

Andrzej Łukasik

Instytut Filozofii UMCS

ORCID: 0000-0001-9939-9135

lukasik@poczta.umcs.lublin.pl

METAFORY W FIZYCE – NA PRZYKŁADACH Z MECHANIKI KWANTOWEJ

Nikt jednak nie wie, jaki „jest” świat kwantów.
Możemy jedynie wiedzieć, do czego jest on „podobny”
Gribbin (1998, s. 200)

DOI: 10.52097/acapress.9788362475810.99-117

Słowa kluczowe: Streszczenie

metafory, W artykule analizowana jest rola metafor pojęciowych w języku wykładu mechaniki kwantowej. Fizycy stosują metafory zarówno w celu przybliżenia naszej wyobraźni mikroświata całkowicie niedostępnego bezpośredniemu doświadczeniu, jak i jako podstawę metaforycznych modeli teoretycznych. W takich sytuacjach metafory są przejawem swobodnej twórczości uczonych – mogłyby być zastąpione innymi lub wyeliminowane. Jednak w mechanice kwantowej niektóre podstawowe pojęcia, takie jak „cząstka” czy „fala”, z konieczności muszą być rozumiane metaforycznie, ponieważ kategorie pojęciowe codziennego doświadczenia i fizyki klasycznej okazują się nieadekwatne do opisu mikroświata.

Andrzej Łukasik

Keywords: Abstract

metaphors,
particles,
waves, particle-
-wave duality,
superposition,
uncertainty,
comple-
mentarity,
entanglement

The article examines the role of conceptual metaphors in the language of quantum mechanics. Physicists use metaphors both to bring our imagination closer to a microworld completely inaccessible to direct experience, as well as a basis for metaphorical theoretical models. In such situations, metaphors are a manifestation of the free work of scholars – they could be replaced by others or eliminated. However, in quantum mechanics, some basic concepts such as “particle” or “wave” must be understood metaphorically, because the conceptual categories of everyday experience and classical physics turn out to be inadequate to describe the microworld.

Wstęp

Pojęcie metafory wykorzystane w niniejszym artykule zaczerpnięte jest z pracy G. Lakoffa i M. Johnsona *Metafory w naszym życiu*. „Istotą metafory jest rozumienie i doświadczanie pewnego rodzaju rzeczy w terminach innej rzeczy” (Lakoff, Johnson, 1988, s. 27)¹. Metafora pojęciowa o schemacie „X to Y” jest to odwzorowanie przyporządkowujące wybranym elementom domeny źródłowej Y elementy domeny docelowej X. Elementy domeny źródłowej są zwykle konkretne i mogą być postrzegane bezpośrednio, natomiast elementy domeny docelowej są zwykle bardziej abstrakcyjne.

Rozwój nauki prowadzi do sformułowania praw i teorii opisujących coraz rozleglejszy obszar doświadczenia. Prawa te – jak rzecz ujął Richard P. Feynman (2000):

(...) mają jedną dziwną cechę – im wzrasta ich ogólność, tym stają się odleglejsze od zdroworozsądkowych przekonań i intuicyjnie mniej zrozumiałe. (...) Musimy maksymalnie wyteżać wyobraźnię,

¹ Pierwsze prace ukazujące poznawczo istotną rolę metafor w nauce opublikowali M. Black i M. Hesse na początku lat sześćdziesiątych XX wieku. Por. Czarnocka, M. (2012). *Metafory w nauce. Zagadnienia Naukoznawstwa*, 1(191).

nie po to odwrotnie niż w literaturze, wyobrazić sobie rzeczy, których naprawdę nie ma, ale by zrozumieć to, co naprawdę istnieje (s. 135–136).

Ważnym filozoficznym wnioskiem wynikającym z mechaniki kwantowej jest ukazanie granic stosowalności języka codziennego doświadczenia w odniesieniu do mikroświata, a w wielu przypadkach całkowitej niewyobrażalności procesów kwantowych. O ile pojęcia fizyki klasycznej zachowywały związek z naszym bezpośrednim doświadczeniem zmysłowym, o tyle mechanika kwantowa wprowadziła do fizycznego obrazu świata tak radykalnie nowe pojęcia, jak „nieoznaczoność”, „dualizm korpuskularno-falowy”, „superpozycja stanów” czy „kwantowe splątanie”, że wiele podstawowych kategorii pojęciowych musi być rozumiana metaforycznie. Klasyczne pojęcia masy, prędkości czy położenia wiążą się bezpośrednio z naszym codziennym doświadczeniem, nie wiemy jednak, jak to jest posiadać spin, znajdować się w superpozycji stanów (jak żywy/martwy kot Schrödingera) czy też wykazywać własności charakterystyczne dla cząstek lub fal w zależności od sytuacji eksperymentalnej. „Fotony i elektrony zachowują się w sposób niemający żadnego odpowiednika klasycznego, w sposób kwantowomechaniczny” (Feynman, 2000). Dlatego też metafory w wykładzie mechaniki kwantowej pełnią ważne funkcje, głównie poznawczą (heurystyczną i ontologiczną) i egzegetyczną (w tym dydaktyczną) (Zawisławska, 2011, s. 114). Odwzorowują elementy abstrakcyjnego formalizmu matematycznego domeny docelowej na domenę źródłową, bliższą naszemu codziennemu doświadczeniu.

