

HENRYK PIERSA  
Lublin

## OPIS W FIZYCE

Jedną z podstawowych procedur badawczych w fizyce jest opis. Poprzedza on formułowanie praw, teorii fizykalnych oraz procedury wyjaśniająco-prognostyczne.

Przedstawiciele drugiego pozytywizmu uważali opis za jedyne zadanie nauki. Dzięki hołdowaniu tylko faktom, zdobywanym w doświadczeniu i opisywanym w języku fizykalnym, implicite pogląd ten jest charakterystyczny także dla przedstawicieli neopozytywizmu<sup>1</sup>.

Fizycy używają terminu „opis” w różnych kontekstach. Jest on łączony z teorią fizykalną („Opis, jaki daje mechanika kwantowa, jest najbardziej wyczerpujący”), z prawem fizyki („Statystyka Bosego–Einsteina opisuje poprawnie widmowy rozkład energii w promieniowaniu ciała doskonale czarnego”), zjawiskiem („Zjawiska Comptona nie można poprawnie opisać w terminach elektrodynamiki klasycznej”), funkcją („Do opisu wszystkich własności układu atomowego służy funkcja falowa”). W przytoczonych i innych wypowiedziach fizyków termin „opis” jest łączony z procedurą opisu w ścisłym tego słowa znaczeniu, z opisem połączonym z wyjaśnianiem albo wprost z wyjaśnianiem lub prognozowaniem.

Termin „opis” wiąże się ze znaczeniem łacińskiego słowa *descriptio*, znaczącego „wskazanie”, „przydzielenie”, „określenie”. Od niego wywodzą się francuskie *description*, angielskie *description*, niemieckie *Deskription*. Termin ten (także w fizyce) może być rozumiany jako pewna czynność albo wynik tej czynności. W tym ostatnim przypadku stanowi on charakterystykę danego

---

<sup>1</sup> Chodzi tu głównie o elementarne zdania o faktach stanowiące, według neopozytywistów, podstawę wiedzy empirycznej: zdania protokolarne i konstatacje. Pierwsze opisywały surowe fakty, drugie stanowiły również zdania empiryczne, potwierdzające albo obalające daną hipotezę lub prognozę. Por. np. H. B u c z y ń s k a - G a r e w i c z, *Koło Wiedeńskie*, Toruń 1993, s. 20-31.

przedmiotu, zjawiska lub zdarzenia, wyszczególniającą istotne cechy opisywanego obiektu, jako reprezentanta danej klasy lub typu, albo cechy specyficzne, pozwalające wyróżnić jako indywidualium ów przedmiot (zjawisko) spośród przedmiotów (zjawisk) pozostałych<sup>2</sup>.

Dla nauki istotny jest opis rozumiany jako rezultat opisu-czynności, dla fizyki – rezultat stanowiący charakterystykę w pierwszym znaczeniu. W fizyce omawiany rezultat jest wyrażany w formie zdań, formuł matematycznych, wykresów, nieraz zbiorów liczb.

Oprócz opisu w powyższym znaczeniu funkcjonuje szersze, łączące opis z wspomnianą procedurą wyjaśniającą<sup>3</sup>, a także prognostyczną<sup>4</sup>. Zadaniem niniejszego artykułu jest wskazanie przynajmniej ważniejszych kontekstów, w których ściśle rozumiany „opis” występuje w fizyce.

W części wstępnej (punkt I) omawiane są sytuacje fizyczne (stan, proces, przemiana, zjawisko, efekt), w których może wystąpić pojęcie opisu. W punktach II-III przedyskutowano problem języka (łącznie z wielkościami fizycznymi) jako narzędzia opisu. W pozostałych punktach przeprowadzono charakterystykę wyróżnionych rodzajów opisu w fizyce: opisu ilościowego i jakościowego, opisu stanów i procesów, opisu ścisłego i przybliżonego, opisu statystycznego, zupełnego, komplementarnego oraz alternatywnych sposobów opisu. Rozważania na temat adekwatności opisu stanowią zakończenie pracy.

## I. STAN, PROCES, PRZEMIANA, ZJAWISKO, EFEKT

Pojęcie opisu w fizyce kojarzy się z następującymi terminami: stan, proces, przemiana, zjawisko, efekt, a także prawo i teoria. Ustalimy sposób rozumienia tych nazw dla potrzeb niniejszego artykułu.

Układ (mikroukład) fizyczny charakteryzuje zespół określonych wielkości fizycznych, nazywanych nieraz parametrami. Wielkości te mogą w określonym przedziale czasu mieć stałą wartość albo ulegać zmianie w czasie. W pierwszym przypadku mówi się, że układ znajduje się w danym stanie. Warto zauważyć, że nieraz pewna klasa wielkości może ulegać zmianie (para-

---

<sup>2</sup> Nowa *Encyklopedia Powszechna PWN*, t. IV, Warszawa 1996, s. 654.

<sup>3</sup> Por. tamże, s. 654; *The Encyclopaedia Britannica*, ed. 14, t. VII, London–New York 1929, s. 254; *Leksykon filozofii klasycznej*, red. J. Herbut, Lublin 1997, s. 413 n.

