ARTYKUŁY

ZAGADNIENIA FILOZOFICZNE
W NAUCE
XXVII / 2000, s. 33–47*

Michał HELLER

CZY KOSMOS JEST CHAOSEM?

1. CZY PRAWA PRZYRODY RZECZYWIŚCIE SĄ MATEMATYCZNE?

W mojej filozoficznej wizji świata ważną rolę odgrywa to, co nazwałem jego matematycznością. W jednym z poprzednich artykułów[1] starałem się pokazać, że matematyczność świata (w sensie ontologicznym) jest koniecznym warunkiem jego istnienia: nie może istnieć świat, którego struktura pozostawałaby w sprzeczności z *możliwymi* strukturami matematycznymi. Taka sprzeczność „wyłącza z istnienia". Pragmatycznym argumentem mocno przemawiającym za tym, że żyjemy w „matematycznym świecie" są sukcesy zmatematyzowanych nauk empirycznych w ostatnich trzystu latach.

W okresie dominacji pozytywizmu fizycy, ulegając wpływom tego kierunku filozoficznego, byli skłonni sądzić, że wartościowa informacja, jaką fizyczna teoria niesie o świecie, jest zawarta w empirycznych przewidywaniach wynikających z teorii. Całą resztę, tzn. matematyczną strukturę teorii, należy — po uzyskaniu z jej pomocą empirycznych przewidywań — odrzucić jako zbędne rusztowanie, które spełniło już swoje zadanie. Dziś wśród fizyków, nie wahających się wyrażać swoich filozoficznych przekonań, przeważa pogląd, że to właśnie matematyczna struktura fizycznej teorii ujawnia (czy lepiej — wydobywa na jaw), ukrytą dla potocznego poznania, głębszą strukturę

*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.

[1] „Czy świat jest matematyczny?", *Zagadnienia Filozoficzne w Nauce,* 22, 1998, 3-14.

świata. Fizycy dokopując się do tej ukrytej struktury, często mówią, że poszukują fundamentalnych praw rządzących światem. Prawa te, o ile zostają znalezione, mają postać matematyczną (najczęściej postać równań lub symetrii). Nic dziwnego, że wielu fizyków (i niektórzy filozofowie) utożsamiają matematyczność świata z matematycznością fundamentalnych praw przyrody[2].

Rodzi się ważne pytanie: Czy prawa przyrody rzeczywiście są matematyczne? Oczywiście w to, że są one formułowane w postaci wzorów matematycznych, nie można wątpić, ale może „na dnie struktury świata” czai się chaos i przypadkowość, a znany nam matematyczny charakter praw przyrody jest tylko „bardzo sprytnym”, powierzchownym złudzeniem?

Rzeczywiście, istnieje pewna możliwość wyprodukowania praw przyrody z chaosu. Jak piszą J. Barrow i J. Silk:

> Jest całkiem możliwe, ze jedynym prawem przyrody może być absolutn anarchia. Uczeni zastanawiają się nad tym, czy istnienie symetrii w przyrodzie nie jest iluzją, czy reguły decydujące o tym, jakie symetrie mają występować w przyrodzie nie mogą wywodzić się z czystej przypadkowości. Pewne wstępne badania sugerują, że nawet jeśli wybór dopuszczalnych zachowań przyrody jest losowy, to może z nich wynikać uporządkowana fizyka z wszelkimi przejawami symetrii[3].

A więc zdaniem niektórych myślicieli (Barrow i Silk tylko referują ich poglądy), jedynym fundamentalnym prawem przyrody jest „gra prawdopodobieństw”, a wszystkie inne tak zwane prawa przyrody są wynikiem tej gry, pewnego rodzaju uśrednieniami rozkładów prawdopodobieństw po wielkich masach statystycznych. Wprawdzie filozofia ta pozostała tylko programem, a wszystkie dotychczasowe próby jej

---

[2]Istnieje ogromna literatura filozoficzna na temat praw przyrody, ich statusu metodologicznego, ich stosunku do teorii itp. W dalszym ciągu tego artykułu pozostawiam te zagadnienia na boku, rozumiejąc sens wyrażenia „prawo przyrody” (lub „prawo fizyki”) tak jak je zwykle rozumieją fizycy. Większa precyzja nie jest konieczna w obecnych rozważaniach.