Dwa stoły Eddingtona

Arthur S. Eddington (1937) przepaść między zdroworoządkowym obrazem świata a obrazem według pojęć fizyki współczesnej ujął w sławnej metaforze dwóch stołów:

Andrzej Łukasik

W wielu wypadkach stało się jasne, że rzeczy nie są tym, czym się nam wydają. [Według zdroworozsądkowego obrazu świata – A.Ł.] mam teraz przed sobą materialny stół, lecz z fizyki nauczyłem się, że stół bynajmniej nie składa się z ciągłej materii, jak to przypuszcza opowieść. Stanowi on raczej zbiorowisko bardzo drobnych nabojuów elektrycznych, biegnących to tu to tam z szybkością nie do pojęcia. Stół mój, zamiast być stałą materią, przypomina raczej rój komarów (s. 1).

Metafora roju komarów dobrze ilustruje fakt, że przedmioty dostępne nam w doświadczeniu zmysłowym, takie jak stół, które wydają się zbudowane z ciągłej i nieprzenikliwej materii, naprawdę składają się z atomów i próżni, a właściwie z próżni i atomów, ponieważ ponad 99,99% „składnika” wszystkich ciał to pusta przestrzeń. *Nota bene* termin pusta przestrzeń to także metafora, ponieważ kwantowa próżnia jest dynamicznym ośrodkiem o bogatych właściwościach fizycznych, w którym nieustannie następują procesy kreacji i anihilacji par cząstek wirtualnych, jest wypełniona kosmicznym mikrofalowym promieniowaniem tła oraz polem Higgsa, nadającym cząstkom masę. Pojęcie kwantowej próżni jest bardzo odległe od pojęcia próżni starożytnych atomistów (istniejącego niebytu) czy przestrzeni absolutnej Newtona.

Kropla w morzu

Przeciętne rozmiary atomów są rzędu 10^{-10} m. Już samo pojęcie „rozmiar atomu” ma charakter metaforyczny, ponieważ atomy nie mają ostro określonych granic. Termin „rozmiar” można w tym przypadku zastąpić średnią odległością między środkami atomów w ciele stałym lub cieczy (por. Schrödinger, 1998, s. 19). Jednak nawet wówczas trudno powiązać z wyrażeniem 10^{-10} m jakąś treść wyobraźniową, dlatego fizycy uciekają się do metafor. Lord Kelvin sformułował następującą metaforę:

załóżmy, że potrafilibyśmy jakoś oznakować cząsteczki zawarte w szklance wody; gdybyśmy następnie wylali jej zawartość do oceanu, poczekali, aż dojdzie do pełnego wymieszania z wodą w oceanie,

i zaczerpnęli z tego znów szklankę wody, to powinno się w niej znaleźć około stu oznakowanych cząsteczek (Schrödinger, 1998, s. 18–10).

Oczywiste jest, że cząsteczek wody nie da się oznakować, a następnie zidentyfikować, i opisany eksperyment myślowy jest w rzeczywistości niewykonalny. Metafora ta dobrze ilustruje rozmiary atomów obliczone na podstawie fizyki statystycznej – atomów mogłoby być 95 lub 105, jednak bardzo mało prawdopodobne, aby było ich np. 50 lub 150.

Ciasto z rodzynkami (*plum pudding*)

Przed odkryciem złożoności atomów używano do ich opisu metafory punktu materialnego lub metafory sprężystej kulki. Gdy okazało się, że istnieją cząstki materii drobniejsze niż atomy – elektrony, odkryte przez Josepha J. Thomsona² – powstała w fizyce jakościowo nowa sytuacja – obok pytań dotyczących tego, w jaki sposób materia zbudowana jest z atomów, zrodziło się pytanie o wewnętrzną budowę samych atomów. Pierwszy model atomu jako obiektu złożonego pochodzi od Thomsona i nazywany jest „modelem ciasta z rodzynkami” (w literaturze anglojęzycznej *plum pudding model*). Zgodnie z nim atom to mniej więcej kulista kropla dodatnio naładowanej materii o rozmiarach rzędu 10^{-10} m, w której – podobnie jak rodzynki w cieście (lub śliwki w puddingu) – tkwią ujemnie naładowane elektrony. Metaforyczność tego modelu atomu jest oczywista – ciasto może zobaczyć niemal każdy, atomu nikt (przynajmniej bezpośrednio).

Atom jako układ planetarny

Ernest Rutherford odkrył jądro atomowe, wykonując sławne eksperymenty rozproszeniowe, polegające na bombardowaniu cząstkami alfa cienkich folii metalowych (były to folie wykonane ze złota

² Jest to pewne uproszczenie historyczne, nieistotne jednak dla niniejszych rozważań.

o grubości ok. 400 warstw atomowych). Celem eksperymentów było określenie rozkładu ładunków elektrycznych w atomie. Rezultaty tych doświadczeń były zdumiewające: znakomita większość cząstek alfa przenikała przez folię złotą niemal bez przeszkód, tak jakby była to zupełnie pusta przestrzeń. Zdarzały się jednak cząstki alfa, które odbijały się od folii, tak jakby trafiły na bardzo masywne centrum o dodatnim ładunku elektrycznym. Rutherford rezultaty te zilustrował za pomocą następującej metafory: „Była to z pewnością najbardziej niewiarygodna rzecz, która wydarzyła mi się w życiu. Było to tak samo niewiarygodne, jakby 15-calowy pocisk, który wystrzeliliście w kierunku kawałka bibułki, wrócił i trafił w was” (Rutherford 1973, s. 459).