<sup>4</sup> E. N i k i t i n, *Wyjaśnianie jako funkcja nauki*, tłum. S. Jędrzejewski i in., Warszawa 1975, s. 216 n.

metry mikroskopowe), a mimo to makroskopowo układ fizyczny będzie pozostawał w określonym stanie.

Jeżeli przynajmniej niektóre wielkości charakteryzujące układ ulegają zmianie w czasie, mamy do czynienia z procesem. Inaczej można powiedzieć, że proces to ukierunkowany w czasie ciąg stanów. Owe stany mogą przechodzić jeden w drugi w sposób ciągły (kolejne położenia kulki wahadła, kolejne zmiany elektrycznego momentu dipolowego) albo nieciągły (zmiany energii atomu przy emisji lub absorpcji promieniowania). Trzeba podkreślić, że proces może się łączyć nie tylko z czasowymi, ale i przestrzennymi zmianami odpowiednich wielkości fizycznych (np. ciśnienia lub gęstości w propagującej się fali akustycznej).

Nieraz zachodzący w układzie proces nie powoduje w nim istotnych zmian. Poza periodyczną zmianą ciśnienia i gęstości, propagująca się w płynie fala akustyczna nie przyczynia się np. do zmiany jego fazy. Spotykamy jednak i takie procesy, którym towarzyszy zmiana niektórych cech układu (zmiana fazy, przemiana pierwiastka promieniotwórczego itp.). W takich przypadkach bardziej odpowiednia niż „proces” jest nazwa „przemiana”.

Termin „zjawisko” jest używany przez fizyków w następujących kontekstach: zjawisko Dopplera, Comptona, zjawisko piezoelektryczne, zjawisko nieliniowe (optyczne, elektryczne), zjawisko Zeemana itp. W nazywanych tymi nazwami sytuacjach chodzi o pojawienie się (pod wpływem określonej przyczyny) nowego stanu układu: spowodowanej ruchem źródła zmiany częstotliwości dźwięku, zmiany energii i pędu fotonu spowodowanej jego rozproszeniem, pojawienia się pod wpływem pola elektrycznego naprężeń w piezoelektryku itp. Ponieważ tak rozumiane zjawisko traktuje o skutku działania określonej przyczyny na układ, można je traktować jako efekt i tak nieraz bywa nazywane (por. np. efekt Kerra). Wobec tego zjawisko (efekt) może być utożsamiane ze stanem układu. W świetle powyższych ustaleń termin „opis” będziemy odnosili do stanu układu lub do zachodzącego w nim procesu.

## II. CHARAKTERYSTYKI ILOŚCIOWE OPISU – WIELKOŚCI FIZYCZNE

Do charakterystyki ilościowej obiektów materialnych wykorzystuje się wielkości fizyczne: skalary (masa, energia, ładunek elektryczny), wektory (prędkość, przyspieszenie, siła), pseudowektory (moment pędu, wektor indukcji magnetycznej), tensory (względnej przenikalności elektrycznej, bezwładności). Wyłączając wielkości podstawowe, wielkości pochodne otrzymuje się

w wyniku działania określonych operatorów matematycznych na te pierwsze lub wcześniej zdefiniowane. Na przykład działając operatorem  $\frac{d}{dt}$  na promień wodzący  $\mathbf{r}$ , otrzymujemy wektor prędkości  $\mathbf{v}$ , operatorem  $\frac{d^2}{dt^2}$  – wektor przyspieszenia  $\mathbf{a}$ , działając operatorem mnożenia skalarnego na wektory siły  $\mathbf{F}$  i przemieszczenia  $\mathbf{s}$  – otrzymujemy pracę  $W$ , itd.

Poza cechami „wielkość” i „wymiar” każdemu z obiektów fizycznych przysługują określone własności matematyczne, w szczególności odpowiednie zachowanie się przy różnego rodzaju przekształceniach układów współrzędnych (obrotach, translacjach, odbiciach): sposób transformowania jak skalar (niezmiennik), wektor, pseudowektor lub danej walencji tensor.

Przy charakterystyce obiektów makroskopowych omawiane wielkości w zasadzie mogą przyjmować dowolne wartości liczbowe z określonych przedziałów, np. temperatura  $T \in (0, \infty)$ , energia  $E \in \langle 0, \infty \rangle$  itd. Często niezbyt szczęśliwie się mówi, że zbiór wartości liczbowych wielkości makroskopowych stanowi widmo ciągłe.

W mikrofizyce mierzalnym wielkościom fizycznym przyporządkowane są odpowiednie operatory hermitowskie, np. pędowi – operator pędu  $\hat{p} = -i\hbar\nabla$ , energii – operator  $\hat{E} = i\hbar\frac{\partial}{\partial t}$ , momentowi pędu – operator  $\hat{l} = \hat{r} \times \hat{p}$  itd.

Mimo tego, że przy przekształceniach układów współrzędnych omawiane operatory zachowują się jak skalary lub wektory (pseudowektory), że przysługuje im wymiar, nie mają one żadnej wartości liczbowej oraz pogładowego przedstawienia przestrzennego, charakterystycznego dla wektora i pseudowektora.

Formalnie wielkości fizyczne w mikrofizyce uzyskuje się w wyniku uśredniania wyrażeń zawierających funkcję falową, funkcję z nią sprzężoną i odpowiedni operator.