[3]J. Barrow, J. Silk, *The Left Hand of Creation: The Origin and Evolution of the Expanding Universe*, Unwin, London 1983, s. 213.

zrealizowania dały raczej mizerne wyniki, należy ją potraktować poważnie i poddać dokładnej analizie, zanim zacznie się wyciągać dalej idące wnioski z matematyczności świata.

2. PRAWA PRZYRODY Z PIERWOTNEGO CHAOSU

Wśród fizyków-teoretyków dominuje dziś pogląd, że znane nam prawa fizyki obowiązują aż do tzw. progu Plancka, tzn. aż do momentu, gdy — idąc w głąb materii — osiągniemy rozmiary rzędu 10^{-33} cm, lub gdy — cofając się w czasie w dziejach Wszechświata — osiągniemy stan, w którym gęstość materii wynosiła 10^{93} g/cm^3. Po przekroczeniu progu Plancka, prawa te załamują się, ustępując miejsca nieznanym nam jeszcze „prawom fundamentalnym”. Istnieją dobrze uzasadnione przypuszczenia, że prawa na poziomie fundamentalnym odznaczają się „maksymalną symetrią” (cudzysłów w ostatnim wyrażeniu podkreśla fakt, że ostateczna postać tej symetrii jest ciągle jeszcze poszukiwana). Kolejne łamania pierwotnej symetrii doprowadziły do obecnie obowiązujących praw przyrody i do obecnego bogactwa struktur we Wszechświecie. Zwolennicy filozofii, wspomnianej we wstępie, są dokładnie przeciwnego zdania. Według nich, poniżej progu Plancka panuje zupełny chaos, lub — co na jedno wychodzi — wszystkie możliwe symetrie współistnieją na równych prawach i dopiero pewne procesy uśredniające powodują dominację niektórych symetrii nad innymi. W ten sposób do głosu dochodzą regularności, które dziś nazywamy prawami przyrody. „Ale czy istnieją w ogóle jakieś prawa przyrody? Być może jedynym prawem przyrody jest kompletna anarchia na mikroskopowym poziomie?”[4] Pomysł, by prawa przyrody wyprodukować z chaosu, nazywa się niekiedy (na wyrost) „teorią teorii”[5]. Aby taką teorię sformułować w sposób ścisły, musielibyśmy najpierw określić przestrzeń wszystkich możliwych praw przyrody (lub lepiej:

---

[4]J. Barrow, F.J. Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle*, Clarendon Press, Oxford 1986, s. 256.

[5]Por. Ph. E. Gibbs, „The Small Structure of Space-Time”, preprint hep-th/9506171, 1995, ss. 12-14 (tam też odwołania do naukowej literatury).

wszystkich możliwych teorii naukowych) i zdefiniować na niej odpowiednią miarę (tylko wówczas moglibyśmy sensownie mówić o prawdopodobieństwie wyłaniania się praw z pierwotnego chaosu; por. niżej podrozdział 3). Ponieważ jest to faktycznie wykluczone (musielibyśmy bowiem z góry znać wszystkie możliwe prawa lub teorie!), należałoby się ograniczyć do jakiejś mocno zawężonej klasy teorii. Zwolennicy tej koncepcji starają się obejść tę trudność, zastępując ścisłość zgrabnym pomysłem. Wspomnę dwa tego rodzaju pomysły.

Pierwszy z nich można nazwać *teorią chaotycznego cechowania*. Najpierw kilka słów wyjaśnienia. Znaczenie teorii cechowania w fizyce w ostatnich kilkunastu latach ogromnie wzrosło. Właściwie wszystkie współczesne teorie podstawowych oddziaływań fizycznych są teoriami cechowania. Ściśle jednak rzecz biorąc, należałoby mówić nie tyle o teoriach cechowania, co raczej o metodzie cechowania, stosowanej z powodzeniem do różnych teorii fizycznych. Metoda ta, mówiąc najogólniej, polega na tym, że znając (globalną) symetrię, charakteryzującą dane oddziaływanie, zaburzamy ją lokalnie, tzn. różnie w różnych miejscach czasoprzestrzeni. Zaburzenie takie oczywiście zmienia sytuację fizyczną. Ażeby zmianę tę zniwelować, wprowadzamy pola, dokonujące odpowiednią korekturę (tzw. *pola cechowania*). I jest rzeczą zaskakującą, że właśnie te pola obserwuje się w przyrodzie. Istnieje matematyczna recepta, jak wykonać całą tę konstrukcję. Istotną rolę w metodzie cechowania odgrywa pewna funkcja zwana funkcją Lagrange'a (lub krótko w spolszczeniu lagranżianem), kodująca w sobie odpowiednie symetrie i potem ich zaburzenia. Pomysł teorii chaotycznego cechowania sprowadza się do tego, by na poziomie fundamentalnym funkcję Lagrange'a wybrać losowo, spośród wszystkich możliwych funkcji tego rodzaju, a następnie wykazać, że przy niskich energiach (a więc odpowiednio daleko od progu Plancka), otrzymujemy właśnie takie fizyczne oddziaływania, jakie dziś oberwujemy.