Odkrycie jądra atomowego stało się podstawą do sformułowania planetarnego modelu atomu. Rutherford przyjął, że atom zbudowany jest analogicznie do miniaturowego układu planetarnego – w centrum znajduje się zawierające cały ładunek dodatni i niemal całą masę jądro atomowe, a wokół niego, podobnie jak planety wokół Słońca, krążą po orbitach ujemnie naładowane elektrony. Słońce stanowi ok. 98% masy całego Układu Słonecznego, podobnie masa jądra atomowego wodoru jest ok. 2000 razy większa niż masa orbitujących elektronów; również matematyczna postać siły grawitacji jest formalnie izomorficzna z postacią siły Coulomba przyciągania elektrycznego między jądrem a elektronami. Metafora atomu jako układu planetarnego pozwala nam uzmysłwić sobie, że nawet atomy „zbudowane są” niemal wyłącznie z „pustej” przestrzeni, nie pozwala natomiast na wyjaśnienie stabilności atomów i istnienia dyskretnych linii widmowych w promieniowaniu elektromagnetycznym pierwiastków.

Z badań Rutherforda wynikało, że rozmiary liniowe jądra atomowego są rzędu 10^{-15} m, zatem ok. 100 000 razy mniejsze niż rozmiary atomu (10^{-10} m). W literaturze możemy spotkać ilustrację relacji między wielkością całego atomu a wielkością jądra atomowego za pomocą następującej metafory: wyobraźmy sobie muchę w katedrze – wówczas wielkość katedry reprezentuje wielkość atomu, natomiast wielkość muchy odpowiada wielkości jądra.

Dozwolone orbity Bohra

Niels Bohr zmodyfikował model Rutherforda, wprowadzając koncepcję skwantowanych orbit. Zasadniczo zachowana została metafora atomu jako miniaturowego układu planetarnego, ale „orbity”, po których poruszały się elektrony, mogły przyjmować jedynie ściśle określone, dyskretne wartości, wyznaczone określonymi warunkami kwantowymi. Elektron, poruszając się po orbicie stacjonarnej, nie promieniował energii (co było radykalnym odstępstwem od praw elektrodynamiki klasycznej), a podczas „przeskoku” z jednej orbity na drugą emitował lub absorbował kwant promieniowania. Ów przeskok można rozumieć jedynie metaforycznie, coś na kształt „teleportacji” rodem z filmów *science fiction*, ponieważ elektron nie może znajdować się pomiędzy dozwolonymi orbitami. Arnold Sommerfeld zmodyfikował ten model, wprowadzając orbity eliptyczne – również w analogii do budowy Układu Słonecznego.

Z punktu widzenia mechaniki kwantowej modele atomów Rutherforda, Bohra i Sommerfelda to „tylko metafory” – wiemy, że atom nie przypomina i nie może przypominać miniaturowego układu planetarnego, a terminowi „orbita elektronu” ze względu na relacje nieoznaczoności Heisenberga dla pędu i położenia nie odpowiada żadna realność fizyczna (zatem to również „tylko metafora”), chociaż w kulturze popularnej atom najczęściej jest przedstawiany właśnie jako miniaturowy układ planetarny. Metafory te pełniły jednak i do pewnego stopnia nadal pełnią ważną funkcję poznawczą. Za Richardem Boydem można je zaliczyć do *metafor konstruujących teorie*, które są „najbardziej oryginalnymi metaforami w nauce, ponieważ za ich pomocą kształtuje się określony sposób konceptualizacji nowych zjawisk lub obiektów” (Zawisławska, 2011, s. 11). Model Bohra odzwierciedlał *niektóre analogie* (Kuhn, 2003, s. 186) między Układem Słonecznym a atomem i odegrał fundamentalną rolę w tzw. starszej teorii kwantów, z której rozwinęła się mechanika kwantowa (Petruccioli, 1993, s. 94). Współcześnie model Bohra–Sommerfelda wykorzystywany jest głównie w celach dydaktycznych, gdzie jest nieocenioną pomocą przy omawianiu własności chemicznych atomów i czą-

Andrzej Łukasik

steczek, jednak gdy jego metaforyczność nie jest wystarczająco akcentowana, prowadzi niekiedy do ukształtowania się fałszywego poglądu, że jest on dokładnym odzwierciedleniem rzeczywistego *wyglądu* atomu. Metafory w fizyce mogą zatem stanowić również przeszkodę epistemologiczną.

Chmury elektronowe

We współczesnych modelach kwantowych, opartych na rozwiązaniach równania Schrödingera, metaforę orbity elektronu zastępuje koncepcja *orbitalu*. Jest to obszar wokół jądra atomowego, w którym prawdopodobne jest znalezienie elektronu w określonym stanie kwantowym. Metaforycznie elektrony przedstawiane są jako *chmura* otaczająca jądro. Orbital „można uważać za rejon, w którym rozłożony jest ładunek elektryczny elektronu, tak jakby elektron był «rozsmarowany» (niekoniecznie równomiernie) na całym orbitalu” (Gribbin, 1998, s. 222). Metafora ta jest użyteczna przy omawianiu własności chemicznych atomów i cząsteczek, jednak ukrywa fakt, że przy każdej detekcji elektronu zawsze znajdujemy cząstkę o ściśle określonej i skwantowanej wartości ładunku elektrycznego.

Metaforyczny charakter uzyskuje w mechanice kwantowej także jedno z podstawowych pojęć fizycznych, a mianowicie pojęcie „lokalizacji przestrzennej”. Zgodnie z zasadą nieoznaczoności Heisenberga dla pędu i położenia przed wykonaniem pomiaru elektron *nie znajduje się* w ściśle określonym położeniu (w szczególności zaś nie porusza się po „orbicie”), lecz w jakimś sensie jest obecny w niemal całej objętości atomu, znajdując się w różnych miejscach z różnym prawdopodobieństwem. Oczywiście, stwierdzenie, że niepodzielny elektron w jakimś sensie znajduje się w różnych miejscach, ma również charakter metaforyczny, ponieważ znaczy ono jedynie tyle, że można obliczyć prawdopodobieństwo znalezienia elektronu w pewnym obszarze, gdy dokonamy pomiaru.

