KS. MICHAŁ HELLER

EWOLUCJA METODY

Pytanie

Lektura kilku pierwszych rozdziałów książki Réné Thoma: *Stabilité structurelle et morphogénèse* (Paris 1977, II^e ed.)*, nasuwa następujące zagadnienie. Od Galileusza i Newtona rozpoczyna się triumfalny pochód, przez kręte drogi poznawania świata, metody rachunkowych modeli i ich konfrontacji z doświadczeniem. Metoda ta okazała się niezwykle skuteczna i wyłącznie to zadecydowało o jej triumfie. Ale czy jest to jedyna metoda, która może zapewnić sukces w „dialogu z przyrodą"? Czy nauki o przyrodzie związane są w y ł ą c z n i e i n a z a w s z e tylko z tą metodą? Niezwykłość, prawie bezsensowność, postawionego pytania wymownie świadczy o tym, jak bardzo w naszej dzisiejszej świadomości pojęcie nauki przyrodniczej zrosło się z rachunkowo-eksperymentalną metodą.

Thom z właściwą sobie wnikliwością, zauważył: „Kartezjusz, przy pomocy swoich wirów, zderzających się atomów itp. wyjaśniał wszystko, ale nie liczył niczego. Newton zaś, przy pomocy prawa grawitacji z proporcjonalnością do $\frac{1}{r^2}$ wyliczał wszystko, ale nie wyjaśniał niczego" (s. 5). Metoda liczenia stała się tak powszechna, iż w umysłach ludzi pracujących naukowo, wytworzył się nawyk utożsamiania samej czynności liczenia z rozumieniem. W kontekście tych uwag postawione poprzednio pytanie może przybrać następujący odcień znaczeniowy: czy kiedyś metoda nauk przyrodniczych nie ulegnie takim przeobrażeniom (lub przynajmniej czy nie może ulec takim przeobrażeniom), by dawać również zrozumienie. Oczywiście natychmiast powstaje kolejne pytanie: co to jest zrozumienie?

Rozważając, za Thomem, te zagadnienia, uczynimy z góry pewne ograniczenie. Wydaje się rozsądnym nie brać pod uwagę takich ewentualnych przemian metody naukowej, które by uczyniły z nauk o przyrodzie poznanie nieempiryczne, a więc poznanie w żaden kontrolowany sposób nie oparte na doświadczeniu i obserwacji.

---

* Oznaczenia stron (w nawiasie), umieszczone w tekście (nie w przypisach) poniższego artykułu, odnoszą się do omawianej pracy R. Thoma.

Jest jasnym, że skoro Thom w ogóle postawił problem wyłączności rachunkowo-empirycznej metody, to żywił przynajmniej podejrzenie, że obecna metoda nie musi być jedynie możliwą [1]. W dalszym ciągu przedstawię myśli Thoma (interesujące same w sobie, bez względu na to, czy wnoszą cokolwiek nowego do wyżej postawionych pytań, czy nie), zaopatrując je we własne komentarze i refleksje. Mam nadzieję, że odnośniki do tekstu Thoma wystarczająco ujawnią granicę pomiędzy tymi dwiema warstwami niniejszego eseju.

Nie mam oczywiście ambicji rozstrzygnięcia pytania o wyłączność metody. Jedynie skuteczną metodą odpowiedzi na to pytanie jest metoda empiryczna, to znaczy poczekać i zobaczyć, czy i ewentualnie w jakim kierunku nastąpi ewolucja metody naukowej. Sądzę wszakże, że postawienie tego pytania jest doskonałą okazją i dobrym kontekstem do rozważenia wielu ciekawych zagadnień dotyczących nauki i jej filozofii.

