

**CO TO JEST CZĄSTKA  
ELEMENTARNA?**

◇ Gordon McCabe, *The Structure and Interpretation of the Standard Model*, Elsevier, Amsterdam — Oxford, etc. 2007, ss. XI+251.

Każdy człowiek jest po trosze filozofem przyrody, bo każdy ma jakieś wyobrażenia na temat „budowy świata”. A jeżeli ktoś miał bodaj przelotny kontakt ze współczesną nauką, to pytanie „jakie są podstawowe składniki materii?” jest dla niego prawie nieuniknione. Chcąc na to pytanie odpowiedzieć, należy oczywiście zwrócić się do fizyki kwantowej. Problem jednak w tym, że na terenie fizyki kwantowej odpowiedź na to pytanie jest niezmiernie trudna. Jeżeli zgodzimy się z tym, że matematyczna struktura mechaniki kwantowej daje nam jakiś wgląd do struktury świata mikroskopowego, to podstawowym faktem interpretacyjnym jest to, że pojęcie stanu obiektu kwantowego jest dobrze określone (odpowiada mu kierunek w przestrzeni Hilberta), podczas gdy pojęcie obiektu kwantowego jest mgliste i niejednoznaczne. Najczęściej używamy go na zasadzie, że jeżeli stan, to musi być stan czegoś: obiekt kwan-

towy to właśnie coś, co może znajdować się w różnych stanach. A co z cząstką? Przecież wszyscy wiemy, że istnieją elektrony, protony, neutrony, kwarki. Czy nie są to obiekty kwantowe? Są, ale obiektami kwantowymi (w powyższym sensie) mogą być także agregaty cząstek (np. atomy lub molekuly), a nawet pola lub układy pól. Co więcej, nawet z wyodrębnieniem pojedynczej cząstki mogą być poważne kłopoty.

Nie znaczy to jednak, że z pojęciem cząstki elementarnej w fizyce kwantowej trzeba się ostatecznie pożegnać. Chociaż i takie wyjście z sytuacji byłoby możliwe. Należałoby wówczas uznać pojęcie stanu za pojęcie pierwotne, a pojęć obiektu lub cząstki używać tylko pomocniczo. Racją jednak, by tak nie czynić, jest nie tylko fakt, iż byłaby to ontologia niezgodna z naszą intuicją (w świecie kwantów rzadko należy wierzyć potocznej intuicji), lecz przede wszystkim to, że w niektórych sytuacjach (w podejściu pierwszego kwantowania, gdy nie bierze się pod uwagę oddziaływań) można wskazać na matematyczne struktury, które odpowiadają — przynajmniej w przybliżeniu — naszemu pojęciu cząstki elementarnej. Jest to o tyle ważne, że — z jednej strony — może stano-

wić pomost interpretacyjny od pojęć mikroświata do pojęć makroświata, a - z drugiej strony — w konfrontacji z dokładniejszą teorią (np. z drugim kwantowaniem) może pozwolić dostrzec, jakich bardziej dokładnych struktur to pojęcie cząstki elementarnej jest przybliżeniem.

Jeżeli zastosujemy procedurę kwantowania do klasycznej mechaniki relatywistycznej i klasycznej relatywistycznej teorii pola, otrzymujemy relatywistyczną mechanikę kwantową. W procedurze kwantowania można wyróżnić tzw. pierwsze kwantowanie i drugie kwantowanie. Procedury pierwszego kwantowania wystarczą do tego, by zbudować standardowy model (bez oddziaływań i z oddziaływaniami). Model standardowy, zwany również modelem standardowym cząstek elementarnych, jest obecnie powszechnie uznawanym modelem cząstek i wszystkich oddziaływań (za wyjątkiem grawitacji). Powszechna akceptacja tego modelu jest następstwem tego, że z wielką precyzją przewiduje on i wyjaśnia ogromne bogactwo faktów empirycznych. Wiadomo jednak na pewno, iż jest to model przybliżony. Świadczy o tym m.in. jego matematyczna konstrukcja: niektóre jej aspekty mają raczej charakter zestawienia fragmentów niż strukturalnej całości.