„Kolorowe” kwarki, i do tego „uwięzione”

Gdy w latach pięćdziesiątych XX wieku fizycy skonstruowali akceleratory cząstek elementarnych, okazało się, że prosty obraz elementarnych składników materii z lat trzydziestych, gdy tworzono podstawy mechaniki kwantowej, znacznie się skomplikował – odkryto setki cząstek elementarnych, które można było poklasyfikować w pewne grupy o zbliżonych własnościach, zwane „multipletami izospinowymi”. Klasyfikacji takiej dokonali niezależnie od siebie Murray Gell-Mann i Yuwala Ne’eman. Fizycy klasyfikację tę nazwali „ścieżką ośmioraką hadronów”, metaforycznie nawiązując do buddyjskiego terminu „szlachetna ośmioraka ścieżka” (Gribbin, 1998, s. 223). Pojawiło się pytanie o to, skąd się biorą regularności we własnościach „elementarnych” składników materii i czy nie jest to związane z faktem, że stanowią one odzwierciedlenie istnienia głębszej struktury materii, podobnie jak w przypadku regularności w układzie okresowym pierwiastków, które – jak się okazało – wynikają ostatecznie z atomowej struktury materii. Koncepcję głoszącą, że cząstki takie jak proton czy neutron nie są w istocie elementarne, lecz składają się z bardziej fundamentalnych obiektów, zaproponował w 1963 roku Murray Gell-Mann (1964, s. 214–215) (i niezależnie od niego George Zweig³; por. Wróblewski, 2006, s. 519). Gell-Mann cząstki te nazwał „kwarkami”.

Rekonstrukcja wszystkich multipletów izospinowych wymagała założenia, że każda cząstka (taka jak proton czy neutron) składa się z trzech kwarków o ułamkowych wartościach ładunku elektrycznego (albo pary kwark–antykwar w przypadku mezonów⁴; por. Gell-Mann, 1996, s. 247). Kwarki są fermionami, czyli cząstkami elementarnymi o spinie połówkowym podlegającymi statystyce Fermiego–Diraca, do których stosuje się zasada wykluczania (zakaz) Pauliego. (Sama nazwa „zakaz” Pauliego ma niewątpliwie charakter metaforyczny, ponieważ oczywiste jest, że nie jest w ludzkiej mocy „zakazywać” czegokolwiek cząstkom

³ Zweig nadał tym obiektom nazwę „asy”, która jednak nie przyjęła się.

⁴ Sama nazwa „kwark” zaczerpnięta jest z powieści Jamesa Joyce’a *Finnegans Wake* („Three quarks for Muster Mark”).

elementarnym.) Zakaz Pauliego głosi, że w danym stanie kwantowym w określonym czasie może znajdować się co najwyżej jeden fermion danego rodzaju. Proton np. składa się z dwóch kwarków u i jednego d . Muszą się zatem od siebie różnić jakąś własnością. Tę abstrakcyjną własność (w języku mechaniki kwantowej – liczbę kwantową) fizycy nazwali „koleorem”.

Kwarki występują w trzech kolorach – czerwonym, zielonym i niebieskim. Nazwa „kolor” ma charakter metaforyczny (Tempczyk, 1998, s. 34), ponieważ kwarki nie są kolorowe w zwykłym znaczeniu tego słowa. Zachodzi jednak *analogia* z teorią barw postrzeganych przez ludzi, ponieważ barwy czerwona, zielona i niebieska, nałożone na siebie, są postrzegane jako światło białe. Antykwarkom przypisuje się odpowiednie antykolory – antyczerwony, antyzielony i antyniebieski, co w teorii barw odpowiada barwie dopełniającej. Aparat matematyczny chromodynamiki kwantowej (QCD) pozwala na konstrukcję jedynie „białych” hadronów, przy czym nazwa „biały” ma oczywiście również charakter metaforyczny. Fizycy mówią w tym przypadku o trwałym „uwięzieniu koloru” albo o „uwięzieniu kwarków”, co także jest metaforą. Metafora uwięzienia koloru ilustruje fakt, że kwarki nie występują w przyrodzie jako obiekty swobodne, lecz jedynie jako składniki cząstek z nich zbudowanych. Oddziaływanie kolorowe ma bardzo specyficzny charakter, ponieważ kwarki wewnątrz hadronów poruszają się niemal jak obiekty swobodne, natomiast siły kolorowe gwałtownie rosną, gdy kwarki oddalają się od siebie. Tym tłumaczy się „uwięzienie” kwarków wewnątrz hadronów. Przy opisie tego typu oddziaływania pojawiają się często kolejne metafory – tak jakby kwarki były połączone nienapiętą sprężyną, co umożliwiłoby im swobodny ruch wewnątrz hadronów, ale nie pozwala się im wydostać na zewnątrz, ponieważ napięcie sprężyny wówczas rośnie.

