

Michał TEMPCZYK

Uniwersytet im. Kard. Stefana Wyszyńskiego
Warszawa

SKALE CZASU UKŁADÓW NIELINIOWYCH

Podstawowym zadaniem nauki jest porządkowanie i wyjaśnianie zjawisk, zachodzących w otaczającym nas świecie. Uczeni dokonują tego tworząc teorie odpowiednich klas zjawisk. Teorie te mają różny stopień ogólności i uniwersalności. Dla rysowanego przez naukę obrazu świata najważniejsze są podstawowe teorie fizyczne, formułujące prawa rządzące powszechnymi procesami przyrody. Rozwój nauki prowadzi niekiedy do rewolucji naukowych, w wyniku których zmieniają się teorie podstawowe, co w rezultacie powoduje zmiany w naukowym obrazie świata. Obecnie w nauce zachodzi taka zmiana związana z powstaniem i rozwojem dynamiki nieliniowej, zwanej popularnie teorią chaosu. W swoim referacie chciałbym zastanowić się nad jednym aspektem tego procesu, mianowicie nad koncepcją czasu fizycznego. Moim celem jest pokazanie, że poznanie własności niecałkowalnych, nieliniowych układów dynamicznych, wzbogacając i zmieniając nasze poglądy na dynamikę całości Wszechświata oraz najważniejszych rodzajów procesów zachodzących w materii, prowadzi do innego spojrzenia na czas i jego rolę w obrazie świata.

Dominujący w końcu XIX wieku obraz rozwoju materii był dosyć monotony, ponieważ mechanika klasyczna badała głównie układy całkowne, w których ruch jest regularny, a czas jest jedynie parametrem porządkującym stany. Najbardziej wyrafinowany formalnie etap tego kierunku badań, teoria Jacobiego-Hamiltona, miała za zadanie znaj-

*UWAGA: Tekst został zrekonstruowany przy pomocy środków automatycznych; możliwe są więc pewne błędy, których sygnalizacja jest mile widziana (obi@opoka.org). Tekst elektroniczny posiada odrębną numerację stron.

dowanie takich uogólnionych współrzędnych i pędów, w których ruch układu staje się powtarzalnym ruchem okresowym. W takich układach nie dzieje się nic istotnie nowego, ponieważ po pewnym czasie układ powraca dokładnie do tego samego stanu, bez końca powtarzając jeden cykl dynamiczny.

Dwie rewolucyjne teorie fizyczne początku XX wieku w różnym stopniu zmieniły ten obraz. Fizyka kwantowa pozwoliła zrozumieć istotę procesów zachodzących w gwiazdach, dzięki którym gwiazdy mogą przez miliardy lat hojnie wysyłać energię do otaczającej je przestrzeni, a ponadto w ich wnętrzu powstają jądra pierwiastków cięższych od helu. Astronomowie poznali kolejne fazy rozwoju gwiazd, od początkowej koncentracji materii, aż do wypalenia się całego wodoru i ostatecznego oziębienia. Okazało się, że gwiazdy mają swoją historię i astrofizycy poznali jej najważniejsze etapy.

Konsekwencją zastosowania ogólnej teorii względności do opisu Wszechświata była teoria Wielkiego Wybuchu, dzięki której czas przestał być w skali kosmicznej jedynie parametrem numerującym powtarzalne, podobne do siebie stany materii. Uczni zrozumieli, że Wszechświat rozwija się i ma swój niepowtarzalny cykl rozwoju. Jego historia toczy się jednak w ogromnej skali miliardów lat i nie ma swego odbicia w tym, co obserwujemy i poznajemy w ludzkiej skali czasu, a co na pewno nie przypomina monotonnego tykania mechanicznego zegara. Dynamikę i nieodwracalny, twórczy charakter zjawisk zachodzących w przyrodzie w różnych skalach czasu, od ułamków sekund do dziesiątków milionów lat, zaczynamy dopiero od niedawna rozumieć dzięki teorii chaosu.

W niecałkowalnych układach chaotycznych rola czasu jest inna niż w klasycznych układach zachowawczych. Zachodzą w nich jednocześnie dwa procesy niszczące jednorodność czasu i nadające mu określoną skalę: rozpraszania i gubienia informacji początkowej, oraz pojawiania się całościowego uporządkowania, w znacznym stopniu niezależnego od charakteru oddziaływań lokalnych, wynikającego z istnienia atraktora w przestrzeni fazowej układu.