Dla przykładu rozpatrzmy swobodną cząstkę elementarną. Swobodną — to znaczy nie poddaną działaniu żadnych sił, elementarną

— to znaczy taką, o której zakładamy, że nie składa się z innych cząstek. W matematycznej strukturze teorii (pierwszego kwantowania) cząstkę taką reprezentuje liniowa, rzutowa, unitarna i nieprzywiedlna reprezentacja lokalnej grupy symetrii czasoprzestrzeni. Laik może być zaskoczony, że tak abstrakcyjna struktura może być matematycznym odpowiednikiem czegoś, co uważamy za podstawowy składnik materii. Jak wiadomo, grupa jest matematyczną strukturą, która modeluje różnego rodzaju symetrie. W przypadku czasoprzestrzeni jest to najczęściej grupa Poincarégo lub jakaś jej podgrupa. Warto już tu zwrócić uwagę na związek swobodnej cząstki elementarnej ze strukturą czasoprzestrzeni. Fizyczna natura cząstki sprowadza się do (lokalnej) symetrii czasoprzestrzeni poddanej dodatkowym ograniczeniom. Nie jest tak, że cząstka porusza się w czasoprzestrzeni (jak aktor na scenie), lecz cząstka „jest zrobiona” z czasoprzestrzeni (dokładniej: z jej lokalnych symetrii).

Dodatkowe ograniczenia są jednak istotne. Cząstka nie jest po prostu lokalną grupą symetrii czasoprzestrzeni, lecz jej liniową reprezentacją. Liniowa reprezentacja grupy jest odwzorowaniem, które każdemu elementowi grupy przyporządkowuje, w sposób jedno-jednoznaczny liniowe przekształcenie pewnej przestrzeni wektorowej  $V$  w siebie. Znaczący to mniej więcej tyle, że abstrak-

cyjna operacja symetrii zostaje „przetłumaczona” na konkretne przejście od jednego elementu wektorowej przestrzeni  $V$  do innego elementu przestrzeni  $V$ . Abstrakcyjna symetria niejako „wciela się” w konkretne operacje wewnątrz wektorowej przestrzeni  $V$ . Przestrzenią wektorową  $V$  jest bardzo często (a w książce McCabe’a zawsze) przestrzeń Hilberta, dobrze znana z mechaniki kwantowej. W ten sposób formalizm mechaniki kwantowej wchodzi do konstrukcji cząstki elementarnej.

Liniowa reprezentacja grupy symetrii musi być ponadto reprezentacją nieprzywiedlną. Odsyłając bardziej dociekliwych do odpowiedniej literatury, wystarczy jeśli powiemy, że reprezentacja grupy jest nieprzywiedlna, jeżeli nie można jej ograniczyć do domkniętego (właściwego) podobszaru wektorowej przestrzeni  $V$ . Jest to więc w pewnym sensie reprezentacja „najbardziej elementarna” (nie da się jej już „zmniejszyć”).

Dalej, reprezentacja grupy musi być unitarna. Ażeby to pojęcie miało sens, przestrzeń wektorowa  $V$  musi być wzbogacona o dodatkową strukturę (zwaną iloczynem skalarnym), która pozwala określić „długość” elementów przestrzeni  $V$  (czyli wektorów). Przekształcenia przestrzeni  $V$  w samą siebie nazywają się przekształceniami unitarnymi, jeżeli zachowują „długość” wektorów należących do przestrzeni  $V$ . Reprezen-

tacja grupy nazywa się reprezentacją unitarną, jeżeli odwzorowanie realizujące tę reprezentację, każdemu elementowi grupy przyporządkowuje przekształcenie unitarne przestrzeni  $V$ .

To jest schemat ogólny, ale istnieje przecież wiele różnych rodzajów cząstek elementarnych. W jaki sposób poszczególne rodzaje cząstek mieszczą się w tym schemacie? Wszystko zależy od lokalnej grupy symetrii czasoprzestrzeni. W przypadku modelu standardowego jest nią grupa Poincarégo (znana ze szczególnej teorii względności) lub jakaś jej podgrupa. Z doświadczenia wiadomo, że cząstki elementarne oddziałujące ze sobą słabymi siłami jądrowymi łamią symetrię odbicia przestrzennego (parzystość) i odwrócenia czasu. Wnosimy stąd, że czasoprzestrzeń jest wyposażona, przynajmniej lokalnie, w orientację przestrzenną i orientację czasową. A więc grupa symetrii czasoprzestrzeni nie może zawierać odbić przestrzennych i odbić czasowych. Taką grupą jest podgrupa grupy Poincarégo, zwana właściwą grupą Poincarégo. Jeszcze raz widzimy ścisły związek pomiędzy naturą cząstek elementarnych (cząstki oddziałujące słabo jądrowo) a strukturą czasoprzestrzeni (lokalna orientacja przestrzenna i czasowa).