Formalne modele ewoluujących form

Otaczający nas świat składa się z kształtów-form. Kształty te są pełne dynamiki. Jedne giną, inne powstają, ale pomiędzy powstawaniem i ginięciem rozciąga się falujące, wzburzone, załamujące się morze form w ruchu, w różnych stadiach przeobrażeń. W życiu codziennym jesteśmy zżyci raczej z przedmiotami niż formami, lecz co to jest przedmiot? Przedmioty wyróżniamy w naszej przestrzeni życiowej — określamy je przy pomocy zmysłów, najczęściej wzroku — nie odwołując się do ich substancjalności, indywidualności czy czegoś podobnego, lecz do względnej trwałości ich kształtu, czyli formy. „Widowisko wszechświata — pisze Thom — jest nieustannym ruchem narodzin, rozwoju, niszczenia form. Zadaniem wszystkich nauk jest przewidzieć tę ewolucję i — jeżeli to możliwe — wyjaśnić ją" (s. 1). Thom ma tu na myśli nauki makroskopowe, to znaczy takie właśnie, których zadaniem jest opisanie (zrozumienie?) otaczającego nas świata zmiennych form. I tylko tego rodzaju nauki będziemy mieli tymczasem na myśli.

Samo pojęcie przedmiotu trwającego jakiś czas w przestrzeni, czyli przedmiotu czasoprzestrzennego, zakłada pojęcie modelu. Model należy tu rozumieć w najszerszym znaczeniu jako sposób wyodrębnienia z „morza form" tych form, które przedstawiają się nam jako względnie trwałe w czasie i przestrzeni. Spróbujmy jednak, na użytek nauki, uściślić i — być może — odpowiednio wystylizować to intuicyjne dotychczas

[1] W przygotowywanym eseju *Wstęp do rewolucji naukowej* rozważam perspektywy rewolucji naukowej, polegającej na istotnie szerszym wykorzystaniu przez nauki przyrodnicze tak zwanych globalnych metod matematycznych. Tam również uwagi na temat stanowiska R. Thoma w tej kwestii.

pojęcie modelu. Wystylizowanie pojęcia, w porównaniu z jego treścią funkcjonującą w języku potocznym, okazuje się zwykle niezbędne, by uczynić je operatywnym w naukotwórczych zabiegach.

Układ ewoluujących form będziemy nazywać procesem fenomenologicznym. Mówimy, że proces fenomenologiczny F jest formalizowalny, jeżeli istnieje system formalny P (w sensie logiki formalnej) spełniający dwa następujące warunki: (1) Każdy stan (A) procesu fenomenologicznego P może być sparametryzowany (opisany) układem zdań $\{a\}$ systemu formalnego F; (2) jeżeli w trakcie ewolucji stan A przechodzi w stan B, co zapisujemy $A \rightarrow B$, to stan B może być sparametryzowany (opisany) zbiorem zdań $\{b\}$ systemu formalnego P, przy czym żądamy, by zbiór zdań $\{b\}$ wynikał dedukcyjnie ze zbioru zdań $\{a\}$, wewnątrz systemu formalnego P. Innymi słowy, proces fenomenologiczny F jest formalizowalny, jeżeli istnieje odwzorowanie bijektywne Φ systemu formalnego P, lub jego części na proces fenomenologiczny F taki, że odwrotność tego odwzorowania Φ^{-1} przekształca następstwo czasowe w procesie F na wynikanie logiczne w systemie P. Jeżeli potrafimy efektywnie podać odwzorowanie Φ, to powiadamy, że skonstruowaliśmy model formalny lub krótko model procesu F.

Żeby definicja ta była tak ścisła, na jaką wygląda powinno się jeszcze określić, co to znaczy, „układ ewoluujących form"; nazwanie go „procesem fenomenologicznym" oczywiście sprawy nie załatwia. To samo dotyczy wyrażenia „stan A procesu fenomenologicznego". Rzecz jednak polega na tym, że wyrażenia te można ściśle zdefiniować tylko korzystając z pojęcia modelu. Pozostawmy te sprawy na boku; nie idzie nam tu o semantyczne szczegóły, lecz o rozważenie zagadnień (czy może tylko o ich naszkicowanie) w znacznie szerszym kontekście. Zresztą, podobne uwagi, w jeszcze większym stopniu odnoszą się do wielu modeli konstruowanych przez Thoma, zwłaszcza w dalszych rozdziałach książki. Thom bardzo często formalizuje tylko niektóre aspekty interesującego go procesu, pozostawiając na boku inne, nieraz ważne, jego aspekty.