Pierwszy proces ma charakter destrukcyjny i jest charakterystyczny dla działania układów o nieregularnej dynamice, gwałtownie i często zmieniających kierunek ruchu w przestrzeni fazowej. Zmiany te mogą być, na przykład, skutkiem częstych wzajemnych zderzeń cząsteczek gazu, lub odbijania się kuli bilardowej od ścianki stołu o odpowiednim kształcie. Matematycy opisali kilka rodzajów układów, których ruch jest kapryśny i niestabilny w stopniu prowadzącym do szybkiego zagubienia informacji o początkowym punkcie danej trajektorii. Jeżeli wybierzemy szczególne warunki początkowe, nadając układowi określone własności dynamiczne, to jego nieregularne działanie spowoduje zgubienie informacji o tych warunkach, a jego trajektoria zacznie przypominać trajektorie sąsiednie, stając się w ten sposób „typową” historią układu danego typu. Miarą tempa gubienia informacji o przebiegu trajektorii jest entropia metryczna zdefiniowana przez Kołmogorowa w roku 1958. Jest ona miarą stopnia nieregularności procesu. Układy o niezerowej entropii nazywane są w teorii ergodycznej mieszającymi. Wartość liczbowa entropii określa czasowy horyzont wiarygodnych przewidywań, opartych na rozwiązaniach danych równań dynamicznych. Im większa entropia, tym krótszy jest okres przewidywań pozostających w ramach dopuszczalnych błędów. W niestabilnym układzie o niezerowej entropii, początkowe drobne błędy znajomości jego stanu dynamicznego w wykładniczy sposób rosną z upływem czasu. Na przykład, dla przekształceń okręgu $T: x \Rightarrow 2x$, każdy krok dwukrotnie powiększa odległości między punktami, a entropia Kołmogorowa tego układu równa jest $\ln 2$.

Drugi proces, pojawianie się atraktora, może zachodzić tylko w układach niezachowawczych, w których nie obowiązuje prawo zachowania energii. Polega on na tym, że różne trajektorie, początkowo bardzo odległe, w miarę upływu czasu zbliżają się do pewnego wyróżnionego obszaru przestrzeni fazowej, zwanego atraktorem, a przez to także do siebie, stając się przez to podobne. Lokalny charakter ruchu zależy od rodzaju atraktora. Jeżeli atraktor jest regularny, jest na przykład punktem lub cyklem granicznym, to trajektorie znajdujące się w jego obszarze także są regularne. Ruch na atraktorze chaotycznym

może być nieregulany, zachodzi jednak w bardzo małej części całej przestrzeni fazowej, dlatego w skali całości pojawia się wyraźnie określony schemat zachowania, dobrze znany dzięki przykładom takim jak atraktor Lorenza lub Rosslera. W układzie Lorenza atraktor tworzą dwa dwuwymiarowe obszary przypominające listki. Każdy z tych listków składa się z nieskończonej liczby powierzchni położonych bardzo blisko siebie, tak blisko, że praktycznie na ekranie komputera są one nieodróżnialne ze względu na skończoną rozdzielczość obrazu. Ruch układu przebiega w regularny sposób po jednym z nich, a trajektoria w nieregularny, nieprzewidywalny sposób przeskakuje z jednego listka na drugi. Atraktor Rosslera, prostszy i łatwiejszy do opisu niż atraktor Lorenza, tworzy charakterystyczną wstążkę, wygiętą do góry w kierunku osi z . Atraktory są wzorcami działania układu i nadają one jego dynamice określoną regularność i rytm.

Najprostsze atraktory oprócz punktów to cykle graniczne, charakterystyczne dla dwuwymiarowej przestrzeni fazowej. Dzięki nim pojawiają się w układzie wyróżnione częstości drgań, często obserwowane w oscylatorach nieliniowych. Odgrywają one ważną rolę w radiotechnice, ponieważ dzięki nim stacje radiowe mają ustaloną, stabilną częstość wysyłanych fal.

Oba procesy, rozpraszania uporządkowania i jego powstawania oraz rozwoju, mają swoje skale czasowe, zależne od fizycznych właściwości układu i prędkości zachodzących w nim zjawisk. Przyjrzymy się teraz tym skalom i ich wzajemnym powiązaniom, omawiając kilka najlepiej znanych rodzajów procesów nieliniowych. Zaczniemy od krótkiego wyliczenia zjawisk porządkujących, przebiegających w różnego rodzaju układach dynamicznych.