Stwierdzenie, że hadrony złożone są z kwarków też ma charakter metaforyczny (por. Mehlberg, 1967, s. 49). W przypadku atomów możemy sobie przynajmniej wyobrazić, że bierzemy jeden proton i jeden elektron i budujemy w ten sposób atom wodoru, następnie dokładając kolejne składniki budujemy atomy helu, litu itd., natomiast składanie hadronów z kwarków polega w istocie

rzeczy nie na manipulowaniu (choćby czysto teoretycznym) realnymi obiektami, ale na składaniu odpowiednich funkcji falowych zgodnie z symetrią $SU(3)$, a więc na składaniu czysto abstrakcyjnych obiektów matematycznych. Na przykład proton możemy przedstawić jako składający się z trzech kwarków uud , podobnie neutron jako udd , ale już mezon π^0 jako kombinację $u\bar{u}$ i $d\bar{d}$, gdzie symbol „ $-$ ” oznacza, że chodzi o antykwark (Tempczyk, 1988, s. 33). Ostatecznie okazało się, że chromodynamika kwantowa wymaga przyjęcia istnienia sześciu rodzajów kwarków o różnych zapachach (*flavour*) – górny (*up*), dolny (*down*), dziwny (*strange*), powabny (*charm*), szczytowy (*top*) i spodni (*bottom*). Nazwy te są czysto umowne, aczkolwiek trudno w tym przypadku mówić *stricte* o metaforze. Wprowadzono również nowe liczby kwantowe charakteryzujące cząstki elementarne, takie jak „dziwność” (S) i „powab” (C). Cząstki zawierające kwark dziwny określane są mianem „cząstek dziwnych”, cząstki zawierające kwark powabny – mianem „cząstek powabnych”.

Wrażliwe i nieczułe cząstki

Oddziaływania między cząstkami elementarnymi opisywane są we współczesnej fizyce jako proces wymiany cząstek – kwantów odpowiedniego oddziaływania (fotonów γ dla oddziaływania elektromagnetycznego, bozonów W^+ , W^- i Z^0 dla oddziaływań słabych i ośmiu rodzajów gluonów g dla oddziaływań kolorowych), co jest *metaforą ontologiczną*. Oddziaływanie kolorowe między kwarkami opisuje się jako wymianę kolorowych gluonów (ang. *glue* – klej). Metaforyczny termin „gluon” odzwierciedla fakt, że „sklejają one kwarki razem, dzięki czemu powstają obserwowalne białe cząstki, takie jak proton i neutron. Wymiana gluonów nie zależy od zapachu kwarków – można powiedzieć, że gluony są *nieczułe* [podkr. – A.Ł.] na zapach. Są natomiast bardzo *wrażliwe* [podkr. – A.Ł.] na kolor” (Gell-Mann 1996, s. 249). W cytowanym fragmencie pracy Gell-Manna dostrzegamy wyraźnie metaforę ontologiczną o charakterze *personifikacji* (por. Lakoff, Johnson, 1988, s. 56).

Diagramy Feynmana jako metafory orientacyjne

Diagramy Feynmana – graficzny sposób reprezentacji oddziaływań między cząstkami elementarnymi – również mają metaforyczny charakter – są to przykłady *metafor orientacyjnych*. Domyślnie diagram umiejscowiony jest w dwuwymiarowej czasoprzestrzeni szczególnej teorii względności, w której kierunek czasu skierowany jest pionowo w górę, kierunek przestrzenny poziomo (por. rys. 2). Linia prosta reprezentuje linię świata (trajektorię czasoprzestrzenną) elektronu, linia falista natomiast trajektorię wirtualnego fotonu. Jest to diagram reprezentujący oddziaływanie elektromagnetyczne elektronów poprzez wymianę wirtualnego fotonu. Metaforyczność diagramu jest oczywista – zgodnie z mechaniką kwantową obowiązują relacje nieoznaczoności dla pędu i położenia, zatem takim cząstkom jak elektron w ogóle nie przysługuje ściśle określona trajektoria w czasoprzestrzeni. Linia reprezentująca wymianę wirtualnego fotonu jest również metaforą, ponieważ fotony wirtualnie są *zasadniczo nieobserwowalne*. Diagramy są bardzo użyteczne w elektrodynamice kwantowej (QED), podobne stosuje się w chromodynamice kwantowej (QCD).

Przy ich omawianiu nie sposób obejść się od metafor. Znako- mity przykład znajduje się w cytowanej pracy Gell-Manna (1996), diagramów dla oddziaływań kolorowych między kwarkami:

Na rysunku (...) *widzimy* [podkr. – A.Ł.], jak czerwony kwark zmienia się niebieski wskutek emisji wirtualnego czerwono-niebieskiego gluonu, który jest następnie absorbowany przez niebieski kwark. Absorpcja powoduje, że kwark ten zmienia się w czerwony. Na drugim rysunku *widzimy* [podkr. – A.Ł.], jak niebieski kwark zmienia się w zielony wskutek emisji wirtualnego niebiesko-zielonego gluonu (s. 250).

Opis brzmi tak, jakby Gell-Mann mówił o filmie lub o obrazie – jakby na własne oczy widział trajektorie cząstek zasadniczo nieobserwowalnych.

