Czy fizyka jest nauką o materii?*

Michał Heller

Uniwersytet Jagielloński
Centrum Kopernika Badań Interdyscyplinarnych

Streszczenie. Często mówi się, że fizyka jest nauką o materii. Ale jeżeli zgodzić się, że terminy fizyczne to takie terminy, które odnoszą się do czegoś, co da się zmierzyć, to termin „materia" nie jest terminem fizycznym (nie ma jednostek materii). Chociaż prawdą jest, że fizycy często posługują się terminem „materia", podobnie jak wielu innymi terminami zaczerpniętymi z języka potocznego. Jednakże pojęcie materii ma także genezę filozoficzną, obrosło ono wieloma odniesieniami do filozofii. Prześledzenie tej genezy i tych odniesień jest wielce pouczające. Termin fizyczny najbliższy terminowi „materii" to „masa" (istnieją jednostki masy). Termin ten ma wspólny z pojęciem materii rodowód filozoficzny. Ważniejsze jednak od językowych subtelności jest pytanie: o czym właściwie – jeżeli nie o materii – mówi fizyka? „Byłoby *cudem*, niemal na skalę kosmiczną, gdyby teorie dokonywały tak wiele i tak dokładnych empirycznych predykcji jak, powiedzmy, ogólna teoria względności lub fotonowa teoria światła i gdyby to, co one mówią na temat fundamentalnej struktury świata, było nieprawdziwe lub 'istotnie' czy 'zasadniczo' nieprawdziwe" (John Worrall). W jakim sensie „prawdziwe" lub „nieprawdziwe"? Odpowiedź na to pytanie wyłania się z dokładnej analizy teorii fizycznych.

1. Terminy fizyczne

Czy fizyka jest nauką o materii? Chyba nie ma co do tego wątpliwości. Wszyscy tak mówimy. A jednak…

W 1927 roku ukazała się książka Percy Williamsa Bridgmana, laureata nagrody Nobla z fizyki, pt. *The Logic of Modern Physics*[2]. Zapoczątkowała ona nowy kierunek w filozofii fizyki, zwany operacjonizmem. Kierunek był nowy, ale kodyfikował poglądy od dawna funkcjonujące w fizyce. Zdaniem Bridgmana, terminy używane w fizyce mają znaczenie fizyczne, czyli są terminami fizycznymi, tylko wtedy, gdy można je zdefiniować z pomocą definicji operacyjnych, to znaczy takich, które podają sposób pomiaru wielkości, odpowiadających tym terminom. Bezpośrednią inspiracją dla Bridgmana były szczególna teoria względności i mechanika kwantowa, których sukcesy wyraźnie zależą od ścisłego powiązania pojęć z pomiarami. Widać to bardzo wyraźnie w metodzie, jaką kierował się Einstein, tworząc szczególną teorię względności: każde używane pojęcie (np. równoczesności) wiązał z bezpośrednimi wskazaniami przyrządów pomiarowych (np. zegarów).

A więc „materia" nie jest terminem fizycznym, ponieważ materii nie da się zmierzyć (nie ma jednostek materii). Można zmierzyć masę lub energię (w odczuciu językowym są to terminy bliskoznaczne z terminem „materia"), ale materii nie. Oczywiście, fizyk może mówić o materii. W swoim uniwersyteckim wykładzie używa on bardzo wielu słów zaczerpniętych z języka potocznego, które nie są terminami fizycznymi, a słowo „materia" jest niewątpliwie poprawnym słowem języka potocznego. Co więcej, jest to termin obciążony wieloma znaczeniami filozoficznymi, a – jak wiadomo – fizyka i filozofia mają sobie wiele do powiedzenia. Spróbujmy ten problem podrążyć.

2. Ewolucja pojęcia

Zacznijmy od etymologii. W rodowodach słów kryje się często wiele mądrości. W filozofii jest prawie regułą, że terminy uważane dziś za wysoce „techniczne", były kiedyś w potocznym użyciu i znaczyły coś zupełnie innego niż obecnie – coś, co musiało przebyć długą drogę przeobrażeń, by się wcielić w dzisiejsze filozoficzne pojęcie. W języku starogreckim słowo *hylé*, co tłumaczymy „materia", znaczyło pierwotnie drewno, las, w sensie czegoś ożywionego. Prawdopodobnie ten słowny rodowód sprawił, że gdy potem filozofowie greccy przyswoili to słowo filozofii, nie sformułowali niczego w rodzaju „zasady zachowania materii". Już w filozofii Arystotelesa termin „materia" nabrał technicznego zabarwienia. To właśnie „materia pierwsza", według tego myśliciela, jako potencjalny składnik wszystkich bytów, umożliwia zmienność. W zmienności (ruch jest jej szczególnym przypadkiem) musi bowiem istnieć niezmienne podłoże – materia pierwsza właśnie –.mogące przyjmować różne formy.