Nieco komentarza

Ale wróćmy do definicji modelu formalnego. Zauważmy, że tłumaczy on kolejność stanów w ewoluującym ciągu form na wynikanie logiczne układów zdań wewnątrz układu formalnego. A więc w modelu jest coś więcej niż tylko Humowska kolejność zjawisk. Można by podjąć próbę uzasadnienia tezy o tym, że wynikanie logiczne $\{b\}$ z $\{a\}$ w systemie logicznym P dobrze modeluje przyczynowanie stanu B przez stan A w procesie fenomenologicznym F. Zauważmy, że zdania {b} nie następują po prostu po zdaniach {a} w systemie P, lecz {b} wynikają z {a}[2].

Ale powyższa definicja modelu formalnego nie zakłada determinizmu i to nawet wtedy, gdy nie zrezygnujemy z dwuwartościowości logicznej systemu P. Ze zbioru zdań {a} może wynikać wiele konsekwencji, np. zbiory zdań $\{b\}_1$ $\{b\}_2$ ...; model może więc nie dawać możliwości jednoznacznego przewidywania[3].

Każdy model formalny składa się z dwu części: (1) część kinematyczna obejmuje parametryzację (opis) stanów procesu fenomenologicznego przy pomocy zdań systemu formalnego; (2) część dynamiczna, zawiera opis ewolucji stanów przy pomocy wynikań wewnątrz systemu formalnego. W przypadku systemów opartych o logikę wielowartościową, dynamika ma dać prawdopodobieństwo przejścia od stanu A do stanu B. Gdy prawdopodobieństwa wszystkich przejść od stanu do stanu są równe jedności, mamy do czynienia z teorią deterministyczną.

W tym miejscu następuje interesująca uwaga Thoma. Bardzo często systemy formalne, przy pomocy których modeluje się różne procesy fenomenologiczne, są czymś więcej niż „czystym systemem formalnym", to znaczy, bywają one wyposażone w dodatkowe struktury, rodzaj uporządkowań udających wynikanie logiczne. Thom wyraża myśl, że tylko wtedy gdy P jest czystym systemem logicznym bez żadnych dodatkowych struktur, można uważać, że model wyjaśnił proces całkowicie (s. 3).

Mamy tu konkretną propozycję, jak rozumieć wyjaśnianie w nauce. Propozycja ta jest nową wersją redukcjonizmu, tym razem redukcjonizmu do logiki. Myślę, że wyraża to jedną ze współczesnych tendencji myślowych[4]. U jej podstaw kryje się prawdopodobnie następująca filozofia. Wszystko w nauce winno być racjonalnie wyjaśnione. Jeżeli zgodzić się, że szczytem racjonalności, lub nieco bardziej patetycznie — wcieleniem racjonalności, jest idea systemu formalnego, to wyjaśnianie kończy się, gdy ciąg rozumowań uda się zamknąć w jakimś „czystym" systemie formalnym. Prawie każde z ostatnich zdań mogłoby służyć za temat filozoficznej rozprawy.

---

[2] Jeśli wynikanie logiczne traktować jako implikację, to taki model przyczynowości zakłada nieodwracalność relacji: przyczyna (poprzednik) — skutek (następnik), dokładnie w takim samym sensie, w jakim implikacja jest nieodwracalna.

[3] Podobne uwagi na temat przyczynowości w: M. Heller, M. Lubański, S. W. Ślaga, *Zagadnienia filozoficzne współczesnej nauki*, Warszawa 1980, s. 293 n.