Wirujące elektrony

Wiele własności mikroobiektów w ogóle nie ma ścisłego odpowiednika w makroświecie i – jak mówią fizycy – ma charakter „typowo kwantowy”. Trudno o nich mówić, nie posługując się metaforą, zawsze jednak należy pamiętać, że analogie do świata naszego bezpośredniego doświadczenia mają bardzo ograniczony charakter. Taką typowo kwantową własnością cząstek elementarnych jest *spin*, nazywany niekiedy wewnętrznym momentem pędu. Wykazuje on pewne analogie do klasycznego momentu pędu, jednak wirowanie cząstki elementarnej należy rozumieć jedynie metaforycznie. Przede wszystkim spin jest skwantowany i stanowi zawsze wielokrotność pewnej podstawowej jednostki proporcjonalnej do stałej Plancka. Dla cząstek takich jak elektron możemy zmierzyć rzut spinu na dowolny kierunek w przestrzeni i uzyskać jedynie dwa rezultaty, co fizycy nazywają metaforycznie „spin w górę” lub „spin w dół”. Analogia z klasycznym momentem pędu jest jednak bardzo ograniczona, ponieważ w przypadku klasycznym moment pędu wyobrazić sobie jako wektor zachowujący określony kierunek w przestrzeni. Jednak zgodnie z mechaniką kwantową przed wykonaniem pomiaru cząstka znajduje się na ogół w *superpozycji stanów*, co dla elektronu odpowiadałoby wirowaniu w przeciwne strony jednocześnie. Spin ma również osobliwe własności symetrii. Zwykły przedmiot makroskopowy pozostaje niezmienny przy obrocie o 360° , aby jednak cząstka o spinie $\frac{1}{2}$ (np. elektron) powróciła do swojego stanu wyjściowego, potrzebny jest obrót o 720° .

Upiorne działanie na odległość

Kwantowe splątanie (*entanglement*) jest jednym z najbardziej niesamowitych aspektów mechaniki kwantowej i trudno o nim mówić bez uciekania się do metafor. Oznacza ono, że własności pary cząstek, takie jak np. spiny elektronu i pozytonu, które uprzednio oddziaływały ze sobą i opisane są jedną funkcją falową (tzw. stan singletowy), pozostają ze sobą *skorelowane* bez względu na dzielącą

Andrzej Łukasik

je odległość przestrzenną. Pomiar wykonany na jednej cząstce pozwala z całkowitą pewnością i bez żadnego oddziaływania przewidzieć stan drugiej cząstki. Jeśli np., wykonując pomiar spinu elektronu, uzyskaliśmy rezultat „w górę”, to stan drugiej cząstki, w tym przypadku pozytonu, znajdującego się w dowolnie odległym miejscu od miejsca przeprowadzania pomiaru z całkowitą pewnością będzie „w dół”. Zdaniem Einsteina możliwość przewidywania wartości wielkości fizycznej z całkowitą pewnością, i to bez żadnego oddziaływania, jest dowodem na to, że własność ta jest realna i obiektywnie określona, zatem mechanika kwantowa, w której obowiązują relacje nieoznaczoności, nie jest teorią kompletną. Taki był główny argument zawarty w sławnej pracy Einsteina, Podolskiego i Rosena, określanej jako „paradoks EPR” (Einstein, Podolsky, Rosen, 1935, s. 777–780).

Jednak zgodnie z mechaniką kwantową spin drugiej cząstki, na której nie wykonujemy pomiarów, pozostaje nieokreślony, a pomiar powoduje redukcję funkcji falowej i ustalenie kierunków spinów obydwu cząstek równocześnie. Zgodnie jednak z fundamentalnym postulatem szczególnej teorii względności istnieje absolutna granica prędkości przekazywania informacji (i jakichkolwiek oddziaływań) wyznaczona przez prędkość światła w próżni. Postulat ten nazywany jest „lokalnością” i oczywiście wyklucza on natychmiastowe oddziaływanie na odległość. Einstein twierdził, że „rozsądna definicja rzeczywistości” wymaga przyjęcia – wyrastającego zresztą ze zdroworozsądkowego pojmowania świata – że własności rzeczy odseparowanych przestrzennie są od siebie niezależne. Przeciwny pogląd nazwał „upiornym działaniem na odległość” (*spooky action at a distance*) i uznawał za całkowicie absurdalny.

Skarpetki profesora Bertlmann

John Bell, który w 1964 roku sformułował pewną matematyczną nierówność (zwaną współcześnie „nierównością Bella”), która powinna być spełniona, gdyby słuszny był wniosek Einsteina o niekompletności mechaniki kwantowej, zilustrował stanowisko

interpretacji kopenhaskiej Bohra i Heisenberga słynną „metaforą skarpetek profesora Bertlmana” (Bell, 1998, 142.C2:C2–41; por. Andersen, *The Quantum Rescue*). Ów ekscentryczny wiedeńczyk miał w zwyczaju nosić skarpetki zawsze różnych kolorów. Gdy zobaczyliśmy kolor jednej skarpetki i okazało się, że jest, powiedzmy, różowa, od razu wiadomo było, że druga jest nie-różowa. Jeśli chodzi o zwykłe (czy też klasyczne) skarpetki, to sprawa jest trywialna – jesteśmy wszak przekonani, że druga, niewidoczna skarpetka *ma* określony kolor, bez względu na to, czy ją widzimy czy też nie. W mechanice kwantowej pogląd, że obiekty zawsze posiadają określone własności, chociaż nie jesteśmy ich w stanie poznać ze względu na obowiązujące relacje nieoznaczoności, nosi nazwę „parametrów ukrytych”. Jeżeli, powiedzmy, profesor Bertlmann ma skarpetki w sześciu różnych kolorach, to obserwacja jednej z nich w kolorze różowym redukuje naszą (klasyczną, czyli Bayesowską) niepewność, czy też subiektywnie rozumianą „nieoznaczoność” co do koloru drugiej. Klasyczne prawdopodobieństwo jest w tym przypadku wyrazem naszej subiektywnej niewiedzy o rzeczywistym stanie rzeczy.