Autorom tego pomysłu[6] udało się go zrealizować tylko w bardzo ograniczonym zakresie. Musieli oni już w punkcie wyjścia założyć, że mają do czynienia nie z wszystkimi możliwymi funkcjami Lagrange'a, lecz z bardzo zawężoną ich klasą. Pomysł ten nie odbił się szerszym echem w głównych prądach współczesnej fizyki teoretycznej.

Inny, bardziej fantastyczny pomysł, oparty na tej samej filozofii, pochodzi od Andrieja Lindego[7]. Według niego Wielki Wybuch nie był szczególnym, odosobnionym wydarzeniem w dziejach Wszechświata; przeciwnie — Wszechświat reprodukuje się w kolejnych wielkich wybuchach. W każdym takim wybuchu świat-matka rodzi świat-dziecko i proces ten narasta eksponencjalnie. Linde pisze: „cały ten proces można uważać za rodzaj nieskończonej reakcji łańcuchowej kolejnych stworzeń i samoreprodukcji, który nie ma końca i który mógł nie mieć początku"[8]. Linde zaproponował matematyczmy model tego procesu, zgodnie z którym każdy kolejny wielki wybuch rodzi Wszechświat o odmiennych charakterystykach fizycznych, takich jak: podstawowe stałe fizyczne, gęstość energii próżni kwantowej, ładunek elektryczny... W efekcie chaos realizuje się nie w każdym indywidualnym wszechświecie, lecz w zbiorze wszystkich możliwych wszechświatów — w zbiorze tym wszystko gdzieś się zdarza. A my żyjemy właśnie w tym, a nie innym Wszechświecie, ponieważ właśnie w tym Wszechświecie zdarzyły się warunki, które były niezbędne do powstania i ewolucji życia. Nie bez powodu Linde nazywa swoją koncepcję *kosmologią chaotyczną*.

Pomysł Lindego rozwinął i rozpropagował Lee Smolin[9]. Według niego w zbiorze możliwych wszechświatów nie tylko wszystkie możliwości mogą się wydarzyć, ale w zbiorze tym obowiązuje również

[6] D. Foerster, H.B. Nielsen, M. Ninomiya, „Dynamical Stability of Local Gauge Symmetry", *Physics Letters*, 94 B, 1980, 135-140; C.D. Froggatt, H.P. Nielsen, *Origin of Symmetries*, World Scientific, Singapore-London, 1991.

[7] Por. jego książkę: *Fizika eliemientarnych czastic i infliacjonnaja kosmołogija*, Nauka, Moskwa 1990.

[8] A. Linde, „Inflation and Quantum Cosmology", w: *300 Years of Gravitation*, red. S.W. Hawking, W. Israel, Cambridge University Press, Cambridge 1987, s. 618.

[9] Por. jego książkę: *Życie Wszechświata*, Amber, Warszawa 1997.

swoista zasada naturalnego doboru. Smolin stara się uzasadnić twierdzenie, że właśnie te wszechświaty wydają najliczniejsze potomstwo, w których panują najdogodniejsze warunki do powstania i ewolucji życia. Jeżeli przyjąć tę tezę, to istotnie trzeba dojść do wniosku, że po odpowiednio długiej serii narodzin kolejnych wszechświatów, w zbiorze wszystkich wszechświatów najliczniej będą reprezentowane światy, w których ma szansę zaistnieć życie. Żyjemy zatem w „prawdopodobnym świecie".

