

Zygmunt CHYLIŃSKI

PODSTAWOWE MODELE TEORETYCZNE FIZYKI
I OPERACJONIZM

*Tylko teoria może zdecydować
co jest obserwowalne.*

A. Einstein

1. Podstawowe modele teoretyczne a stałe uniwersalne

Przez Podstawowy Model Teoretyczny (PMT) fizyki będziemy rozumieć zespół podstawowych pojęć jak i praw (zasad) czy symetrii, które obowiązują *całą* fizykę teoretyczną. Oczywiście, PMT musi wprowadzić swoje aprioryzmy, nazwijmy je aprioryzmy hipotetyczne, bez których nie ma żadnej teorii, w szczególności fizyki.

Z określenia PMT wynika, że ewentualna zmiana PMT oznacza, iż w zasadzie, modyfikacji podlega każda dziedzina fizyki. Inną sprawą jest czy w konkretnej sytuacji poprawki wynikłe z nowego PMT są istotne, czy nie. Dotyczy to sprawy ilościowej, ale nie zasadniczej, która nas przede wszystkim interesuje. Przeciwstawieniem PMT będzie Szczególny Model Teoretyczny (SMT), który ogranicza się do jednego działu fizyki i jego zmiana nie musi dotyczyć całej fizyki. W praktyce jesteśmy zmuszeni operować szeregiem SMT celem ujęcia realnego procesu analizą ilościową, ale pamiętajmy, że dla każdego SMT, PMT gra rolę „niewzruszonej” prawdy. Owa hierarchia modeli jest jednym z powodów, iż podstawowe modele teoretyczne chciałyby się nazwać „rzeczywistością”, tj. odmówić im cechy modelowości na rzecz absolutnej prawdy, którą mia-

*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.

łyby reprezentować. Oczywiście tak nie jest, a sam fakt, iż PMT zmieniają się — o czym przekonamy się poniżej — najlepiej uwidacznia ich modelowy charakter. Nie wątpimy, iż rzeczywistość fizykalna jest jedna, gdy tymczasem kolejne wielkie teorie (PMT) starają się coraz szczegółowiej ją podpatrzyć; a więc zmieniają się. Osobną sprawą jest, czy te kolejne, coraz pełniejsze modele zmiierają do wysycenia sposobu analizy rzeczywistości, jaki postawiła sobie fizyka. Analiza rozwoju PMT zdaje się być najlepszą odpowiedzią na to wielkie pytanie, które pełnej odpowiedzi chyba nigdy nie otrzyma.

Podstawowym, pierwszym modelem teoretycznym jest fizyka niutowska, która panowała od — umownie licząc — czasów Kopernika, aż do odkrycia teorii względności w 1905 roku. Nic dziwnego, że jej hipotetyczne aprioryzmy awansowały rangi aprioryzmów do absolutnych. Dopiero, „jak w życiu”, trudności tego modelu w rozszerzonym świecie nowych eksperymentów zmusiły do krytycyzmu i przywrócenia hipotetyczności pojęciom, które w gruncie rzeczy miały taki status od początku. Kolejne trzy PMT powstały po roku 1905 w przeciągu zaledwie trzydziestolecia, a nawet dwudziestolecia, stąd nic dziwnego, że nawet w myśleniu fachowców stale widać obciążenie tradycją wyjściowego modelu Newtonskiego, mającego za sobą ogromne tradycje kulturowe. Wiele lat po odkryciu silnika spalinowego wygląd samochodów przypominał bryczki, landa, karoce itp., ponieważ nie umiano od razu wyciągnąć całokształtu konsekwencji, płynących z radykalnej zmiany sprowadzającej się do tego, że samochód nie wymaga zaprzęgu. Jeszcze w moim dzieciństwie jeździły znakomite już silnikowe samochody, które nie miały nadmuchu ciepłego powietrza do swych pomieszczeń. O metr od zziębniętych (w zimie) pasażerów, okrytych kożuchami jak w saniach, stał gigantyczny piec-silnik, który trzeba było chłodzić, ale nie przyszło ludziom do głowy, by wykorzystać do tego pasażerów! Cała fizyka uczy tego rodzaju skromności pokazując wielkość-małość człowieka. Jest wielką naiwnością sądzić, że jesteśmy mądrzejsi od swych dziadków. Na pewno budujemy swoje karoce-samochody, co nam wytkną wnuki.