Dana grupa symetrii może mieć (nieskończenie) wiele reprezentacji. W pewnych przypadkach rodziny re-

prezentacji można sparametryzować (tzn. poszczególnym reprezentacjom należącym do tej rodziny przyporządkować pewne liczby), np. parametrami  $m$  i  $s$ , gdzie  $m$  interpretuje się jako masę cząstki, a  $s$  jako spin cząstki. Jeszcze jedna okazja do zdziwienia: masa cząstki, która w naszym potocznym odczuciu nadaje ciałom ich materialność, w przypadku cząstki elementarnej okazuje się być parametrem numerującym reprezentację grupy symetrii.

Powiedzieliśmy wyżej, że stany obiektów kwantowych (np. cząstek elementarnych) są w fizyce kwantowej dobrze określone. Stan taki określa mianowicie promień (1-wymiarowa podprzestrzeń) przestrzeni Hilberta. Ale promień w przestrzeni Hilberta określa stan cząstki tylko względem danego układu odniesienia. Jeżeli przejdziemy do innego układu odniesienia, promień przestrzeni Hilberta również ulega przekształceniu, a przekształcenie to jest realizowane przez element lokalnej grupy symetrii (grupy Poincarégo) lub jej podgrupy. Możemy tu podziwiać misterne zestrojenie struktury świata z niezwykle skuteczną metodą jej matematycznego modelowania. Fizyka czasoprzestrzeni i fizyka kwantowa powstały zupełnie niezależnie od siebie (dopiero relatywistyczna mechanika kwantowa nawiązała wprost do szczególnej teorii względności), a jednak okazuje się, że istnieje pomiędzy nimi tak głą-

boki związek: zmiana układu odniesienia powoduje zmianę stanu kwantowego. Związek ten nie został przez nas „włożony ręką” do teorii; ujawnił się on w konsekwencji żmudnej matematycznej analizy.

Związek ten idzie jeszcze dalej. Często mówi się, że podstawowe prawa przyrody są zawarte w równaniach różniczkowych określających dynamikę danej teorii. W teorii swobodnych cząstek elementarnych takimi równaniami są na przykład równanie Kleina-Gordona i równanie Diraca. W jakim stopniu równania te są związane z matematycznymi strukturami pokrótce przedstawionymi powyżej? Jak po dotychczasowych wyjaśnieniach można oczekiwać, nie daje się zmodyfikować lokalnej struktury czasoprzestrzeni (jej wymiaru, sygnatury, orientacji czasowej i orientacji przestrzennej) bez odpowiedniej modyfikacji równań dynamicznych. Równanie Kleina-Gordona i równanie Diraca są zdeterminowane przez unitarne, nieprzywiedlne reprezentacje lokalnej grupy symetrii przestrzeni, na której te równia są określone.

Jest to tylko mała próbka analiz McCabe’a: pewne aspekty rozdziału 2, przetłumaczone z bardzo technicznego języka na język nieco bardziej dostępny dla nieprzygotowanego ale wytrwałego czytelnika. Dalsze rozdziały obejmują analizę pól cechowania, pól oddziaływających ze sobą (w szczególności oddziaływa-

nie pól materii z polami cechowania) i w końcu sam model standardowy. Wprawdzie książka jest kompletna w tym sensie, że czytelnik znajduje w niej wszystkie potrzebne definicje, ale wątpię, by ktoś nie mający dobrego przygotowania w dziedzinie fizyki matematycznej zdołał przebrnąć choćby przez jeden rozdział. Z drugiej strony, fizyk-teoretyk będzie rozczarowany, że znajdzie w tej książce tylko definicje i struktury bez „wyprowadzeń wzorów” i rachunków niezbędnych do operowania strukturami. Mówiąc nieco paradoksalnie, z książki McCabe’a nie można nauczyć się modelu standardowego, ale można go zrozumieć. Bo też taki jest cel tej książki. Jest to książka pisana przez filozofa fizyki, który postawił przed sobą zadanie przeanalizowania standardowego modelu cząstek elementarnych w świetle filozoficznego poglądu zwanego strukturalizmem.

Oto krótka charakterystyka strukturalizmu, powtórzona za McCabe’em. Strukturalizm (którego jednymi z pierwszych propagatorów byli Patrick Suppes, Joseph Sneed i Frederick Suppe) jest poglądem, wedle którego dziedziną teorii fizycznej jest konkretna realizacja (*instance*) pewnej matematycznej struktury. Aksjomatycznie strukturę matematyczną definiuje się jako zbiór (lub rodzinę zbiorów), którego niektóre podzbiory lub elementy mogą być wyróżnione, wyposażony w pewne relacje lub operacje; całość musi po-

nadto spełniać odpowiednie warunki (aksjomaty).