Większości „mikroskopowych” wielkości fizycznych (energia, moment pędu, trzecia współrzędna momentu pędu, spin) przysługuje cecha nieciągłości (dyskretności), dzięki której mogą one przyjmować tylko określone wartości ze zbioru liczb wymiernych. Przy tym owe dozwolone wartości stanowią przeważnie zbiory nieskończone.

Powyższe rozważania należy uzupełnić następującymi uwagami:

1. Także wielkości charakteryzujące pewne układy makroskopowe przyjmują nieraz dyskretne zbiory wartości. Przykładem są częstości drgań strun, membran, słupów powietrza<sup>5</sup>.

2. W mikrofizyce występują również wielkości nieskwantowane (np. pęd, energia układu jądro–elektron po jonizacji atomu).

3. Operatory, za pomocą których otrzymuje się „klasyczne” wielkości fizyczne, przeważnie nie są hermitowskie.

4. Niektóre wielkości i pojęcia makroskopowe nie mają sensu fizycznego w mikrofizyce (np. prędkość, przyspieszenie, tor, lokalizacja przestrzenna cząstki o zerowej masie spoczynkowej).

5. Z makroskopowych wielkości mikroobiektom przysługują: masa, energia, ładunek elektryczny, pęd, moment pędu, moment magnetyczny itp.

Poza wymienionymi, każdemu mikroobiektovi uważanemu za niezłożony przysługuje szereg charakterystyk kwantowych (liczb kwantowych): spin  $s$ , parzystość  $P$ , izospin  $I$ , trzecia składowa izospinu  $I_3$ , liczba leptonowa  $L$ , barionowa  $B$  i wiele innych. Wśród tych liczb kwantowych występują wielkości mianowane (moment magnetyczny, spin) oraz niemianowane (np. parzystość).

Oprócz charakterystyk ilościowych mikroobiektom przypisuje się także cechy jakościowe: przynależność mikroobektu do określonej statystyki, tożsamość, nierozróżnialność mikroobektów identycznych itp.

### III. PROBLEM JĘZYKA OPISU W FIZYCE

Zwykło się mówić, że język fizyki tworzy się w wyniku doprecyzowania terminów języka potocznego, a także iż jest nim język matematyki. Skomentujemy powyższe stwierdzenia.

W języku fizyki można wyróżnić przynajmniej trzy nie wykluczające się komponenty: terminy używane na oznaczenie obiektów materialnych i procesów, terminy funkcjonujące w opisach budowy i działania aparatury pomiarowej (terminy fizyki technicznej) oraz fizykalnie zinterpretowane symbole, występujące w formułach matematycznych danej teorii fizykalnej. Pomijając język fizyki technicznej, zajmiemy się dwoma pozostałymi komponentami języka fizyki.

---

<sup>5</sup> H. P i e r s a, *Dyskretne wielkości fizyczne w teorii równań różniczkowych*, „Roczniki Filozoficzne”, 41 (1993), z. 3, s. 135-143.

Wiele terminów, przede wszystkim fizyki klasycznej, jest zapożyczonych z języka potocznego. Nazwy: „płyn”, „ciężar”, „siła”, „praca”, „energia” i wiele im podobnych, mają taką genezę. Za pomocą odpowiednich definicji projektujących ustala się dla nich jednoznaczny, przeważnie różny od potocznego, sposób rozumienia. Na przykład nazwie „płyn” nadaje się taki sens, że oznacza ona zarówno ciecz, jak i gaz. Zdefiniowana wzorem  $W=F \cdot s$  praca ma niewiele wspólnego z tą nazwą używaną w języku potocznym<sup>6</sup>.

Z takich terminów specyficznych dla poszczególnych teorii, za pomocą reguł formowania charakterystycznych dla języka potocznego, formułuje się zdania, wykorzystywane w różnych procedurach poznawczych fizyki.

Zdefiniowane terminy-wielkości na podstawie strukturalnych reguł formowania matematyki pozwalają konstruować różnego rodzaju formuły: równania (różniczkowe, całkowe), nierówności, funkcje, funkcjonały itp. Ze względu na fakt, że w tych formułach, oprócz symboli matematycznych (pochodnej, całki, wariacji itp.), występują specyficzne terminy fizykalne, formuły te będziemy nazywać fizykalnymi<sup>7</sup>.

Wraz z powstaniem mechaniki mikroobektów pojawiły się trudności związane z opisem tych mikroobektów i procesów w nich zachodzących (nazywane skrótowo przez fizyków trudnościami pojęciowymi).

W związku z tym wypada zauważyć, że w rozwoju fizyki występowały wielokrotnie podobne trudności pojęciowe. Można tu wymienić kłopoty z rozumieniem „oddziaływania na odległość”, przekazywaniem ciepła czy eterem.

Przed odkryciem Faradaya i Maxwella nie potrafiono opisać (i zrozumieć) oddziaływania między dwoma naładowanymi elektrycznie ciałami, znajdującymi się w skończonej odległości od siebie. Podobnie przed pracami Meyera, Thompsona i Clausiusa trudne do zrozumienia i opisanie były natura ciepła oraz mechanizm jego przekazywania od ciała gorętszego do chłodniejszego, a przed sformułowaniem teorii Maxwella – mechanizm zjawisk świetlnych.