[4] Por. np. ideę J. A. Wheelera, by całą fizykę sprowadzić do rachunku zdań. Ideę tę Wheeler wyrażał wielokrotnie, np. w artykule: *Beyond the End of Time*, [w:] *Science et Métaphysique*, Paris 1976, s. 149—183.

Modele ciągłe — paradygmat Newtona

Jeżeli system formalny P, przy pomocy którego modelujemy jakiś proces fenomenologiczny F, składa się z więcej niż przeliczalnej liczby elementów, mamy wówczas do czynienia z ciągłym modelem formalnym procesu F. W takim wypadku system P można wyposażyć w topologię[5] lub w strukturę różniczkową[6].

Ta właśnie metoda ciągłych modeli została zapoczątkowana przez Newtona i do dziś święci triumfy. Klasyczne modele ciągłe są zwykle wyposażone w strukturę różniczkową (i odpowiadającą jej topologię), co umożliwia wykonywanie rozmaitych rachunków. W szczególności struktura różniczkowa umożliwia funkcjonowanie tradycyjnej analizy matematycznej, należącej do standardowych narzędzi teoretycznych fizyki.

Niejednokrotnie uczeni i filozofowie nauki wyrażali zdziwienie faktem, że przyroda tak stosunkowo łatwo i skutecznie ulega metodzie matematyczno-empirycznej. Ściśle rzecz biorąc, zdziwienie to powinno być adresowane do modeli ciągłych i wynikających z nich przewidywań empirycznych. Jeżeli pytamy o możliwość zmiany lub rozszerzenia metody naukowej, to pytanie nasze dotyczy głównie możliwości wykorzystywania „nieciągłych" systemów formalnych do modelowania przyrody.

Strukturalna stabilność

Z metodą naukową wiąże się zagadnienie strukturalnej stabilności. Wprawdzie filozofowie nauki poświęcili dotychczas stosunkowo mało uwagi temu zagadnieniu, nabiera ono coraz większej wagi w praktyce badawczej. Proces F jest strukturalnie stabilny, jeżeli małe zaburzenie tego procesu zachowuje jego formę. Ażeby określenie to mogło pretendować do ścisłości, trzeba odpowiedzieć na dwa pytania: po pierwsze, co to znaczy „małe zaburzenie" i po drugie, co to znaczy „zachowuje formę"?

Prawdopodobnie nie da się udzielić ogólnej odpowiedzi na te pytania; należy szukać na nie odpowiedzi w konkretnych modelach. Na przykład, w przypadku modeli ciągłych (różniczkowalnych) P może być przestrzenią metryczną i na pierwsze pytanie mamy wówczas dobrze określoną odpowiedź, a dwa stany możemy uznać za mające tę samą formę, gdy są homeomorficzne (dyfeomorficzne).

[5] Wtedy zwykle zakłada się, że podzbiór zamknięty $K \subset P$ przedstawia obszar katastrof, tzn. punkty należące do K opisują stany katastrofalne, czyli takie, których małe zaburzenie powoduje drastycznie odmienną ewolucję układu. Procesy normalne (niekatastrofalne) odpowiadają spójnym podzbiorom należącym do $P \setminus K$ (por. R. Thom, *Stabilité*, s. 45).

[6] W takim wypadku P jest rozmaitością różniczkową, a dynamika jest dana przez pola wektorowe na P.

Thom wyróżnia dwa rodzaje form strukturalnie niestabilnych. Do pierwszego rodzaju zalicza się formy mające strukturę bardzo skomplikowaną, formy posiadające niewiele dających się zidentyfikować elementów; takie struktury jesteśmy skłonni określać mianem chaosu. Do drugiego rodzaju należą formy o małej ilości i łatwych do zidentyfikowania elementów, ale elementy te wydają się być niespójne, kłócą się ze sobą. W modelach tego typu formy są opisywane przez stany bifurkacyjne, usytuowane na rozstaju pomiędzy zasadniczo różnymi od siebie dynamikami (s. 15).