Strukturalizm jest semantyczną koncepcją teorii fizycznej; w przeciwieństwie do koncepcji syntaktycznej (dominującej do niedawna w filozofii nauki), zgodnie z którą teoria fizyczna jest niczym innym, jak tylko częściowo zinterpretowanym systemem aksjomatycznym (formalizm teorii); częściowo — ponieważ tylko niektórym terminom systemu aksjomatycznego przypisuje się znaczenia empiryczne.

McCabe wyróżnia dwa rodzaje strukturalizmu: strukturalistyczny realizm i strukturalizm empirystyczny. Pierwszy utrzymuje, że istnieje fizyczna dziedzina, wyposażona w pewną strukturę, poza empirycznymi zjawiskami. Drugi utrzymuje, że zjawiska fizyczne są jedynie zorganizowane przy pomocy pewnej (pomocniczej) struktury matematycznej. Są niejako zanurzone w tej strukturze, która w stosunku do zjawisk empirycznych spełnia funkcje eksplanatywne i perdykcyjne, co jednak nie oznacza, że odnosi się ona do czegokolwiek istniejącego poza zjawiskami. McCabe wyraża przekonanie, że istnieją teorie fizyczne (np. ogólna teoria względności), które dopuszczają interpretację realistyczną; i teorie (być może mechanika kwantowa), które dopuszczają jedynie interpretację empirystyczną. On sam, w zasadzie w całej książce, zakłada realizm strukturalistyczny, który sta-

nowi dla niego narzędzie metodologiczne wszystkich przeprowadzanych analiz.

McCabe przypomina także rozróżnienie Jamesa Ladymana realizmu strukturalistycznego na realizm epistemiczny i realizm ontyczny. Pierwszy utrzymuje, że teorie fizyczne, interpretowane w duchu realizmu strukturalistycznego ujawniają strukturę świata, poza którą może jednak istnieć coś (podłoże), co posiada tę strukturę. Drugi utrzymuje, że poza strukturą, ujawnianą przez teorie fizyczne, nic w świecie nie istnieje. McCabe w swojej książce pracuje w oparciu o ontyczną wersję realizmu.

Podsumowując: Nie jest to książka dla ciekawych, którzy by chcieli dowiedzieć się czegoś na temat standardowego modelu cząstek elementarnych. Nie jest to książka dla adepta fizyki, który chciałby się nauczyć modelu standardowego (ze wszystkimi wyprowadzeniami i rachunkami). Nie jest to książka dla filozofa, który chciałby poczytać sobie coś na temat strukturalizmu w filozofii fizyki. Jest to dzieło badawcze, które w sposób pionierski ujawnia funkcjonowanie interpretacji strukturalistycznej w jednym z najbardziej owocnych działów współczesnej fizyki — w standardowym modelu cząstek elementarnych.

*Michał Heller*

## ***KŁOPOTY Z WIELOŚWIATEM***

◇ *Universe or Multiverse?*, red. Bernard Carr, Cambridge University Press, Cambridge 2007, ss. XVI+517.

Jednym z hasłowych tematów, mocno ostatnio faworyzowanym przez naukową modę, jest hipoteza (lub różne hipotezy) istnienia wielu, może nawet nieskończonego wielu, wszechświatów. Ponieważ słowo „wszechświat” w tej sytuacji okazało się za ciasne, ukuto określenie „wieloświat” (po angielsku *multiverse*). Hipoteza ta najpierw pojawiła się — dość nieśmiało — w związku ze spekulacjami dotyczącymi tzw. zasad antropicznych, ale szybko zafaworyzowała wyobraźnię szerszej publiczności i wkrótce także wielu badaczy. Trzeba również przyznać, że wśród wielu innych wzbudziła zdecydowany opór. Idea, raz zaszczerpiona, zaczęła pojawiać się w interpretacjach rachunkowych, najpierw w kontekście kosmologii inflacyjnej, a potem w kosmologicznych wersjach teorii superstrun i innych poszukiwaniach „ostatecznej teorii”. Nie trzeba było długo czekać, by ideą wieloświata zainteresowali się filozofowie a także teologowie. W marcu 2003 r. na Uniwersytecie Stanforda, z inicjatywy Fundacji Templetona, odbyło się sympozjum na temat, którego sformułowanie stało się tytułem omawianej książki. Sympo-