W klasyfikacji PMT centralną rolę odgrywają dwie stałe uniwersalne; stała Plancka \hbar oraz prędkość światła w próżni c . Ich uniwersalność płynie stąd, że ingerują one w strukturę geometrii fizycznej, a więc samej „sceny”, na której wtórnice rozgrywają się szczególne procesy fizyczne (sztuki) i której struktura determinuje symetrię praw fizyki rządzących tymi procesami. Własność tę mają *jedynie* te dwie stałe. W związku z tym, klasyfikację PMT oprzemy na zerowaniu-niezerowaniu się dwóch stałych: \hbar oraz $1/c$. Oczywiście, owo zerowanie odbywa się „na papierze”,

gdź w rzeczywistości obie stałe są skończone i nie można zmieniać ich wartości. Siłą kombinatoryki otrzymamy cztery PMT, które oznaczymy następująco:

	model			
1.	(0, 0)	klasyczny ($\hbar = 0$)	nierelatywistyczny ($1/c = 0$)	CNR
2.	(0, 1)	klasyczny ($\hbar = 0$)	relatywistyczny ($1/c \neq 0$)	CR
3.	(1, 0)	kwantowy ($\hbar \neq 0$)	nierelatywistyczny ($1/c = 0$)	QNR
4.	(1, 1)	kwantowy ($\hbar \neq 0$)	relatywistyczny ($1/c \neq 0$)	QR.

Do roku 1905 obowiązywał model (0, 0) — CNR — Newtonowski, od roku 1905 do 1925 model (0, 1) — CR — Einsteiowski, w latach 1924–1926 odkryto model (1, 0) QNR, kwantowy nierelatywistyczny i zaraz potem starano się go uogólnić na model (1, 1), najbardziej ambitny, najprawdziwszy (bo w rzeczywistości $\hbar/c \neq 0$), mający najkompletniej opisać rzeczywistość. Miał on zdać sprawę zarówno z tego, że rzeczywistość „jest” relatywistyczna, jak i kwantowa. Wydaje się, że do dziś, pomimo szeregu sukcesów, nie została dokonana synteza tych dwóch wielkich teorii: relatywistycznej i kwantowej, na odpowiednio głębokim poziomie — ciągle jeździmy samochodem–karocą!

2. Operacjonizm

Operacjonizm fizykalny stawia sobie za cel oczyszczenie języka fizyki z pojęć, które nie mogą być określone poprzez podanie stosownego ciągu operacji pomiarowych, które prowadziłyby do nadania sensu i wyznaczenia ilościowego danej wielkości, czy danego pojęcia.

Doprowadzony do ekstremum, operacjonizm nie wytrzymuje krytyki, ponieważ wraz z PMT w ramach którego pracuje, jest skazany, jak i ten ostatni na jego hipotetyczne aprioryzmy. W tym przekroju wydaje się być naiwny jak stary empiryzm, który chciał wszystko sprowadzić do „czystego doświadczenia”, którego nie ma. Jednakowoż, jest w operacjonizmie ogromnie ciekawa heureka, która zasługuje na swa metafizykę. Przykład: Nie istnieje i nie można pomyśleć sobie doświadczenia, które zbiorowisku mikrocząstek — np. elektronów — nadałoby takie cechy, iż elektrony uzyskałyby rozróżnialność (indywidualność) analogiczną do tej, jaką ma zbiorowisko, np. kul bilardowych. W związku z tym operacjonista powie o „zasadniczej nierozróżnialności” elektronów, która musi być zmanifestowana w samej teorii opisu mikrocząstek. Istotnie, fizyka kwantowa radykalnie zmienia opis zespołu cząstek identycznych, w duchu instrukcji operacyjnej, a jak się okazało, radykalna zmiana opisu cząstek identycznych dała klucz do zrozumienia budowy atomów, a więc materii.