W jakim sensie strukturalna stabilność ma związek z metodologią nauki? Każde badanie empiryczne zakłada dwa etapy przygotowawcze. W pierwszym etapie należy wyodrębnić (wyizolować) badany układ z otaczającego go środowiska; w drugim etapie należy przygotować stan wewnątrz rozważanego układu. Ale wyodrębnienie (wyizolowanie) nigdy nie jest idealne, a przygotowanie stanu nigdy za każdym razem nie jest dokładnie takie samo. Badanie empiryczne jest możliwe tylko wtedy, gdy można sensownie założyć, że badany proces jest jakoś strukturalnie stabilny. W przeciwnym razie bylibyśmy narażeni na otrzymywanie nieporównywalnych wyników w rezultacie każdorazowej ingerencji badawczej; nie byłoby gwarancji, że mały wpływ zewnętrzny czy nieznacznie inne przygotowanie stanu nie zmienią istotnie wskazań przyrządów pomiarowych. To właśnie strukturalna stabilność umożliwia istnienie „zaniedbywalnie małych efektów". Nawiązując do znanego powiedzenia Einsteina, można by stwierdzić, że przyroda nie jest złośliwa, bo jest strukturalnie stabilna [7].

Zagadnienie nie jest jednak do końca wyjaśnione. Oto bowiem jakieś rodzaje niestabilności (sytuacji bifurkacyjnych, katastrofalnych itp.) wydają się niezbędne do tego, by w przyrodzie mogły powstawać istotnie nowe formy, nie zadane jednoznacznie i raz na zawsze sztywnymi warunkami brzegowymi, a więc do tego, by mogła istnieć prawdziwa ewolucja [8]. Być może należałoby wyróżnić różnego rodzaju stabilności i niestabilności strukturalne, przede wszystkim za względu na typ dopuszczalnych zaburzeń i ze względu na kryterium decydujące o tym, kiedy dwa różne procesy mamy uważać za równoważne. Jest to problem interdyscyplinarny, który powinien złączyć wysiłki matematyków, fizyków i filozofów nauki.

---

[7] Dalsze uwagi na temat pojęcia strukturalnej stabilności i jego metodologicznego znaczenia zamieszczam w eseju *O przestrzeniach Banacha* („Analecta Cracoviensia" 15, 1983, s. 1—12).

[8] Por. I. Prigogin, I. Stengers, *La nouvelle Alliance*, Paris 1979.

Dygresja na temat fizyki kwantowej

Rozważania Thoma dotyczą w zasadzie makroskopowych gałęzi nauki. Chcąc jednak osiągnąć głębsze zrozumienie prędzej czy później musi się zejść do mikroświata. Nic więc dziwnego, że Thom czyni krótką, ale — wydaje się — ważną dygresję dotyczącą fizyki kwantowej.

Jak dobrze wiadomo, każdy pomiar układu kwantowo-mechanicznego nieodwracalnie ten układ zaburza. Układy kwantowe nie są więc strukturalnie stabilne ze względu na zaburzenie, jakim jest każdy pomiar. Innymi słowy, nie ma strukturalnej stabilności na poziomie kwantowych indywiduów, ale powinna ona występować na poziomie ich statystycznych zbiorowisk (s. 17 n.). Nasuwa się więc pytanie: czy strukturalna stabilność nie powstaje jako szczególnie łaskawe uśrednianie kwantowej niestabilności? Jeżeli to pytanie jest w ogóle sensowne, to — jak zwykle w nauce — jego pełny sens zostanie poprawnie wyartykułowany (tym samym pytanie zostanie poprawnie sformułowane) dopiero po znalezieniu na nie odpowiedzi.