Podobnie jak idea teorii chaotycznego cechowania, pomysł Lindego-Smolina nie miał znaczącego wpływu na rozwój współczesnej fizyki teoretycznej; głównie z tego powodu, że nie może się on poszczycić żadnym konkretnym przewidywaniem, nadającym się do porównania z doświadczeniem[10]. Co więcej, inne wszechświaty w zasadzie są nieobserwowalne. Jednakże w niniejszych analizach obydwa te pomysły (teorii chaotycznego cechowania i chaotycznej kosmologii) interesują mnie nie pod kątem ich fizycznej oceny, lecz jako ewentualne strategie, pozwalające uchylić zdziwienie nad matematycznością świata. Stawiam więc następujący problem: Załóżmy, że któraś z „chaotycznych filozofii" jest słuszna, że istotnie prawa przyrody są tylko jakimiś „probabilistycznymi uśrednieniami" pierwotnego chaosu. Czy przy tym założeniu rzeczywiście znika zagadnienie matematyczności świata? Czy nie pozostaje już nic do wyjaśnienia?

3. PROBABILISTYCZNA ŚCIEŚNIALNOŚĆ ŚWIATA

Jest rzeczą zastanawiającą, że coś, co jest „statystycznie przeciętne", w naszym odczuciu nie wymaga wyjaśnienia; natomiast jeżeli wydarzy się coś „odbiegającego od średniej", natychmiast pytamy o rację: dlaczego stało się tak, a nie inaczej? Rodzi się podejrzenie: czy nie działa tu przyzwyczajenie? „Średnie statystyczne" zdarzają się najczęściej — tak przecież zostały zdefiniowane — nic więc dziwnego, ża

[10]Smolin utrzymuje, że z jego koncepcji takie przewidywania wynikają. Można by się z tym zgodzić, ale tylko przy bardzo szerokim rozumieniu przewidywań empirycznych.

nasz instynkt pytania o racje czuje się zaniepokojony tylko wówczas, gdy zdarza się coś — jak powiadamy – „nieprawdopodobnego”. Stąd, gdyby rzeczywiście udało się wykazać, że prawa przyrody są tylko wynikiem uśrednień pewnych chaotycznych procesów, bylibyśmy skłonni sądzić, że problem „racjonalności świata” został zlikwidowany; nasz instynkt dociekania byłby zaspokojony.

Spróbujmy jednak wyjść poza odczucia i poddajmy zagadnienie głębszej analizie. Statystyka ma swoją teoretyczną podstawę w rachunku prawdopodobieństwa i naszą analizę musimy rozpocząć od nieco dokładniejszego przyjrzenia się tej pięknej matematycznej teorii.

Wiele działów nowożytnej matematyki ma swoje źródło we wzajemnym oddziaływaniu teorii i zastosowań. Nie inaczej było w przypadku rachunku prawdopodobieństwa. Można by nawet sądzić, że w tym przypadku rola doświadczenia była większa niż przy powstaniu innych teorii matematycznych. Rachunek prawdopodobieństwa narodził się z rozważań nad grami hazardowymi i – zwłaszcza w swoich bardziej elementarnych ujęciach — nosi na sobie ślady tego pochodzenia. Co więcej, interpretacje samego pojęcia prawdopodobieństwa bardzo trudno oddzielić od odniesień do rzeczywistości. Do dziś fakt ten prowokuje liczne dyskusje filozoficzne, dotyczące pojęć związanych z rachunkiem prawdopodobieństwa. Jednakże w analizach, które nastąpią, będę się starać w maksymalnym stopniu unikać uwikłania w filozoficzne spory. W tym celu należy ustalić znaczenie pojęć, jakimi będę się posługiwać, przez umieszczenie ich wewnątrz odpowiedniej struktury matematycznej. Tylko wówczas, na skutek wejścia w syntaktyczne relacje z innymi elementami tworzącymi tę strukturę, pojęcia te zaczną funkcjonować bez zniekształcającego wpływu „odniesień zewnętrznych”. Tego rodzaju strukturę dla rachunku prawdopodobieństwa ustala standardowa aksjomatyka Kołmogorowa.