Jednak zgodnie z kopenhaską interpretacją mechaniki kwantowej przed obserwacją („pomiarem”) dwa obiekty znajdują się w *stanie splątanych*, co oznacza, że stan całego układu jest dobrze określony, natomiast stany poszczególnych części są w ogóle nieokreślone i dopiero pomiar powoduje redukcję funkcji falowej ustalającą własności obydwu obiektów (również tego nieobserwowanego). Gdyby zatem istniały „kwantowe skarpetki”, to do momentu wykonania obserwacji byłyby one zawsze w różnych, ale nieokreślonych kolorach. W chwili zaobserwowania pierwszej stawałaby się ona różowa, a druga przybierałaby określony stan „bycia nie-różową”.

Przeprowadzone w 1982 roku przez zespół Alaina Aspecta eksperymenty (i powtarzane później wielokrotnie) potwierdziły przewidywania mechaniki kwantowej, falsyfikując nierówność Bella, której wyprowadzenie oparte było na założeniach *realizmu* (własności) i *lokalności*. W świecie kwantowym mamy zatem istotnie do czynienia z „upiornym działaniem na odległość”, o którym nie sposób mówić bez metafor.

Andrzej Łukasik

Kwantowa schizofrenia, czyli dualizm korpuskularno-falowy

Mechanika kwantowa ujawniła niezwykle własność promieniowania i materii, a mianowicie *dualizm korpuskularno-falowy*. Jeżeli przepuścimy strumień *cząstek* przez przesłonę z dwiema równoległymi wąskimi szczelinami, to okazuje się, że na ekranie obserwujemy obraz interferencyjny charakterystyczny dla *fal*. Przy analizie tego eksperymentu często pojawiają się metafory, zgodnie z którymi pojedyncza cząstka *w pewnym sensie* przechodzi przez dwie szczeliny równocześnie, że „pojedyncze cząstki interferują same ze sobą” (Hawking, Młodinow, 2019, s. 84), że elektrony lub fotony zachowują się *tak jakby wiedziały*, czy otwarta jest jedna szczelina, czy też dwie itp. Jednak stwierdzenie, że „światło składa się z cząstek”, czy też stwierdzenie, że „światło składa się z fal”, to stwierdzenia metaforyczne – każde z nich uwypukla pewien aspekt zjawiska (korpuskularny albo falowy) w zależności od wykonanego eksperymentu i kontekstu (por. Lakoff, Johnson, 1988, s. 193).

Opis interferencji jest możliwy jedynie wówczas, gdy posługujemy się *obrazem falowym* – mówimy, że ze szczelin S_1 i S_2 rozchodzą się dwie fale, które nakładając się na siebie, dają na ekranie obraz interferencyjny, składający się z tysięcy punktów pojawiających się miejscach, gdzie trafiła *cząstka*. Metaforyczność takiego opisu jest oczywista – fale nie są w tym przypadku drganiami jakiegoś ośrodka materialnego (jak np. fale na wodzie), ale reprezentują abstrakcyjne *zespolone amplitudy prawdopodobieństwa*.

Niels Bohr sformułował *zasadę komplementarności*, zgodnie z którą dwa klasycznie wykluczające się opisy rzeczywistości fizycznej, a mianowicie *opis korpuskularny* albo *opis falowy*, odnoszą się do wykluczających się wzajemnie *układów eksperymentalnych*. Zdają one sprawę z równie ważnych aspektów zjawisk kwantowych (Bohr, 1963, s. 15). Komplementarne opisy uzupełniają się wzajemnie i wyczerpują naszą wiedzę o zachowaniu mikroobiektów: *contraria sunt complementa* (przeciwnictwa są komplementarne). Problem polega na tym, że nie potrafimy komplementarnych opisów eksperymentów zobiektywizować, to znaczy przedstawić w modelu niezależnej od sytuacji eksperymentalnej samoistnej rzeczywistości fizycznej.

Zgodnie z interpretacją kopenhaską obiekty kwantowe *nie są* ani cząstkami, ani falami w rozumieniu pojęć fizyki klasycznej, nie dysponujemy jednak innym językiem do opisu rezultatów doświadczenia, i dlatego skazani jesteśmy na metafory – metafory okazują się w tym przypadku nieuniknione (por. Fojt, 2009, s. 177). „Światło i materia – pisze Heisenberg – są jednolitymi zjawiskami fizycznymi, ich pozorna dwoista natura ma swe źródło w istotnej nieudolności naszego języka” (Heisenberg, 1930, s. 7). Okazało się, że mikroświat rządzi się prawami całkowicie wykraczającymi poza nasze schematy wyobrażeniowe, ukształtowane na podstawie kontaktu ze światem makroskopowym. Jak pisze Feynman (2000, s. 137), ze zdroworoządkowego punktu widzenia zachowanie obiektów kwantowych „jest wariackie”. Metaforyczność tak fundamentalnych pojęć, jak cząstka czy fala, wynika z braku odpowiednich kategorii ontologicznych, za pomocą których moglibyśmy opisać obiekty należące do świata kwantów. Heisenberg pisze, że w zastosowaniu do mikroświata pojęcia języka potocznego stanowią jedynie *malowidła słowne* (Heisenberg, 1979, s. 156), za pomocą których staramy się zbliżyć do rzeczywistego procesu. Fizycy:

mówiąc o procesach atomowych, zadowolają się często językiem niedokładnym i *metaforycznym* [podkr. – A.Ł.], starając się tylko, jak poeci, wywołać w umyśle słuchającego, *obrazem i metaforą* [podkr. – A.Ł.], pewne poruszenia kierujące się w zamierzonym kierunku, ale nie siląc się do zmuszania go przez jednoznaczne sformułowanie, aby odtwarzał precyzyjnie określony bieg myśli. Jednoznaczny staje się sposób mówienia, gdy posługują się sztucznym językiem matematycznym, o którego poprawności nie można już zebranych doświadczeń, powątpiewać (Heisenberg, 1979, s. 157).