* Wykład wygłoszony na 45. Zjeździe Fizyków Polskich w Krakowie, w dniu 15 września 2019 roku.

2. Macmillan, New York.

Od początku, choć pierwotnie raczej nieśmiało, z materią wiązano pojęcie ilości. Na pytanie „ile czegoś?" można było odpowiadać albo odwołując się do objętości (np. garniec mąki), albo do ciężaru (funt mięsa). Znowu przeniknęło to do filozofii. Późniejsi arystotelicy za miarę ilości materii przyjmowali przestrzenną rozciągłość, nie bez wpływu definicji ciała, podanej przez Euklidesa w jego *Elementach*: „ciałem jest to, co ma długość, szerokość i głębokość". Stoicy polemizowali z tym stanowiskiem, twierdząc, że pojęcia ciała nie da się zredukować do geometrii. Ciała bowiem, oprócz rozciągłości, mają także ciężar i zdolność stawiania oporu.

Następny ważny krok[3] w ewolucji pojęcia materii dokonał się w średniowieczu. Uczeń Tomasza z Akwinu, Egidiusz Rzymski, w trakcie teologicznych sporów dotyczących Eucharystii (!), wyróżnił dwie ilości, jakie ciało posiada: objętość i „ilość materii". Jego zdaniem, o istnieniu tej ostatniej świadczy zjawisko zgęszczania i rozrzedzania, kiedy to objętość ulega zmianie, a „ilość materii" pozostaje ta sama (dalekie echo późniejszej zasady zachowania!).

Pojęcie ilości materii wkrótce przyjęło się w ówczesnej filozofii przyrody, głównie w związku z problemem ruchu. Arystoteles utrzymywał, że ciało może poruszać się tylko tak długo, jak długo jest poruszane przez inne ciało. Wyłom w tej doktrynie zrobił czternastowieczny filozof, Jan Burydan swoją teorią impetu (pędu). Gdy ciało zostaje popchnięte, otrzymuje pewną porcję impetu i porusza się tak długo (już bez interwencji ciała popychającego), jak długo impet się nie wyczerpie. A impet, według Burydana, jest proporcjonalny do ilości materii. Jak widzimy, intuicja była dobra (pęd jest istotnie proporcjonalny do masy), ale brak było jeszcze dobrze określonych, operacyjnych pojęć.

Twórcy nowej nauki, Galileusz i Kepler, byli już bardzo blisko współczesnego pojęcia masy. Galileusz w *Dialogu o dwu najważniejszych układach świata*[4] w usta Salviatiego, który reprezentował jego własne poglądy, włożył następujące słowa: „Ciało ruchome, poza naturalną skłonnością do odwrotnego kierunku, ma jeszcze przyrodzoną mu właściwość, wywołującą opór przeciwko ruchowi". Widzimy, jak trudno wyzwolić się z Arystotelesowskiej idei „naturalnych skłonności"! Kepler, uważnie analizując ruch ciał niebieskich, doszedł do wniosku, że „materia musi posiadać bezwładność, wyjaśniającą różnice w ich ruchach"[5]. Uważał też, że „jeżeli umieścić dwa kamienie w pobliżu siebie, poza sferą wpływu jakiegoś trzeciego ciała, to te dwa kamienie – na podobieństwo magnesów – spotkają się ze sobą, zbliżając się do siebie na odległość proporcjonalną do ich masy". W łacińskim oryginale „masa" jest oddana przez *moles*, a więc raczej ciężar niż masa. Gdyby nie to, bylibyśmy już blisko Newtonowskiego pojęcia masy i prawa ciążenia.

Kartezjusz, który w geometrii był prekursorem, zapoczątkował wielki projekt geometryzacji fizyki, ale program ten okazał się przedwczesny. Głosząc, że fizykę należy uprawiać *more geomerico* (na sposób geometrii), Kartezjusz doszedł do wniosku, iż pojęcie masy jest zbyteczne, gdyż pojęcie ciała da się sprowadzić do jego przestrzennej rozciągłości.

Dopiero u Newtona pojawia się genialna idea: nie należy definiować słów, lecz określać miary, czyli coś, co da się zmierzyć i wyrazić w liczbach. Oto jego słynne definicje z początkowego *Scholium* w *Principiach*: „Ilość materii czyli masa (*quantitas materiae seu massa*) jest to przysługująca jej miara, proporcjonalna do jej gęstości i objętości" (gęstość i objętość dają się mierzyć). „Ilość ruchu (*quantitas motus*, dziś pęd) jest to przysługująca ruchowi miara proporcjonalna do prędkości i masy"[6]. I tak już w fizyce zostało: jeżeli coś nie da się zmierzyć, nie należy do fizyki.