Rzecz jasna, można uważać, że kierunek jest przeciwny: że nie „jakaś” zasadnicza nierozróżnialność spowodowała zmianę opisu zespołów, tylko że natura mikrocząstek jest zgoła inna od natury cząstek „dużych” (kul bilardowych) i to ona odzwierciedla się w statystyce. Zgoda, ale nawet akceptując ten punkt widzenia, nie zmniejsza się w niczym heurystycznej wartości operacjonizmu, który samodzielnie daje negatywną wskazówkę, w którym miejscu stary opis winien ustąpić miejsca jakiemuś nowemu. Sama „kontemplacja” inności mikrocząstek nie daje żadnej instrukcji, jak ma wyglądać nowy opis.

Z drugiej strony, wydaje się zastanawiające, iż operacjonizm został powołany do życia przez dwa gigantyczne fakty–przykłady: sławną krytykę Einsteińską pojęcia równoczesności oraz, pochodną doń, krytykę klasycznego toru elektronu w atomie, dokonaną przez Heisenberga. Tymczasem w obu przykładach „czysty operacjonizm” nie doprowadziłby do niczego. Przypuśćmy bowiem, że Newton byłby operacjonistą i zażądał sprecyzowania równoczesności zdarzeń odległych, jak to zrobił Einstein. Ponieważ cząstki „Newtonowskie”, tj. słuchające Newtonowskich praw ruchu, mogą poruszać się z dowolnie wielką prędkością, stąd sygnalizacja oparta na takich nieskończenie szybkich cząstkach doprowadziłaby do absolutnej równoczesności niutonowskiej, która uzyskałaby tym samym status zgodny z operacjonizmem. Podobnie z krytyką Heisenberga. W ramach modeli klasycznych ($\hbar = 0$) nie można kwestionować klasycznego toru żadnej cząstki, w szczególności elektronu w atomie, nie popadając w wewnętrzną sprzeczność logiczną teorii. Jak długo akceptuje się aparat pojęciowy fizyki klasycznej, tak długo klasyczny tor cząstki jest nieuniknionym pojęciem elementarnym teorii (podstawowych modeli klasycznych).

W dojściu do teorii względności Einstein posłużył się sygnałem świetlnym jako fundamentalnym środkiem przekazu informacji. Skłonił go do tego negatywny wynik doświadczenia Michelsona oraz własne przemyślenia całości zagadnienia powiedzmy, intuicja. Tej fundamentalności światła jako pośrednika przekazu informacji dał wyraz w teorii względności wprowadzając, znaną od dawna, stałą c do pierwszej geometrii fizycznej. W rezultacie dokonał zmiany PMT (CNR \rightarrow CR), której musiała podporządkować się cała fizyka, w szczególności mechanika Newtonowska. Od tego momentu *teoria odmówiła istnienia* cząstkom szybszym od c i istotnie sygnałów o prędkości większej od c nikt nigdy nie zaobserwował. Teoria odmówiła im istnienia, a doświadczenie w pełni poparło ten fundamentalny wniosek teorii względności. Analogicznie, Heisenberg porzucając klasyczny tor elektronu w atomie musiał zmie-

nić PMT z klasycznego na kwantowy, który wykreślił z istnienia „ostry” czaso–przestrzennie tor jakiegokolwiek cząstki realnej. Obaj wielcy twórcy zdawali sobie sprawę, że ich modyfikacje wymuszają zmianę PMT, skoro pierwszy wymyślił podane przez nas motto, a drugi je cytował, tworząc mechanikę kwantową. Jak Einstein stałą c , tak Heisenberg stałą Plancka \hbar wprowadził głębiej w strukturę PMT. W ten sposób nastąpiło rozoznanie fundamentalnego charakteru dwóch stałych \hbar oraz c .

Można powiedzieć, że „czysty operacjonizm” nie „przeskoczy” podstawowego modelu teoretycznego, w którym pracuje i tak też było w podanych wyżej dwóch przykładach. Jednakowoż w ramach ustalonego modelu operacjonizm może odgrywać bardzo cenną rolę probierza, czy model ten jest wewnętrznie spójny z operacyjnego punktu widzenia. O tej spójności operacyjnej danego PMT chcemy na zakończenie powiedzieć kilka słów.

3. Spójność–niespójność operacyjna danego modelu podstawowego

Przypatrzmy się, siłą rzeczy wrywkowo, wspomnianym czterem PMT pod kątem ich wewnętrznej spójności operacyjnej, przez którą rozumiemy to, że w ramach danego PMT wielkości teorii mają nadany sens operacyjny nie prowadzący do żadnej niespójności logicznej.