We współczesnym ujęciu teoria prawdopodobieństwa jest szczególnym przypadkiem teorii miary. *Miara* w sensie matematycznym jest funkcją zdefiniowaną na podzbiorach pewnej przestrzeni, zwanej *przestrzenią miary*. Podzbiory te, zwane *podzbiorami mierzalnymi*, można interpretować jako obiekty, które mogą być mierzone. Funkcja, zdefiniowana na podzbiorach mierzalnych (czyli miara), przypisuje każdemu z tych podzbiorów dodatnią liczbę rzeczywistą, którą możemy utożsamić z wynikiem pomiaru. Powiedzmy, że chcemy mierzyć objętość pewnych podzbiorów 3-wymiarowej przestrzeni Euklidesa. Przestrzenią miary będzie zbiór tych podzbiorów przestrzeni Euklidesowej, a miarą — funkcja, która każdemu z tych podzbiorów przypisuje dodatnią liczbę rzeczywistą, a mianowicie liczbę wyrażającą objętość danego podzbioru (w wybranych jednostkach). Z matematycznego punktu widzenia istotny jest fakt, że pojęcie mierzenia nie ma sensu poza przestrzenią miary.

Znane są przykłady, w których nie każdy podzbiór danej przestrzeni jest podzbiorem mierzalnym, tzn. nie każdy obiekt w takiej przestrzeni daje się mierzyć, lub innymi słowy: nie każdemu obiektowi w takiej przestrzeni daje się sensownie przypisać liczbę rzeczywistą, będącą wynikiem jakiegoś pomiaru. Podzbiory niemierzalne mogą się niekiedy wydawać „dziwne", ale nie są one czymś wyjątkowym. Można je znaleźć nawet w otwartym przedziale (0,1) prostej rzeczywistej[11]. Warto zauważyć, że ten matematyczny fakt może służyć jako kontrprzykład w stosunku do dość rozpowszechnionego przekonania, iż „to, czego nie da się zmierzyć, nie istnieje".

To były podstawowe pojęcia teorii miary. A *prawdopodobieństwo* (w sensie matematycznym) jest po prostu miarą spełniającą jeszcze jeden, dodatkowy warunek: miara całej przestrzeni miary musi równać się jedności (jak mówią matematycy, „musi być unormowana do jedności") zakłada się więc, że miara żadnego z podzbiorów mierzalnych nie może być mniejsza od zera i większa od jedności. Jeżeli ten dodatkowy warunek jest spełniony, przestrzeń miary nazywamy *przestrze-*

[11]Oto przykład. Niech a i b będą różnymi od siebie liczbami rzeczywistymi z przedziału (0,1). Jeżeli różnica a-b jest liczbą wymierną, piszemy ab. Ustala to oczywiście relację równoważności. Definiujemy podzbiór A w ten sposób, że z każdej klasy równoważności wybieramy dokładnie po jednej liczbie rzeczywistej. Można udowodnić, że A nie jest podzbiorem mierzalnym (por. np. R. Geroch, *Mathematical Physics*, University of Chicago Press, 1985, ss. 254-255).

nią prawdopodobieństwa, a funkcję będącą miarą na tej przestrzeni — *rozkładem prawdopodobieństwa*.

Zauważmy, że w dotychczasowych definicjach nie było niczego, co w jakikolwiek sposób odpowiadałoby odczuciu niepewności czy nieokreśloności, jakie zwykle wiążemy z pojęciem prawdopodobieństwa. Ustalamy pewne aksjomaty, definiujące przestrzeń prawdopodobieństwa i rozkład prawdopodobieństwa, natomiast wszystkie konsekwencje wynikają z tych aksjomatów na mocy logicznej dedukcji, dokładnie tak samo jak w innych działach matematyki. Intuicje, jakie wiążemy z pojęciem prawdopodobieństwa, wchodzą do teorii poprzez jej interpretację. Zwykle matematykę odnosi się do rzeczywistości za pośrednictwem fizyki. Dzieje się to w ten sposób, że jakaś teoria fizyczna utożsamia pewne abstrakcyjne pojęcia matematycznee z pewnymi dającymi się mierzyć wielkościami. Mówimy wówczas, że rozważana struktura matematyczna uzyskała *interpretację fizyczną* (lub że został zbudowany *fizyczny model* danej matematycznej struktury). W ten sposób, na przykład, matematyczna przestrzeń Riemanna w ogólnej teorii względności zyskuje fizyczną interpretację jako przestrzeń (lub czasoprzestrzeń) pewnego modelu Wszechświata. Wydaje się wszakże, że odnoszenie rachunku prawdopodobieństwa do rzeczywistości łamie tę strategię. Wystarczy zajrzeć do jakiegokolwiek podręcznika matematycznej teorii prawdopodobieństwa, by znaleźć w nim wiele odniesień do rzeczywistych sytuacji (np. rzucania monetą lub kostką) bez pośrednictwa teorii fizycznych. Wrażenie takie nie jest jednak całkiem poprawne. Mówiąc ściślej, teorię prawdopodobieństwa także odnosi się do rzeczywistych sytuacji za pośrednictwem modeli (teorii) fizycznych, ale sytuacje te są na ogół tak proste, że matematyk nie prosi o pomoc fizyka, lecz sam na swój użytek buduje fizyczny model danej sytuacji (np. rzutu kostką). Ale nie dzieje się już tak, gdy sytuacja wymaga bardziej zaawansowanej wiedzy fizycznej, np. w termodynamice statystycznej lub w mechanice kwantowej (w tej ostatniej nawet samo pojęcie prawdopodobieństwa musi ulec istotnym modyfikacjom).