Szeroką klasą procesów nieliniowych, w których powstają dynamiczne, całościowe rodzaje uporządkowania są reakcje chemiczne. Ich najlepiej znanym przykładem jest reakcja Biełousowa-Żabotyńskiego, odkryta przez Biełousowa w 1958 roku. W reakcji tej powstają naprzemiennie rozchodzące się fale koloru czerwonego i niebieskiego. Reakcja ta, po zmieszaniu początkowych składników trwa kilka minut, natomiast w odpowiednim mieszalniku, do którego dostarczane

są związki pierwotne i odprowadzane są produkty reakcji, może przebiegać dowolnie długo. Gdy Biełousow odkrył tę reakcję, chemicy powszechnie wierzyli, że cykliczne procesy chemiczne są zabronione przez prawa termodynamiki i redaktorzy czasopism chemicznych nie chcieli wydrukować doniesienia Biełousowa o jego odkryciu. Obecnie znanych jest wiele nieliniowych reakcji chemicznych, a ich przebieg jest starannie badany. Na przykład, dokładne obserwacje stężenia jonów cezu w reakcji Biełousowa-Żabotyńskiego ujawniły, że zmienia się ono zgodnie z jednowymiarowym odwzorowaniem opisanym przez Simony'ego w roku 1982.

Okresowe reakcje chemiczne są podstawowym składnikiem procesów zachodzących w organizmach żywych, a ponadto odegrały one ważną rolę w procesie powstawania życia na Ziemi. Stworzona przez M. Eigena teoria hipercykli zakłada, że dzięki takim procesom mogły w stosunkowo krótkim okresie czasu powstać i ustabilizować się skomplikowane makromolekuły organiczne, tworzące pierwsze najprostsze organizmy. Biolodzy coraz lepiej poznają zachodzące w organizmach zjawiska, w wyniku których organizmy te mają zegary biologiczne o różnych skalach, od sekund do lat. Skale te są wynikiem cyklicznej organizacji złożonych zespołów reakcji chemicznych.

Inną ważną klasę procesów nieliniowych stanowią zjawiska mechaniczne przebiegające w ośrodkach ciągłych, takich jak woda lub powietrze. Znamy je dobrze z obserwacji szybko płynącej wody, która w zależności od kształtu koryta i rodzaju dna tworzy skomplikowane układy wirów, fal na powierzchni itp. Układy te są stabilne w tym sensie, że zaburzone przez zewnętrzny czynnik, na przykład przez przepływający kajak, szybko wracają do poprzedniej postaci. Zjawiska te zachodzą w skali czasowej sekund i minut. O wiele większe przestrzennie i dłużej trwające są zjawiska atmosferyczne, takie jak układy niżów i wyżów, burze lub trąby powietrzne. Ich powstawanie, rozwój i zanik to procesy trwające dni lub tygodnie.

Procesy elektryczne to trzecia ważna grupa układów dynamicznych omawianego typu. Należą do niej zarówno proste zegarki elektroniczne, jak również bardziej skomplikowane układy półprzewodni-

kowe, nadajniki fal radiowych, urządzenia kontrolne i sterujące. Najbardziej skomplikowanym układem działającym dzięki przesyłaniu impulsów elektrycznych jest układ nerwowy, a zwłaszcza mózg. Ma on wiele nieliniowych podsystemów, pełniących poszczególne funkcje, których działanie daje w efekcie proste lub złożone schematy dynamiczne typu atraktorów. W działaniu układu nerwowego procesy chemiczne i elektryczne są ze sobą ściśle splecione.

W największej skali zjawisk fizycznych — w skali astronomicznej — dominującą siłą jest grawitacja. Dzięki sile ciężenia planety krążą wokół Słońca, a księżycy obiegają planety. W tej sferze jednostką czasu jest rok lub dziesiątki i setki lat.

Wspomniane powyżej przykłady nie wyczerpują oczywiście rodzajów zjawisk zachodzących w układach nieliniowych, które dają w rezultacie uporządkowanie struktur materialnych i ich dynamikę, wyróżniającą kierunek upływu czasu w charakterystycznej dla nich skali. Przytoczyłem je, aby zilustrować, w jaki sposób tego rodzaju zjawiska nadają czasowi kierunek i niejednorodność. Na tej konferencji można dowiedzieć się o nich wiele więcej dzięki referatom poświęconym roli czasu w poszczególnych naukach przyrodniczych, dlatego przejdę teraz do analizy tego, co teoria chaosu wniosła do wiedzy o tych zjawiskach. Skupię uwagę na czterech aspektach:

1. Teoria chaosu bada te procesy w sposób ogólny. W jej ramach powstały teorie matematyczne, takie jak teoria odwzorowań jednowymiarowych, teoria bifurkacji Feigenbauma, teoria ergodyczna i klasyfikacja poszczególnych poziomów nieregularności ruchu. Metody te, zastosowane do określonych rodzajów zjawisk, często znacznie różniących się pod względem składników, ich własności i rodzaju oddziaływań, pozwalają w dokładny i ogólny sposób opisać te zjawiska, uporządkować dane i wykryć regularności, leżące u podstaw ich dynamiki. Dzięki temu procesy chemiczne, mechaniczne, elektryczne, społeczne ukazują swoje podobieństwo pod względem matematycznych własności struktury całości i jej rozwoju.