Model $(0, 0)$ legitymuje się spójną teorią matematyczną, jaką jest mechanika klasyczna. Jest to niewątpliwie model niekompletny, bo np. nie umie odpowiedzieć na pytanie dlaczego świeci słońce, ale w swoim zakresie jest operacyjnie spójny. Przykładowo, absolutna równoczesność Newtonowska jest operacyjnie określona i spójna z Newtonowskimi prawami ruchu. To samo dotyczy każdej wielkości i każdego pojęcia tego modelu.

Podobna sytuacja towarzyszy kolejnemu modelowi $(0, 1)$. Ponownie, model ten nie jest kompletny, ponieważ, przykładowo, nie tłumaczy ani przestrzennej rozciągłości obiektów materialnych, ani ich stabilności, ale wiążąc inherentnie takie dwie podstawowe wielkości jak bezwładność i energia, otwiera nowe perspektywy na strukturę świata. W ramach obu powyższych, klasycznych modeli podstawowych, każda wielkość jest bezpośrednio mierzalna, a więc istnieje ciąg operacji pomiarowych nadających sens i wartość każdej wielkości występującej w tych modelach. Są więc te modele operacyjnie spójne.

Trzeci model $(1, 0)$ wnosi radykalne zmiany w stosunku do swych klasycznych poprzedników. Przede wszystkim umie odtworzyć strukturę rozciągłą przestrzennie z najelementarniejszych struktur wyjściowych, jakimi są cząstki punktowe, tj. bezstrukturalne. Ponadto wyjaśnia, dla-

czego te struktury są stabilne, tj. dlaczego trzeba energii, aby rozbić talerz! Ta druga własność, całkowicie obca modelom klasycznym, zawdzięcza swe istnienie tzw. „przerwom energetycznym” pomiędzy różnymi stanami kwantowymi. Owe przerwy spełniają rolę naczynia dla znajdującego się w nim gazu lub płynu. Tak więc nierelatywistyczna mechanika kwantowa (QNR) dała celną odpowiedź na miriady pytań, na które fizyka klasyczna nie tylko, że nie umiała odpowiedzieć, ale nie operowała adekwatnymi pojęciami, aby je zadać. Model (1, 0) przeszedł ogólną próbę eksperymentu; tym niemniej trzeba zauważyć, że dokonał on istotnego wyłomu w ortodoksyjnym operacjonizmie. Wprowadził bowiem nową wielkość podstawową jaką jest funkcja falowa, która bezpośrednio nie jest mierzalna. Dobitną ilustracją powyższego są tzw. pola spinorowe, które zasadniczo nie są bezpośrednio mierzalne, ale są niezbędne dla skonstruowania spójnej teorii — modelu QNR.

Wreszcie ostatni model (1, 1), który miałby syntetyzować dwie wielkie teorie: relatywistyczną i kwantową. W zasadzie model ten winien dawać odpowiedź na wszystkie pytania fizyczne, a więc jako pierwszy pretenduje do kompletności, chyba, że obok stałych \hbar i c , czai się gdzieś jakiś nieznany trzeci czynnik. Obecna teoria–model QR (1.1) może się poszczycić szeregiem sukcesów, przede wszystkim w kwantowej elektrodynamice, ale lista jej negatywów jest nierównie bogatsza niż pozytywów. Natrafiamy na zasadnicze trudności chcąc, w ramach modelu (1, 1) zdać sprawę z wszelkiej dynamiki będącej bazą całej fizyki. Pamiętamy, że dynamika–oddziaływanie jest warunkiem *sine quo non* każdego pomiaru!