---

<sup>6</sup> Formułowanie definicji dla różnych terminów funkcjonujących obecnie w fizyce nie odbywało się bez trudności. Borykano się nieraz z nimi przez dziesiątki lat. Typowym przykładem może być nazwa „energia”, powszechnie rozumiana jako synonim wyrażenia „zdolność do wykonania pracy”. Odniesiona początkowo do energii kinetycznej (*vis viva*), poszerzała swój zakres i treść na energię potencjalną (sił grawitacyjnych, elektrostatycznych, sprężystych), wewnętrzną, jądrową itd.

<sup>7</sup> Wypada zauważyć, że występujące w formułach fizyki symbole „=” i „<” mają inny sens niż w formułach matematycznych. Na przykład znak „=” wyraża nie tylko równość liczb, ale także tożsamość wymiarów przyrównywanych wielkości. Podobna uwaga odnosi się do znaku nierówności.

W celu ich opisania i zrozumienia, za pomocą odpowiednich definicji projektujących, do języka fizyki wprowadzono terminy: „pole”, „cieplik”, „eter” i „wektor świetlny”. Dalszy rozwój fizyki potwierdził celowość wprowadzenia pierwszego terminu. Wzbogacając jego treść oraz poszerzając zakres (pole grawitacyjne, pole elektromagnetyczne, pole mezonowe itp.), usankcjonowano funkcjonowanie jednego z najważniejszych pojęć współczesnej fizyki. Przy formułowaniu pierwszej zasady termodynamiki trzeba było zrezygnować z nie mającej żadnego desygnatu nazwy „cieplik”, a przekaz ciepła zastąpić wymianą energii wewnętrznej na „sposób ciepła”. W optyce tajemniczy wektor świetlny utożsamiono z wektorem indukcji elektrycznej, a kosmiczny eter podzielił los cieplika.

Jednakże twórcy mechaniki kwantowej zwracali uwagę na trudności innej natury: przypisywanie danemu mikroobiektovi dwu wykluczających się, klasycznych obrazów: korpuskularnego i falowego<sup>8</sup>. Ten fakt powodował, że zapożyczone z fizyki klasycznej (poglądowe) terminy „cząstka” i „fala” w odniesieniu do mikroobiektów musiały zmienić swój sens. Zmiana sensu nazwy „fala” najlepiej uwidacznia się przy dyfrakcji jednego fotonu. W przeciwstawieniu do obrazu dyfrakcyjnego fali świetlnej na szczelinie, nie bardzo wiadomo, w którym prążku dyfrakcyjnym znajduje się foton: może z różnymi prawdopodobieństwami w każdym? Wtedy jednak pojawiła się nowa trudność: co się dzieje z „falowaniami” we wszystkich prążkach dyfrakcyjnych w momencie zetknięcia fotonu z ekranem – czy ulegają ściągnięciu do punktu, w którym upadł foton (anomalia Reichenbacha)?

Podobnie przedstawia się sprawa z „cząstką”. Poza pozbawieniem jej cechy ograniczoności przestrzennej, przy przechodzeniu cząstek przez dwie szczeliny nie jest zachowana zasada, którą można by nazwać zasadą superpozycji dla cząstek: liczba cząstek dochodzących do danego punktu ekranu (detektora) winna być równa liczbie cząstek przechodzących przez jedną i drugą szczelinę. Tymczasem rozkład wielu cząstek na ekranie przedstawia typowy obraz dyfrakcyjny. E. Schrödinger utrzymywał, że omawianego obiektu nie można nazwać klasycznie rozumianą cząstką<sup>9</sup>.

---

<sup>8</sup> W historii fizyki nie po raz pierwszy pojawiła się taka sytuacja, gdy danemu obiektowi trzeba było przypisać wykluczające się cechy. Takim obiektem był hipotetyczny eter, ośrodek o idealnej sztywności i doskonałej przenikliwości.

<sup>9</sup> E. S c h r ö d i n g e r, *Science and Human Temperament*, New York 1935, s. 72-73.

W związku z niemożnością dokładnego pomiaru (zasada nieoznaczoności) zmieniły swój sens terminy „położenie” i „pęd”. W. Heisenberg<sup>10</sup> utrzymywał, że położenie i prędkość (pęd) o wartościach mniejszych od określonych przez wspomnianą zasadę są fizycznie bezsensowne.

E. Nagel<sup>11</sup> stwierdza, że szereg wielkości fizycznych teorii kwantów formalnie wprowadza się na podstawie analogii strukturalnej między formułami mechaniki kwantowej i fizyki klasycznej (równanie Schrödingera i równanie falowe). Jednakże analogia ta jest tylko częściowa. W związku z tym i występujące w formułach wielkości nie muszą mieć tego samego sensu.

Uzasadnienie stwierdzenia, że zmienne reprezentujące położenie  $q$  i pęd  $p$  mają w mechanice kwantowej inny sens niż w fizyce klasycznej, J. von Neumann<sup>12</sup> przeprowadza w następujący sposób: gdyby wielkości  $q$  i  $p$  miały sens klasyczny, nie byłoby konieczności rozróżniania  $\hat{q}\hat{p}$  i  $\hat{p}\hat{q}$ . Uwaga ta odnosi się do dowolnej pary kanonicznie sprzężonych zmiennych dynamicznych.

