykład, w teorii intermitencji wyjaśnia się, jak pojedyncza orbita w określonych warunkach zmienia sposób swego przebiegu i ta zmiana jest przedmiotem badań. Nie porównujemy przewidywanych i obserwowanych położenia ciała na orbicie, lecz opisujemy i mierzymy sposób zachowania się całej orbity. To przejście od wiedzy o orbitach pojedynczych do wiedzy o własnościach ich klas stanowi istotną cechę dynamiki nieliniowej, różniącą ją od klasycznej dynamiki pojedynczych stabilnych układów.

Z tego powodu teoria chaosu korzysta z nowych sposobów podejścia do ruchu. Zamiast rozwiązywać równania bada się w niej własności całych klas rozwiązań. Wymaga to analizy w przestrzeni wszystkich możliwych rozwiązań. Podstawową rolę w tych badaniach odgrywa przestrzeń fazowa i jakościowa teoria równań różniczkowych. Sto lat temu fizycy byli dumni z tego, że potrafili rozwiązać trudne równania różniczkowe i że otrzymane rozwiązania były zgodne z obserwacjami. Obecnie rozwiązywanie równań także stanowi ważne zadanie wielu teorii, lecz obok niego bada się problemy związane z ogólnymi własnościami rozwiązań, takimi jak stabilność, istnienie atraktorów, regularność lub chaotyczność ruchu. Jest to dla metodologa nauki nowy rodzaj teorii empirycznych, w których wnioski dokonuje się na dwóch poziomach. Z tego powodu modele tworzone w teorii chaosu warte są szczegółowych analiz metodologicznych.

Trudno potraktować dzisiaj wyniki, dotyczące mechanizmów powstawania chaosu, jako jedną spójną teorię. Jest to obszerny i różnorodny dział badań, które łączy nieregularny, skomplikowany rodzaj działania, pojawiającego się w układzie, który do pewnej chwili działa regularnie. Dotychczasowe wyniki są obiecujące. Pokazują one, że można, co najmniej w pewnych sytuacjach, wyprowadzić to

skomplikowane działanie z prostych praw ruchu, zastosowanych do układów złożonych. Matematycy i fizycy powoli uczą się składać proste ruchy w skomplikowaną całość. Wyróżniono kilka rodzajów tego składania, opisanych przez poszczególne scenariusze chaosu. W związku z tym można zadać pytania o przyszłość tych badań: Czy uda się uczonym sformułować teorię uniwersalną, klasyfikującą wszystkie możliwe rodzaje przejść do chaosu? Czy teoria ta potrafi opisać wszystkie obserwowane w naukach empirycznych rodzaje takich przejść? Po dokładnym zaznajomieniu się z dynamiką chaotyczną układów rzeczywistych uczeni mogą odkryć rodzaje takich przejść nie dające się ująć w jeden schemat wyjaśniający. Wówczas teoria opisywałaby kilka nieporównywalnych ze sobą scenariuszy, tak jak to jest obecnie. Może się także okazać, że bogactwo zjawisk przyrody jest większe od bogactwa modeli teoretycznych. Coraz dokładniej poznając jakąś dziedzinę zjawisk przyrody, dostrzegamy nie tylko ich jedność, lecz także zaczynamy rozumieć różnice między nimi. Różnice te mogą mieć zasadnicze znaczenie.

Na te pytania nie ma oczywiście dzisiaj odpowiedzi ani nie wiadomo, jak odpowiedź ta będzie wyglądać w przyszłości. Jest to szybko rozwijająca się dziedzina badań, daleka od dojrzałości i kompletności i dzięki temu zagadnienie mechanizmów jest tak ciekawe dla filozofa nauki.

KRZYSZTOF WÓJTOWICZ

Institut Filozofii, UW

PLATONIZM GÖDLA A „QUASI-EMPIRYZM” QUINE’A – PRÓBA PORÓWNIANIA

We współczesnej dyskusji na temat ontologii matematyki, najczęściej dyskutowanymi argumentami na rzecz realizmu są argumenty pochodzące od Gödla i Quine’a. Celem niniejszego artykułu jest porównanie zasadniczych cech tych koncepcji. Nie stanowi on całościowej prezentacji stanowisk Gödla i Quine’a, ale jest jedynie porównaniem pewnych ich aspektów – dotyczących filozofii matematyki.