Przypatrzmy się modelowi (1, 1) od strony spójności operacyjnej. Otóż współczesny PMT (1, 1), tak jak jego trzech poprzednicy, bazuje na klasycznym kontinuum czasoprzestrzennym zdarzeń, tj. na zbiorze czwórek liczb (\vec{x}, t) określających lokalizację przestrzenną (\vec{x}) i czasową (t) zdarzenia. Tymczasem z zasad nieoznaczoności ($\hbar \neq 0$) wynika, iż operacyjne wyznaczenie współrzędnych zdarzenia (\vec{x}, t) wymaga, by system fizyczny dokonujący owej lokalizacji dysponował m. in. energią E tak dużą, by rozmycie energii ΔE wynikłe z lokalizacji czasowej, tj. z nieoznaczoności Δt , spełniało następującą nierówność:

$$\Delta E > \hbar/\Delta t.$$

Oczywiście wielkość samej energii systemu E musi być większa od rozmycia ΔE , skąd przy „ostrej” lokalizacji czasowej, tj. dla $\Delta t \rightarrow 0$ zachodzi:

$$E > \Delta E \xrightarrow{\Delta t \rightarrow 0} \infty \quad (1)$$

Z drugiej strony, Einsteińska relacja pomiędzy energią E i bezwładnością M : $E = Mc^2$, pokazuje, iż uwzględnienie skończoności drugiej stałej uniwersalnej c prowadzi do nieskończonej bezwładności M aparatury zdolnej dokonać lokalizacji czasowej zdarzenia (\vec{x}, t) z dowolną precyzją ($\Delta t \rightarrow 0$). Z (1) otrzymujemy więc, że:

$$M = E/c^2 \xrightarrow{\Delta t \rightarrow 0} \infty \quad (2)$$

Widzimy więc, że uwzględnienie skończoności obu stałych uniwersalnych \hbar i c — co charakteryzuje model (1, 1) — prowadzi do tego, iż idealna lokalizacja czasowa zdarzenia ($\Delta t = 0$) wymaga aparatury zdolnej wydatkować nieskończoną bezwładność M na sam proces lokalizacji owego zdarzenia. Skoro tak, to w duchu operacjonizmu w ramach modelu (1, 1) można wątpić, by zdarzenia (\vec{x}, t) dostarczały właściwych parametrów do opisu wewnętrznych stopni swobody systemów izolowanych o skończonej bezwładności M . Mówiąc obrazowo, system od swego wnętrza może nie akceptować, by parametryzowano go w terminach, których operacyjne wyznaczenie wymaga odeń czegoś, czego on dać nie może. Nie może wydatkować nieskończonej bezwładności M , dysponując (od wnętrza) bezwładnością skończoną: $M < \infty$. Oczywiście, od zewnątrz można zmierzyć jego strukturę (nb. w komplementarnym języku pędowym), ale chodzi tu o wewnętrzne sparametryzowanie układu izolowanego zostawionego sobie.

Jeżeli przejąć się tym głębokim argumentem o charakterze operacyjnym, wówczas współczesny model (1, 1) bazujący na czasoprzestrzeni jako swym aprioryzmie, winno się zastąpić innym modelem, w którym czasoprzestrzeń i jej symetria nie musiałyby towarzyszyć prawom ruchu wewnętrznych stopni swobody systemów izolowanych. Stałyby one na prawach klasycznego, korespondencyjnego kontinuum pomiaru.

Podkreślamy, że każdy kolejny PMT, jak „brzytwa Ockhama”, wykreśla część bytów modelu poprzedniego. Pamiętamy, że przejściu od modelu (0, 0) do (0, 1) towarzyszyło wykreślenie z realności sygnału rozchodzącego się z prędkością większą od c . Z kolei przejściu od modelu klasycznego (0, 0) lub (0, 1) do kwantowego towarzyszyło wykreślenie z istnień bezenergetyczno-pędowego przekaźnika informacji, których istnienie charakteryzuje oba modele klasyczne. Wreszcie można „na wyrost” spytać, jakie byty mogłyby być skreślone w myśl argumentów operacyjnych z modelu uwzględniającego skończoność \hbar , c oraz masy M badanego systemu. Wydaje się, że ofiarą padają: 1^o „sygnał” wewnątrz systemów izolowanych oraz 2^o problem jednego ciała. Elementarna RELACJA geometryczna wymaga istnienia przynajmniej dwóch ciał, zaś problem

jednego ciała może mieć tylko charakter graniczny, ale nie aprioryczny. Wiązałoby się to z realizacją pierwotnego programu Macha, który chciał wyeliminować fizyczną geometrię kontinuum pozbawionego materii.

Zygmunt Chyliński
Instytut Fizyki Jądrowej
Kraków