Przyjrzyjmy się nieco bliżej jakiejś prostej „sytuacji probabilistycznej”. Rozpatrzmy rzucanie jedną idealną kostką. Przestrzenią prawdopodobieństwa są wszystkie możliwe wyniki rzutu kostką, czyli przestrzenią prawdopodobieństwa jest zbiór 1, 2, 3, 4, 5, 6. Funkcję będącą miarą na tej przestrzeni, czyli rozkład prawdopodobieństwa, *f* definiujemy w ten sposób, że każdemu z możliwych wyników (każdemu *elementarnemu zdaniu*, jak powiadamy) przypisujemy wartość 1/6. A więc *f(1) = f(2) =. .. = f(6) = 1/6*. Oczywiście, wartość 1/6 wzięliśmy z doświadczenia. Wiemy bowiem, że w długich seriach rzucania kostką każde zdarzenie elementarne wypadnie w przybliżeniu 1/6 liczby wszystkich wykonanych rzutów (wiemy też, że im dłuższa seria, tym przybliżenie lepsze). W zasadzie jednak funkcję prawdopodobieństwa moglibyśmy określić inaczej. Z chwilą wszakże, gdy zdecydowaliśmy się na takie a nie inne jej określenie, staje się ono strukturalną częścią teorii prawdopodobieństwa.

Pozostańmy jednak przy wyborze wartości 1/6 dla wszystkich zdarzeń elementarnych. Funkcja *f(1) = f(2) =. .. = f(6)* = 1/6 jest dobrą funkcją matematyczną i nie wiąże się z nią żadna „niepewność". Ale możemy funkcji tej nadać tzw. *interpretację częstościową* (i zwykle to czynimy), poprzez którą wiążemy funkcję rozkładu prawdopodobieństwa z odczuciem „niepewności", jakie zwykle kojarzy się nam z prawdopodobieństwem. Np. *f(3)* = 1/6 interpretujemy jako względną częstość otrzymania „trójki" w długich seriach rzucania niesfałszowaną kostką. W takich seriach ok. 1/6 liczby wszystkich rzutów da nam „trójki" i wynik ten będzie tym dokładniejszy, im dłuższa będzie seria rzutów. Zauważmy jednak, że fakt ten nie jest własnością teorii prawdopodobieństwa, lecz jest własnością świata. Rzucanie kostką i otrzymywanie w długich seriach rzutów takich a nie innych wyników jest własnością świata a nie matematycznej teorii prawdopodobieństwa. Ta własność świata nazywa się jego *częstościową stabilnością*.

Zarówno w życiu codziennym, jak i w fizyce często mamy do czynienia ze *zdarzeniami losowymi*. Wynik jakiegoś eksperymentu nazywamy *losowym*, jeżeli nie jest on jednoznacznie określony przez warunki doświadczenia pozostające pod kontrolą eksperymentatora. Kolejne wyniki takiego doświadczenia są nieprzewidywalne i tu właśnie pojawia się odczucie „niepewności". Jeżeli w długiej serii *n* tego rodzaju doświadczeń, n_A eksperymentów daje wynik A, a $n - n_A$ daje jakieś inne wyniki, to liczbę $f(A) = n_A/n$ nazywamy *częstością* występowania A. Doświadczenie uczy, że im większe jest n, tym bardziej $f(A)$ przybliża się do pewnej ściśle określonej liczby. Tę właśnie tendencję (przybliżania się wielkości $f(A)$ do ściśle określonej liczby) nazywamy *częstościową stabilnością* świata.