Oprócz reinterpretacji omawianych terminów, nowe trudności pojawiły się w związku z fizykalną interpretacją funkcji falowej i „wielkości” zdefiniowanych za jej pomocą (gęstość prawdopodobieństwa  $\rho$ , gęstość prądu prawdopodobieństwa  $\mathbf{j}$  itp.).

Występujące w formułach fizyki klasycznej symbole na ogół mają ustalony sens fizyczny. Przykładowo, figurujące w równaniu falowym funkcje  $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ ,  $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$  lub  $U(\mathbf{r}, t)$  i  $\mathbf{A}(\mathbf{r}, t)$  oznaczają odpowiednio wektory natężeń pól elektrycznego i magnetycznego lub potencjały: skalarny i wektorowy pola elektromagnetycznego. Z wyjątkiem potencjału  $\mathbf{A}$ , wymienionym wielkościom przysługuje cecha mierzalności. Potencjał wektorowy jest przykładem pojęć klasycznych, których sens fizyczny nie jest bezpośrednio oczywisty. Cechę tę ma dopiero rezultat operacji matematycznej na nim przeprowadzonej – wektor indukcji magnetycznej  $\mathbf{B}$ .

W przeciwstawieniu do wektora  $\mathbf{A}$ , który w elektrodynamice jest definiowany za pomocą wektora indukcji magnetycznej, funkcja falowa mechaniki kwantowej stanowi deskryptywny termin pierwotny. W związku z tym za wszelką cenę starano się ustalić jej sens fizyczny, interpretując ją jako falę

---

<sup>10</sup> W. H e i s e n b e r g, *The Physical Principles of Quantum Theory*, Chicago 1930, s. 6.

<sup>11</sup> E. N a g e l, *Struktura nauki*, Warszawa 1970, s. 264.

<sup>12</sup> J. v o n N e u m a n n, *Mathematical Foundation of Quantum Mechanics*, Princeton 1955, s. 9.



pilotującą, falę podwójnego rozwiązania (de Broglie) czy falę charakteryzującą cząstkę (paczkę falową).

Ostatecznie zwyciężyła interpretacja szkoły kopenhaskiej, według której sens fizyczny przypisuje się nie samej funkcji  $\Psi$ , lecz wyrażeniu  $\rho = |\Psi|^2$  (dokładniej wielkości  $\rho = \Psi^* \Psi$ , gdzie  $\Psi^*$  jest funkcją sprzężoną z  $\Psi$ ), rozumiejąc przez nie gęstość prawdopodobieństwa spotkania mikroobiektu w określonym punkcie przestrzeni konfiguracyjnej.

#### IV. OPIS ILOŚCIOWY I JAKOŚCIOWY

Opis fizyczny może mieć charakter jakościowy lub ilościowy. W pierwszym wypadku podawane są cechy jakościowe opisywanego obiektu (np. barwa światła, kolor metalu), w drugim zaś cechy ilościowe, a więc mianowane lub niemianowane wielkości fizyczne.

W fizyce najczęściej dokonujemy opisów ilościowych. Wśród tych dominują opisy za pomocą szeroko rozumianych zależności funkcyjnych, wyrażające zależność jednej wielkości od innej (lub innych) wielkości: na przykład zależność wektora polaryzacji od wektora natężenia zewnętrznego pola elektrycznego lub zależność wektora indukcji magnetycznej od współrzędnych przestrzennych i czasu w fali elektromagnetycznej. Owe zależności funkcyjne bardzo często mają postać formuł matematycznych, nieraz – postać graficzną, a nawet postać tabel. Zależności funkcyjne wyrażone za pomocą formuł matematycznych występują w teoriach teoretycznie wykończonych w postaci graficznej – zarówno we wspomnianych teoriach, jak i przy wyrażaniu uogólnień z jednostkowych raportów pomiarowych, w formie tabel – przy podawaniu pojedynczych raportów pomiarowych, a nieraz ich indukcyjnych uogólnień.

Z opisem ilościowym wiąże się opis za pomocą równań matematycznych (najczęściej różniczkowych): ruchu wahadła za pomocą równania oscylatora harmonicznego, propagacji fali – za pomocą równania falowego itd. Chodzi tutaj o opis wyrażony za pomocą funkcji, a także ciągów liczb (wartości własnych), które uzyskuje się w wyniku scałkowania określonego równania matematycznego. Omawiany rodzaj opisu ilościowego dokonywany jest na gruncie określonej teorii (nieraz kilku teorii), np. mechaniki, elektrodynamiki, fizyki statystycznej (klasycznej lub kwantowej). Chociaż opis jakościowy nie jest typowy dla opisu fizycznego, nieraz spotykamy się także z takim opisem. Przykład mogą stanowić zdania: „Sód jest łatwo utleniający” lub „Płyny

są mało ściśliwe”. Przynajmniej niektóre z tego rodzaju zdań można zamienić na zdania o charakterze ilościowym. Spośród przytoczonych drugie zdanie wyrażamy w formie: „Płyny mają znikomo małe współczynniki ściśliwości”.