Podsumowanie

W niektórych przypadkach (np. kolory kwarków) użycie metafory w mechanice kwantowej jest przejawem twórczości uczonych, podobnej twórczości artystycznej – w zasadzie trudno dopatrzeć się jakiegś logicznej konieczności w wyborze takiej, a nie innej

Andrzej Łukasik

metafory. Gdyby np. przyjęła się propozycja Zweiga nazwania składników hadronów „asami”, metafora kolorów w ogóle nie zaistniałaby w fizyce. W pewnych jednak przypadkach metaforyczny charakter pojęć nie jest kwestią swobodnej decyzji, lecz wynika z nieadekwatności naszych klasycznych ram pojęciowych do opisu mikroświata znajdującego się całkowicie poza sferą bezpośredniego doświadczenia. Z taką sytuacją mamy do czynienia w przypadku pojęć „cząstka” i „fala”, za pomocą których można uchwycić jedynie pewien aspekt zjawiska, dobrze się stosują w określonym kontekście danej sytuacji eksperymentalnej, a okazują się nieadekwatne poza tym kontekstem.

Można zatem stwierdzić, że współcześnie metafory stanowią niemożliwy do wyeliminowania składnik języka wykładu mechaniki kwantowej. Czy sytuacja ulegnie zmianie np. w przypadku syntezy mechaniki kwantowej z ogólną teorią względności, pozostaje tymczasem jedynie kwestią

Bibliografia

- Andersen, T. The Quantum Rescue: How Quantum Mechanics Saved Free Will From Albert Einstein. Pobrane z: <https://medium.com/the-infinite-universe/the-quantum-rescue-how-quantum-mechanics-saved-free-will-from-albert-einstein-3c9fd089foo> (dostęp: 1.04.2021).
- Bell, J. (1981). Bertlmann’s Socks and the Nature of Reality. *Le Journal de Physique Colloques*, 42.C2:C2–41.
- Bohr, N. (1963). *Fizyka atomowa a wiedza ludzka*. Warszawa: PWN.
- Cushing, J.T., McMullin, E. (red.) (1989). *Philosophical Consequences of Quantum Theory*. Notre Dame: University of Notre Dame Press.
- Czarnocka, M. (2012). Metafory w nauce. *Zagadnienia Naukoznawstwa*, 1(191).
- Eddington, A.S. (1937). *Nauka na nowych drogach*. Kraków: Trzaska, Evert i Michalski SA.
- Einstein, A., Podolsky, B., Rosen, N. (1935). Can Quantum Mechanical Description of Physical Reality by Considered Complete? *Physical Review*, 47.
- Feynman, R. (2000). *Charakter praw fizycznych*. Warszawa: Prószyński i S-ka.

- Fojt, T. (2009). *The Construction of Scientific Knowledge by Metaphor*. Toruń: Wydawnictwo Uniwersytetu Mikołaja Kopernika.
- Gell-Mann, M. (1964). A Schematic Model of Baryons and Mesons. *Physics Letters*, 8(3).
- Gell-Mann, M. (1996). *Kwark i jaguar. Przygody z prostotą i złożonością*. Warszawa: Wydawnictwo CIS.
- Gribbin, J. (1998). *Encyklopedia fizyki kwantowej*. Warszawa: Wydawnictwo Amber.
- Hawking, S., Mlodinow, L. (2019). *Wielki projekt*. Warszawa: Albatros.
- Heisenberg, W. (1930). *Die physikalischen Principien der Quantentheorie*. Leipzig: Verlag von S. Hirzel.
- Heisenberg, W. (1965). *Fizyka i filozofia*. Warszawa: Książka i Wiedza.
- Heisenberg, W. (1979). *Ponad granicami*. Warszawa: Państwowy Instytut Wydawniczy.
- Holton, G., Brush, G. (1973). *Introduction to Concepts and Theories in Physical Science*. Addison-Wesley Publishing Company.
- Kuhn, T.S. (2003). Metafory w nauce. W: *Idem. Droga po strukturze. Eseje filozoficzne z lat 1970–1993 i wywiad-rzeka z autorem słynnej „Struktury rewolucji naukowych”*. Warszawa: Wydawnictwo Sic!
- Lakoff, G., Johnson, M. (1988). *Metafory w naszym życiu*. Warszawa: Państwowy Instytut Wydawniczy.
- Mehlberg, H. (1967). *The Problem of Physical Reality in Contemporary Science*. W: M. Bunge (red.). *Quantum Theory and Reality*. New York: Springer-Verlag Inc.
- Petrucchioli, S. (1993). *Atoms, Metaphors and Paradoxes. Niels Bohr and the construction of new physics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Rutherford, E. (1973). The Development of The Theory of Atomic Structure. W: G. Holton, S. Brush. *Introduction to Concepts and Theories in Physical Science*. Addison-Wesley Publishing Co.
- Schrödinger, E. (1998). *Czym jest życie? Fizyczne aspekty żywej komórki. Umysł i materia. Szkice autobiograficzne*. Warszawa: Prószyński i S-ka.
- Tempczyk, M. (1998). *Fizyka najnowsza*. Kraków: Znak.
- Wróblewski, A.K. (2006). *Historia fizyki od czasów najdawniejszych do współczesności*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Zawisławska, M. (2011). *Metafory w języku nauki. Na przykładzie nauk przyrodniczych*. Warszawa: Uniwersytet Warszawski.