Jest to zadziwiająca własność świata! Nie widać żadnego apriorycznego powodu, dla którego świat miałby być częstościowo stabilny. Ale jest. I właśnie dzięki temu, że jest, możemy do niego stosować rachunek prawdopodobieństwa. Gdyby świat nie był częstościowo stabilny, gdyby długie serie doświadczeń w rodzaju rzutów kostką za każdym razem dawały co innego, bez żadnego „ładu i składu”, rachunek prawdopodobieństwa byłby zupełnie bezsilny wobec takiego „ogólnego bałaganu świata”. To, że tak nie jest, nazywa się niekiedy *probabilistyczną ścieśnialnością świata*.

A priori można by oczekiwać, że naprawdę chaotyczne zjawiska wymykałyby się wszelkiemu matematycznemu opisowi. Jednakże nie tylko tak nie jest, lecz — co więcej — zjawiska, które nazywamy chaotycznymi lub losowymi, dają się „ścieśniać” do formuł teorii prawdopodobieństwa. Probabilistyczna ścieśnialność świata okazuje się szczególnym przypadkiem jego algorytmicznej ścieśnialności[12]; co więcej, chciałoby się powiedzieć, że jest to najbardziej zadziwiający jego szczególny przypadek.

4. ODPOWIEDŹ

Przypomnijmy pytanie postawione przy końcu drugiego podrozdziału: Czy założenie, że prawa przyrody są wynikiem pewnego uśrednienia zjawisk zupełnie chaotycznych, rozgrywających się na najgłębszym poziomie świata, likwiduje zdziwienie ontologiczną matematycznością świata? W pytaniu tym mieści się wyraźna sugestia, iż zdziwienie w takiej sytuacji rzeczywiście uległoby likwidacji, ponieważ zlikwidowana zostałaby matematyczność świata. Zgodnie z tą su-

[12]Por. art. cytowany w przypisie 1.

gestią świat jest tylko pozornie („powierzchniowo") matematyczny. Na jego najgłębszym poziomie nie ma żadnych matematycznych reguł; panuje tam chaos, rozumiany jako brak jakichkolwiek ograniczeń.

W świetle analiz przeprowadzonych w poprzednim podrozdziale sugestia taka okazuje się fałszywa. Nawet jeżeli podstawowy poziom Wszechświata jest chaotyczny, to musi on mieć przynajmniej jedną matematyczną własność — musi być probabilistycznie ścieśnialny. Gdyby tej własności nie miał, nie można by do niego stosować rachunku prawdopodobieństwa i co za tym idzie prawa przyrody nie mogłyby się wyłonić z pierwotnego chaosu jako wynik jakichś procesów uśredniających; chaos prowadziłby tylko do chaosu.

A zatem zdziwienie matematycznością świata pozostaje i ma ono wszelkie cechy filozoficznego zdziwienia — łączy się z tradycyjnym problemem, z jakim filozofowie zmagali się od dawna, a mianowicie z problemem poznawalności świata, i dodaje do tego problemu nowe aspekty, ujawnione przez ogromny postęp zmatematyzowanych nauk empirycznych. Zdziwienie matematycznością świata okazuje się niezwykle żywotne: kolejna próba jego zlikwidowania nie tylko okazała się nieskuteczna, lecz ujawniła także szczególną rolę metod probabilistycznych w badaniu świata.