## V. OPIS STANÓW I PROCESÓW

Na podstawie ustaleń dokonanych w punkcie I będziemy się zajmowali opisem stanów układów (mikroukładów) i procesów fizycznych. Podając wykaz wszystkich lub niektórych parametrów wraz z przysługującymi im wartościami numerycznymi, dokonujemy opisu stanu układu (mikroukładu). Podając (w formie analitycznej lub np. graficznej) zależność zmieniających się w czasie przynajmniej niektórych spośród tych wielkości, dokonujemy opisu procesu fizycznego. Trzeba zauważyć, że przy opisie zarówno stanu, jak i procesu nie ma konieczności wymieniania wszystkich parametrów. Przeważnie zawsze pomiędzy wielkościami fizycznymi istnieją określone zależności, pozwalające na podstawie znajomości jednych wielkości wyznaczać inne.

Wśród układów fizycznych trzeba wyróżnić takie, w odniesieniu do których nie można sensownie mówić o stanie (chyba że o stanie w danym momencie), lecz tylko o procesie. Przykłady takich sytuacji mogą stanowić zbiór cząstek gazu lub zmienne w czasie (i przestrzeni) pole elektromagnetyczne.

Oprócz opisu stanów układów makroskopowych możliwe, a często konieczne są opisy uwzględniające mikroskopową strukturę ciał materialnych. Stosowanie tego rodzaju czynności jest niezbędne w przypadkach, gdy opis łączy się z procedurą eksplanacyjną. W celu udzielenia odpowiedzi na pytanie, dlaczego dany dielektryk ma określoną przenikalność elektryczną, trzeba opisać elektryczne własności atomów lub molekuł: rodzaj multipola elektrycznego (dipol, kwadrupol itp.), jego wartości numeryczne i orientację przestrzenną.

Opis stanów mikroukładów wygląda nieco inaczej w odniesieniu do mikroukładów złożonych (atomów, molekuł, jąder atomowych), a inaczej w odniesieniu do mikroobiektów, przynajmniej aktualnie uważanych za niezłożone (elektrony, fotony, neutrina itp.). Przy opisie stanów atomu lub molekuly podaje się skład mikroukładu, konfigurację elementów składowych, rodzaj występujących oddziaływań oraz cechy ilościowe: energię, całkowity moment pędu itp. Choć wśród wymienionych informacji spotyka się i dane dotyczące poszczególnych elementów składowych (np. elektronu walencyjnego w atomie), omawiany opis jest całościowy.

Opis mikroukładów uważanych za niezłożone sprowadza się do wymienienia przysługujących im liczb kwantowych oraz takich cech, jak przynależność do odpowiedniej statystyki. Opis mikroobiektów niezłożonych z konieczności musi być holistyczny.

## VI. OPIS ŚCISŁY I PRZYBLIŻONY

Cecha ścisłości bądź przybliżoności wiąże się z opisem ilościowym i może dotyczyć wartości numerycznych wielkości fizycznych charakteryzujących układ materialny, praw „rządzających” przebiegiem procesów w układzie, a pośrednio także teorii fizykalnych. W dwu pierwszych przypadkach opis byłby uważany za ścisły, gdyby zawierał dokładne wartości liczbowe wielkości fizycznych charakteryzujących układ w określonym stanie albo posługiwał się ścisłymi prawami.

W zasadzie w fizyce nie spotykamy takich sytuacji. W praktyce badawczej fizyka stosuje się opis przybliżony, warunkowany różnymi przyczynami. Spośród nich na szczególne podkreślenie zasługują: przybliżoność pomiarów oraz przybliżoność praw fizyki.

Każdy pomiar fizyczny obarczony jest różnego rodzaju błędami, wśród których nie da się wyeliminować błędów przypadkowych. Dzięki coraz bardziej precyzyjnej aparaturze pomiarowej (a także predyspozycjom eksperymentatora) błędy przypadkowe można czynić tylko coraz mniejszymi.

Oprócz omówionego źródła przybliżoności, w odniesieniu do mikroobiektów należy uwzględnić przybliżoność warunkowaną relacjami nieoznaczoności.

Przeważającą większość praw fizyki stanowią prawa przybliżone, choć rodzaj i stopień przybliżoności różnych praw jest różny. Przybliżone jest II prawo Newtona  $\mathbf{F}=\mathbf{ma}$ , prawo Clapeyrona, van der Waalsa, prawo powszechnego ciężenia i wiele innych. Różne są źródła przybliżoności: ograniczone do danej teorii (II prawo Newtona, prawo ciężenia powszechnego), do określonych rodzajów układów fizycznych (gaz doskonały lub gaz rzeczywisty) itd. Wypada zauważyć, że nawet w niektórych prawach przybliżonych pewne rodzaje zależności wydają się mieć cechę ścisłości. Według współczesnej wiedzy fizykalnej, zależność energii atomu wodoru  $E_n$  od głównej liczby kwantowej  $n$ :  $E_n \sim -n^{-2}$ , wydaje się być ścisłą.

Za prawa ścisłe fizyk byłby skłonny uznać prawa zachowania energii, pędu, momentu pędu, liczby leptonowej i barionowej. Cechę ścisłości należy

przypisać także pewnym szczególnym przypadkom wymienionych praw (np. II postulatowi Bohra). Teoria fizykalna jest przybliżona, gdy zawiera przybliżone komponenty, a więc założenia, prawa, stałe uniwersalne i inne charakterystyki ilościowe.