Jednakże na cały problem można spojrzeć z innego punktu widzenia. Definicja strukturalnej stabilności domaga się, by małe zaburzenie układu nie prowadziło do drastycznie innej jego dynamiki. A może po prostu zaburzenie układu kwantowo-mechanicznego, spowodowane aktem pomiaru, nie jest małe. Żeby to nie był tylko unik słowny, należałoby dysponować jakimś niezależnym kryterium małości zaburzenia. Znowu, podjęcie odpowiedzialnych badań mogłoby prawdopodobnie rzucić sporo światła także i na tę kwestię.

Stabilność strukturalna a modele rachunkowe

Fizyka współczesna postawiła na modele, przy pomocy których można wykonywać rachunki, uzyskiwać ilościowe wyniki i porównywać je z doświadczeniem. Modele takie są zwykle „zbudowane" z funkcji analitycznych. Pojęcie analityczności funkcji jest prawie równoznaczne możliwości „dobrego" wykonywania rachunków. Thom zwraca uwagę, że funkcje analityczne będące rozwiązaniami równań różniczkowych o pochodnych cząstkowych — a właśnie takie równania bardzo często opisują prawa przyrody — nie mogą być przedłużane w sposób strukturalnie stabilny (s. 30—32). Ściślej: są poważne kłopoty z dorobkiem takiej topologii, w której przedłużenie rozwiązań byłoby strukturalnie stabilne. Wydaje się więc, że istnieje przeciwstawienie: albo model jest strukturalnie stabilny, albo można przy jego pomocy wykonywać rachunki (jest „calculable")[9]. Przeciwstawienie to występuje także poza terenem równań różniczkowych o pochodnych cząstkowych i często jest ono głębsze niż sugerowałby to prosty fakt, że stabilizacja układu równań wprowadza do tego układu nowy wyraz lub nowe wyrazy, co oczywiście przeważnie powoduje dodatkowe trudności w znajdowaniu rozwiązań.

Thom dopatruje się w tych faktach ważnego znaczenia metodologicznego: „aktualna fizyka — pisze on — poświęciła strukturalną stabilność rachunkowości, chciałbym wierzyć, że nie będzie ona musiała żałować swego wyboru" (s. 32). Wielkie sukcesy nowożytnej fizyki w badaniu przyrody nie upoważniają do specjalnej skruchy z powodu złego wyboru metody, ale jest niewątpliwą prawdą, że zagadnienie strukturalnej stabilnoścci domaga się poważniejszego niż dotychczas potraktowania zarówno przez fizyków, jak i przez filozofów nauki.

Perspektywy

Powróćmy na koniec do wyjściowego pytania Thoma: czy jest możliwe uprawianie nauk empirycznych przy pomocy zasadniczo odmiennej metody niż dotychczas? Czy na przykład metoda „rachunkowych modeli" ustąpi miejsca „metodzie stabilności"? Przyszłość pokaże, ale na podstawie dotychczasowych doświadczeń rozwoju nauki należałoby się raczej spodziewać pewnej ciągłości w dojrzewaniu metod niż gwałtownych rewolucji; przynajmniej w tym sensie, że wyniki osiągnięte dotychczasowymi metodami powinny zostać pochłonięte przez naukę przyszłości.

Od dawna nikt nie wątpi w ewolucję nauk empirycznych, ale jeszcze kilkanaście lat temu pytanie o ewolucję metody empirycznej, gdyby w ogóle zostało postawione, wydawałoby się nonsensem. Dziś pytanie to już nie dziwi. Nie tylko się je stawia, ale całkiem realnie wskazuje ono ku przyszłości.

EVOLUTION OF THE METHOD

Summary

The paper is a comment on first chapters of the book by Réné Thom *Stabilité structurelle et morphogénèse*. Thom's idea of phenomenological models, both discrete and continuous, is discussed with a special emphasis on the problem their structural stability. An opposition between structural stability and calculability is touched upon.

[9] Por. także: W. I. Arnold, *Metody matematyczne mechaniki klasycznej*, Warszawa 1981, s. 265 nn. Autor pokazuje przykłady układów bliskich całkowalnych, które same nie są całkowalne.