W dziele Newtona można wyróżnić dwie, przeplatające się ze sobą, warstwy. Z warstwy matematyczno-fizycznej pojęcie materii zostało *de facto* wyeliminowane i zastąpione pojęciem masy. W warstwie filozoficznej – a jest ona bogata w dziele Newtona – pojęcie materii nie tylko pozostało, ale odgrywa tam ważną rolę. Newton uważał, że materia jest podłożem własności pierwotnych, czyli takich, które przysługują wszystkim ciałom (rozciągłość, nieprzenikliwość, podleganie ruchowi…).

Następstwa dzieła Newtona były ogromne i wielowątkowe. Szczególnie jeden wątek okazał się brzemienny w skutki dla nowożytnej myśli. Jak widzieliśmy, pojęcie materii zostało wyeliminowane przez Newtona z fizyki i zastąpione pojęciem masy (która potem, w fizyce teoretycznej, została zredukowana do roli parametru w równaniach), jednakże filozofowie Oświecenia i ich następcy nie zauważyli tego procesu. Twierdząc, że opierają się na nauce, uczynili z pojęcia

3. Ważność tę oceniamy z punktu widzenia naszej obecnej znajomości fizyki. W tym szkicu pomijamy cały szereg wątków – na przykład wkład filozofów arabskich – ważnych dla historyka nauki. Warto tu odwołać się do klasycznej pozycji: M. Jammer, *Concets of Mass in Classical and Modern Physics*, Harvard University Press, Cambridge Mass., 1961.

4. Przekład E. Ligocki, PWN, Warszawa 1962, s. 231.

5. J. Kepler, *Opera omnia*, redakcja C. Frish, tom 6, 1896, s. 342

6. Przekład własny. Polskiego przekładu dzieła Newtona dokonał Jarosław Wawrzycki, : *Matematyczne zasady filozofii przyrody*, Copernicus Center Press, Kraków, 2011. „Definicje" na ss. 185-196. Zwracam uwagę na doskonały, uwspółcześniający komentarz tłumacza.

materii podstawę nowożytnego materializmu. Nowożytny materializm – to temat tak obszerny, że chcąc utrzymać rozmiary tego eseju w rozsądnych granicach, musimy pozostawić go na boku. Postawmy więc raczej pytanie:

3. Fizyka jest nauką… o czym?

Nowożytna fizyka w pełni ukonstytuowała się jako samodzielna nauka z chwilą, gdy jej matematyczno-empiryczna metoda zaczęła przynosić wyniki. W samym fakcie, że metoda ta jest tak niezwykle skuteczna, mieści się pewna informacja o świecie. Jaka to informacja? Nasuwa się następująca odpowiedź: ponieważ w fizyce struktury matematyczne wykorzystuje się do modelowania świata, więc świat odkrywany przez fizykę jest światem struktur.

Reakcja filozofów na to stwierdzenie jest – jak można się tego spodziewać – ostro spolaryzowana. Jedni utrzymują, że rola struktur matematycznych jest czysto pomocnicza: są jak rusztowanie, które służy podczas budowy, a potem się je odrzuca. Inni, wręcz przeciwnie, widzą w nich nie tyle rusztowanie, ile raczej szkielet, który nadaje wewnętrzny kształt całości. Filozof, John Worrall w bardzo wpływowym artykule[7] stwierdza: „Byłoby cudem, niemal na skalę kosmiczną, gdyby teorie, takie jak, powiedzmy, ogólna teoria względności lub fotonowa teoria światła, dokonywały tak wiele i tak dokładnych empirycznych predykacji i gdyby to, co one mówią na temat fundamentalnej struktury świata, było nieprawdziwe, lub 'istotnie' czy 'zasadniczo' nieprawdziwe…"

Przyjrzyjmy się pod tym względem praktyce fizyków. Rozpatrzmy na przykład proces, w którym węgiel 14 przemienia się w azot 14, emitując przy tym elektron i antyneutrino. Jest to przykład tak zwanego rozpadu β^- (beta minus). Jądro węgla 14 składa się z sześciu protonów i ośmiu neutronów. A więc w rozpadzie β^- jeden neutron zamienia się na jeden proton, jeden elektron i jedno antyneutrino:

$$n \to p + e^- + \bar{\nu}_e. \qquad (1)$$

To istotnie wygląda jak opis tego, co zachodzi w tym doświadczeniu, ale wniknijmy głębiej w struktury matematyczne, „opisujące" ten proces. Oczywiście, struktury matematyczne, żeby „opisywać" cokolwiek, muszą zostać odpowiednio zinterpretowane, ale chodzi tu o interpretację w pewnym sensie minimalną, przyporządkowującą symbolom matematycznym odniesienia do wielkości fizycznych. Otóż struktury matematyczne, składające się na teorię oddziaływań słabych (zinterpretowane w ten sposób), stwierdzają, że proces, przedstawiony równaniem (1), zachodzi, ponieważ dolny kwark, który jest składnikiem neutronu, przekształca się w kwark górny, emitując bozon pośredniczący W^-, który z kolei rozpada się na elektron i antyneutrino.