## VII. OPIS STATYSTYCZNY

Przy charakterystyce stanów lub procesów typowych dla zbiorów złożonych z bardzo dużej liczby elementów (populacji) odwołujemy się do opisu statystycznego. Przy tym opisie korzystamy z pojęć statystyki matematycznej (zmienna losowa ciągła lub dyskretna, wartość średnia, wariancja, odchylenie standardowe) oraz rachunku prawdopodobieństwa (prawdopodobieństwo, gęstość prawdopodobieństwa), pozwalających w sposób ilościowy scharakteryzować daną populację.

Opis statystyczny może dotyczyć całej populacji lub tylko wybranego (w drodze losowania) jej podzbioru. Pierwszy wariant może być zrealizowany w odniesieniu do zbioru o skończonej, na ogół niewielkiej liczbie elementów, drugi zaś w odniesieniu do zbiorów o bardzo dużej (także nieskończonej) liczbie elementów.

W fizyce z opisem statystycznym mamy do czynienia przynajmniej w dwu sytuacjach: przy matematycznym opracowaniu raportów z pomiarów oraz w określonych teoriach fizykalnych (fizyka statystyczna, mechanika kwantowa).

Przy matematycznym opracowaniu rezultatów pomiarów, poza podaniem wartości numerycznej poszukiwanej wielkości, zachodzi konieczność oszacowania stopnia dokładności (lub przybliżoności) wyniku pomiaru. Obydwie te procedury przeprowadza się, obliczając średnie, wariancje i odchylenia standardowe.

Fizyka statystyczna (zarówno w wersji klasycznej, jak i kwantowej) jest teorią statystyczną w tym sensie, że jednym z podstawowych jej zadań jest obliczanie wartości średnich (średnia energia, średni pęd, średni moment dipolowy itp.).

Jednakże już technika obliczania tych średnich jest nietypowa dla procedur stosowanych w statystyce matematycznej (por. uśrednianie po zespole kanonicznym). Z obliczaniem średnich łączy się, typowe dla statystyki fizycznej, otrzymywanie wielkości makroskopowych (ciśnienia, temperatury, wektora polaryzacji) jako wyniku uśrednienia odpowiednich wielkości mikroskopo-

wych. W związku z tym, elementem opisu statystycznego w fizyce będą zdania: „Temperatura gazu jest proporcjonalna do średniej energii kinetycznej cząstek tego gazu” lub „Średnia energia kinetyczna klasycznego oscylatora harmonicznego wynosi  $kT$ ”.

Inny od omówionego znaczenia sens ma opis statystyczny związany z mechaniką kwantową. Tutaj opis statystyczny rozumiany jest jako posługujący się pojęciem prawdopodobieństwa zamiast pewności (np. prawdopodobieństwo przemiany jądrowej nuklidu, zmiany stanu kwantowego atomu lub molekuly).

### VIII. OPIS ZUPEŁNY

Wyrażenie „opis zupełny” funkcjonuje w fizyce w dwu znaczeniach. W jednym z nich, podobnie jak w języku potocznym, traktuje się je jako synonimiczne ze zwrotami: „opis kompletny” czy „opis wyczerpujący”. Przez tak rozumiany opis zupełny rozumie się wyszczególnienie wszystkich informacji o opisywanym stanie układu lub o procesie. Opis zupełny propagacji fali elektromagnetycznej zawierałby dane o rodzaju fali (płaska, sferyczna, cylindryczna), o wzajemnej orientacji wektorów pola elektrycznego i magnetycznego względem kierunku propagacji, o częstotliwości, długości fali (lub liczbie falowej), o stanie polaryzacji, o niesionej energii, pędzie, a także prędkości propagacji w danym ośrodku materialnym. W odniesieniu do mikroobiekty jako przedmioty opisu byłoby to równoznaczne z podaniem wszystkich wielkości fizycznych, w tym i wartości liczbowych odpowiednich liczb kwantowych, a także takich cech jakościowych, jak przynależność do danej statystyki. Przy tak pojmowanym wyrażeniu „opis zupełny”, w fizyce nie zawsze byłby on możliwy, a nawet konieczny. Na przykład przy charakterystyce stanu gazu nie jest możliwa i konieczna znajomość położenia i pędów poszczególnych jego cząstek.

Drugie znaczenie wyrażenia „opis zupełny” wiąże się wyłącznie z mikroobiektami. Dla tych przedmiotów, na podstawie zasady nieoznaczoności, zmienne dynamiczne są pogrupowane w zbiory wielkości jednocześnie mierzalnych, zwane układami zupełnymi obserwabli. Na przykład stan swobodnego elektronu określają pęd (lub jego współrzędne) i spin, stan fotonu stowarzyszonego z klasyczną falą płaską – wektor falowy oraz polaryzacja itd. Ponieważ w mechanice kwantowej jednocześnie mierzalne są tylko układy zupełne zmiennych dynamicznych, przeto przy opisie stanu mikroukładu tylko one mogą być wyszczególniane.