2. Wyrafinowane obliczeniowe i obserwacyjne metody teorii chaosu pozwoliły odkryć regularności niemożliwe do wykrycia innymi

metodami. W ten sposób zbadano i wykryto atraktory w dynamice rozprzestrzeniania się dziecięcych chorób zakaźnych, w zmienności populacji zwierząt i roślin, w procesach społecznych. Te trudne do zauważenia i zbadania rodzaje uporządkowania procesów pozwalają lepiej je zrozumieć a nawet przewidywać pewne efekty. Na przykład, dokładne poznanie i zbadanie chorób zakaźnych wieku dziecięcego pozwoliło przewidzieć, jak będą przebiegać epidemie tych chorób po zastosowaniu szczepień ochronnych. Tak uporządkowane procesy mają swoją skalę czasu, która jest równie trudna do odkrycia jak ich porządek, tym niemniej ma wpływ na rozwój świata materii.

3. Nowe, dokładne metody nie tylko służą do wykrywania uporządkowania trudnego do zaobserwowania. Stosując je można także znaleźć czasami nieporządek tam, gdzie dotychczas widziano tylko harmonię i powtarzalność. W ostatnich dziesięciu latach znacznie poszerzyła się wiedza o długookresowym działaniu naszego układu planetarnego. W roku 1988 G.J. Sussman i J. Wisdom z MIT stosując komputery zbadali ruch planet w okresach czasu rzędu setek milionów lat i wykazali, że ruch Plutona jest chaotyczny z czasem charakterystycznym rzędu pięćdziesięciu milionów lat. Rok później J. Laskar z Bureau des longitudes zbadał dynamikę Układu Słonecznego w okresie dwustu milionów lat i wykazał, że ruch planet najbliższych Słońca, w tym także Ziemi, jest chaotyczny z okresem rzędu dziesięciu milionów lat. Laskar odkrył także, że ruch Wenus jest chaotyczny w stopniu umożliwiającym zmianę kierunku obrotu tej planety wokół osi. Ponieważ obecnie kręci się ona przeciwnie do ruchu obrotowego pozostałych planet, istnieje uzasadnione podejrzenie, że w ciągu swego istnienia zmieniała ona kilka razy kierunek obrotu.

4. Teoretyczne prawa dynamiki nieliniowej pozwalają wytłumaczyć pewne dobrze znane fakty, do niedawna niezrozumiałe, lub uznawane za przypadkowe. Na przykład, dobrze wiadomo, że okres obrotu Księżyca wokół własnej osi jest dokładnie równy okresowi jego krążenia wokół Ziemi, dzięki czemu z Ziemi widzimy tylko jedną stronę naszego satelity. Do niedawna nie było wiadomo, jak wyjaśnić tę zgodność obu okresów i czy jest ona przypadkowa, czy też wyraża jakąś

ogólną regularność. Obecnie tłumaczy ją prawo, głoszące, że w przypadku oddziaływania dwóch ciał tworzących układ dynamiczny powiązany siłą ciężenia, okresy ich niezależnych obrotów pozostają w stosunku małych liczb całkowitych. W Układzie Słonecznym znanych jest już kilka takich powiązanych ze sobą układów księżyców krążących wokół planet, dlatego nasz Księżyc nie jest wyjątkiem.

Dzięki tym rezultatom coraz lepiej zdajemy sobie sprawę z tego, że w świecie zjawisk zachodzących wokół nas, na wielu poziomach budowy materii i w rozmaitych skalach czasu, przebiegają procesy porządkowania i niszczenia porządku. Na razie wiedza o tych procesach jest niepełna i mało dokładna, dlatego w tej dziedzinie wiele jest jeszcze do zbadania i naukowcy będą przez wiele lat mieli co robić. Jednak już teraz wiemy, że Wszechświat na pewno nie jest podobny do kartezjańskiego zegara, w którym czas płynie jednostajnie i może być traktowany jako absolutny zewnętrzny parametr, porządkujący stany w istocie podobne do siebie. Poszukując metafory bardziej odpowiedniej i bogatszej powiedziałbym raczej, że Wszechświat bardziej niż zegar przypomina skomplikowaną symfonię, której melodię poznaliśmy dotąd bardzo wyrywkowo. Można jednak mieć nadzieję, że poszczególne procesy przebiegające w różnych skalach przestrzennych i czasowych, po lepszym ich poznaniu ułożą się w spójny obraz Wszechświata harmonijnie rozwijającego się na wszystkich szczeblach swojej budowy. Skale poszczególnych szczebli są powiązane ze sobą.