Czy to jest opis, czy coś więcej? Gdy poeta opisuje zachód słońca, ujmuje w słowa to, co roztacza się przed jego oczami i zwykle mocno zabarwia to wyobraźnią. Gdy śledczy sporządza raport z miejsca zbrodni, stara się jak najdokładniej opisać to, co zobaczył, wykluczając, na ile to możliwe, działalność swojej wyobraźni. Ale ani poeta, ani śledczy nie są w stanie tak spreparować swój opis, aby wynikały z niego (i to niekiedy z ogromną dokładnością) przyszłe wydarzenia, związane z tym, co się opisuje. Ich opisy są pozbawione mocy sprawczej w fizycznym świecie.

Matematyczne modele współczesnej fizyki działają na zupełnie innej zasadzie. Posługując się analogią – ale tylko analogią – z komputerami, możemy powiedzieć, że kanały rozpadu cząstki elementarnej w rozpadzie *beta minus* są zadane przez *software* wszechświata, czyli przez pewną strukturę matematyczną, ale nie tę, którą z takim mozołem wymyślamy, lecz tę, która tworzy strukturę wszechświata, a którą nasze modele jedynie przybliżają. Rozpad *beta* nie jest więc *opisywany* przez pewną strukturę matematyczną, lecz raczej przez nią *zadawany*.

Skoro już odwołaliśmy się do analogii z *softwarem*, to może warto tę analogię potraktować bardziej dosłownie i zastanowić się, czy fizyka nie jest nauką o informacji zawartej we wszechświecie. Zauważmy, że informację możemy rozumieć jako przechodzenie od zbioru bardziej chaotycznego do zbioru bardziej uporządkowanego. Każdy napis, z którego wyczytujemy jakąś informację, stanowi uporządkowany ciąg liter wybrany z wszystkich możliwych ich zestawów (a więc z zestawu całkowicie chaotycznego). Podobnie, każde prawo fizyki jest pewnym ograniczeniem nałożonym na wszystkie możliwe zachowania wszechświata, a więc jest pewną informacją. Zatem, istotnie, fizykę można rozumieć jako naukę, odkodowującą informację zakodowaną we wszechświecie i przekładającą ją na język zrozumiały dla nas, czyli na język praw fizyki.

Jak wiadomo, według obowiązującej dziś definicji informacji (Shannona), jej miarą jest ujemna entropia (im mniejsza entropia, tym większa informacja). Ale ujemna informacja jest także miarą budowania struktury. A zatem na innej drodze dochodzimy do tego samego – fizyka bada struktury, będące częściami, lub –

7. "Structural Realism: The Best of Both Worlds", *Dialectica* 43, 1989, 97–124.

lepiej – aspektami, jednej wielkiej superstruktury, którą nazywamy wszechświatem.

4. Wielka przygoda

Sabine Hossenfelder w swojej najnowszej książce[8] pisze: „To, jak matematyka wiąże się z rzeczywistością, jest tajemnicą, która prześladowała filozofów na długo przed pojawieniem się naukowców, i dziś wcale nie jesteśmy mądrzejsi. Na szczęście możemy używać matematyki bez rozwikłania tej tajemnicy." I tak robimy w codziennej praktyce. Ale właśnie ta praktyka każe nam myśleć o wszechświecie jako o wielkiej strukturze, którą nasze struktury matematyczne przybliżają zadziwiająco dobrze.

Czymże jest więc ostatecznie fizyka? Nauką o materii? o strukturze? o informacji? Jest przede wszystkim wielką przygodą, i całej ludzkości (choć ogromna jej większość nie ma o tym najmniejszego pojęcia), i tych wybrańców, którzy w tej przygodzie bezpośrednio uczestniczą.

Fizyka jest wielką przygodą, ponieważ jest również wielkim wyzwaniem, jakie człowiek rzucił wszechświatowi. I człowiek to wyzwanie rozegrał z niebywałym sukcesem. Ale jeżeli sukces ma trwać, to nie wolno zapominać, że nawet najpiękniejsze teorie muszą być kontrolowane eksperymentem.

8. *Zagubione w matematyce. Fizyka w pułapce piękna*, przekł. T. Miller, CC Press, Kraków 2019, s. 80.