5. WSZECHŚWIAT PROBABILISTYCZNY

Założenie, że na swoim najgłębszym poziomie świat jest całkowicie chaotyczny, zostało przeze mnie przyjęte dla celów dyskusji (rozumowanie było typu: nawet jeżeli tak jest, to...). Istnieje jednak wiele racji przemawiających za tym, że tak nie jest. Wszystkie współczesne próby poszukiwania teorii fundamentalnej i częściowe wyniki już w tej dziedzinie uzyskane zakładają coś wręcz przeciwnego — wszystkie one poszukują bardzo wyrafinowanej matematycznej struktury, która by skutecznie modelowała poziom podstawowy. A skromne rezultaty teorii chaotycznego cechowania dotychczas (o ile mi wiadomo) nie podjęte przez następców, dodatkowo potwierdzają tę diagnozę. Chaotycznej kosmologii Lindego-Smolina należy raczej przypisać rangę interesującej wariacji na ważne tematy niż autentycznej teorii naukowej. Istnieją zatem poważne racje, by sądzić, że świat ma nie tylko własność probabilistycznej ścieśnialności, ale jest również matematycznie ścieśnialny pod innymi względami (posiada własność algorytmicznej ścieśnialności w sensie dyskutowanym w art. cytowanym w przypisie 1).

Nie zmniejsza to jednak, a tym bardziej nie dyskwalifikuje, roli metod probabilistycznych w poznawaniu świata. Przeciwnie, postęp fizyki w ostatnich kilkudziesięciu latach rolę tych metod coraz bardziej uwydatnia. Naturalnym uogólnieniem mechaniki klasycznej (na wielką liczbę obiektów) jest mechanika statystyczna, która byłaby niemożliwa bez konsekwentnego stosowania rachunku prawdopodobieństwa i wywodzących się z niego metod statystycznych. Metody te dały podstawy termodynamice, która okazała się ważna nie tylko ze względu na swoje techniczne zastosowania, lecz również ze względu na podstawową rolę, jaką odgrywa w strukturze współczesnej fizyki teoretycznej. Już w XIX w. pojawiły się spekulacje, że druga zasada termodynamiki (zasada wzrostu entropii) może być odpowiedzialna za kierunek upływania czasu (tzw. problem strzałki czasu). Zgodnie z tymi przypuszczeniami to, że nie możemy cofnąć się do swojej młodości nie jest wynikiem jakiejś „ontologicznej konieczności”, lecz następstwem faktu, iż nasze ciało (podobnie jak inne obiekty makroskopowe) składa się z ogromnej liczby cząstek, podległych statystycznym prawidłowościom. W drugiej połowie XX w. rozważania z zakresu fizyki statystycznej nabrały jeszcze większego znaczenia, gdy do ich analizowania nauczono się stosować matematyczne metody nieliniowe. Okazało się, że tylko przy pomocy tych metod można wyjaśnić procesy wzrostu złożoności we Wszechświecie, z procesem ewolucji biologicznej włącznie.

Mówiąc o roli pojęcia prawdopodobieństwa w fizyce teoretycznej trudno nie poświęcić nieco uwagi mechanice kwantowej, tym bardziej, że w tej podstawowej teorii fizycznej samo pojęcie prawdopodobieństwa ulega daleko idącym zmianom. Z matematycznego formalizmu mechaniki kwantowej wynika, że stosowanie w nim struktur związanych z prawdopodobieństwem nie jest następstwem faktu, iż mamy do czynienia z tak wielką liczbą indywiduów, że nie jesteśmy w stanie śledzić zachowania się każdego z nich oddzielnie, lecz tego, że świat na poziomie fundamentalnym po prostu ma naturę probabilistyczną. Sukcesy empiryczne mechaniki kwantowej i jej rozszerzenia — kwantowych teorii pól (a są to sukcesy nie mające sobie równych w dotychczasowej historii fizyki!) stanowią mocne potwierdzenie tego dziś niemal powszechnego przekonania fizyków-teoretyków.

Stosowanie metod probabilistycznych w podstawowych teoriach fizycznych nie tylko nie eliminuje zdziwienia matematycznością świata, ale, nadając mu swoistą perspektywę, jeszcze je wzmacnia. Ciągi zdarzeń, składające się na historię Wszechświata są nie tyle po prostu „dane", ile raczej, zanim zaistnieją, posiadają pewną potencjalność urzeczywistnienia się. Ale jest to potencjalność podległa prawom prawdopodobieństwa (kwantowego na poziomie fundamentalnym i standardowego na poziomie makroskopowym), czyli pewnemu pięknemu formalizmowi matematycznemu, któremu została nadana interpretacja związana z naszą intuicją „możliwości zaistnienia". Wiele danych współczesnej nauki wskazuje na to, że proces kosmiczny nie rozwija się jak zwój pergaminu, na którym od początku wszystko jest już zapisane, lecz jest procesem twórczym jak sama matematyka.