Wyłączając drugie rozumienie wyrażenia „opis zupełny”, opis podawany w fizyce nie spełnia wymogu zupełności. Przy opisie zarówno stanów, jak i procesów w sposób zreflektowany oraz nieświadomy pomijane są różne cechy uważane za nieistotne dla opisywanej sytuacji. Przykładowo: przy opisie ruchów planet wokół Słońca z funkcji  $r(t)$ ,  $\varphi(t)$  i  $r(\varphi)$  podawana jest tylko ostatnia.

#### IX. OPIS KOMPLEMENTARNY

Z opisem zupełnym mikroobiektów oraz zachodzących w nich procesów łączy się opis komplementarny. Opis taki ma miejsce wtedy, gdy wśród wymienianych cech mikroobiektów podawane są cechy wykluczające się, a w odniesieniu do opisywanych stanów wymienia się stany o krańcowo różnych charakterystykach ilościowych.

Typowym przykładem komplementarnego opisu mikroobektu jest opis eksponujący jego cechy korpuskularne (ograniczoność przestrzenna, lokalizacja w określonym punkcie przestrzeni  $E^3$ , posiadanie energii, pędu itp.) i falowe (brak ograniczoności i lokalizacji przestrzennej, długość fali, natężenie, polaryzacja itp.). Przykładem komplementarnego opisu stanu układu jest jego charakterystyka z wykorzystaniem statystyk: klasycznej (gaz rozrzedzony) albo kwantowych (zwyrodniały gaz o dużych i bardzo dużych gęstościach).

Oprócz własności wykluczających się, opis komplementarny może zawierać także pewne cechy wspólne, np. skończoną (choć nie taką samą) prędkość propagacji fali i cząstki, brak oddziaływania pomiędzy cząstkami klasycznego i kwantowego gazu doskonałego, przysługiwanie cząstkom obydwu rodzajów gazu określonej, choć różnej liczby stopni swobody. Opis komplementarny mikroukładu, stanu lub procesu jest realizowaniem wymogu opisu quasi-zupełnego: podawania możliwie największej liczby danych o opisywanym obiekcie, choćby wśród tych danych znajdowały się i własności, które się wykluczają.

#### X. ALTERNATYWNE SPOSOBY OPISU

Wyrażenie „alternatywne sposoby opisu” może być odniesione do sytuacji, gdy eksponujemy różne, ale nie wykluczające się cechy danego układu fizycznego lub zachodzącego w nim procesu. Na przykład, gdy przy opisie

masy ciała zwracamy uwagę na jej aspekt bezwładnościowy albo grawitacyjny lub przy opisie energii układu podkreślamy jej cechę dynamiczną (energia kinetyczna) albo statyczną (energia potencjalna), wówczas dokonujemy opisu na dwa sposoby alternatywne.

Z opisem alternatywnym mamy do czynienia również wtedy, gdy odpowiednie formuły matematyczne zawierają różne zmienne, na przykład: wychylenie  $q$  i czas  $t$  albo wychylenie i pęd  $p$  przy opisie ruchu oscylatora harmonicznego. Różnym formułom matematycznym odpowiadają alternatywne obrazy graficzne<sup>13</sup>: sinusoida (lub kosinusoida) w zmiennych wychylenie-czas albo elipsa w zmiennych wychylenie-pęd.

Od omówionego rodzaju opisu alternatywnego należy odróżnić opis przeprowadzony na gruncie różnych teorii lub różnych reprezentacji tych samych teorii. Taka sytuacja ma miejsce np. w mechanice, przedstawianej w formalizmie Lagrange'owskim lub Hamiltonowskim albo w mechanice kwantowej, wykładanej w reprezentacji położeniowej pędowej lub energetycznej.

W pierwszym wypadku do opisu stanów układu lub procesów wykorzystywane są różne zmienne niezależne (współrzędne uogólnione albo współrzędne uogólnione i pędy uogólnione). W związku z tym w żargonie fizyków mówi się, że opis Lagrange'owski przeprowadzany jest w przestrzeni konfiguracyjnej, natomiast opis Hamiltonowski – w przestrzeni fazowej. W każdym z tych formalizmów zasadniczo różne są równania ruchu (m. in. rząd i liczba równań) i ich całki. W drugim przypadku również wybiera się różne zmienne niezależne (np. położenie w reprezentacji położeniowej, pęd w reprezentacji pędowej). Różnym zmiennym odpowiadają inne wyrażenia na operatory hermitowskie, różna postać analityczna dla równania Schrödingera i różne jego rozwiązania. W rezultacie w obydwu przypadkach otrzymane rozwiązania dostarczają różnych danych o opisywanym stanie lub procesie. Na ogół pomiędzy wielkościami występującymi w omawianych opisach istnieją pewne zależności (przekształcenia). Znajomość określonych wielkości w jednym formalizmie (lub reprezentacji) oraz wspomnianych zależności pozwala wyznaczyć interesujące wielkości w innym formalizmie (innej reprezentacji). Należy dodać, że niektóre wielkości fizyczne, jako niezmienniki określonych przekształceń (np. wartości własne energii), pozostają takie same we wszystkich możliwych sposobach opisu. W odniesieniu do tych wielkości omawiane rodzaje opisów alternatywnych są opisami równoważnymi.

---

<sup>13</sup> Reprezentacja graficzna jakiejś funkcji jest opisem alternatywnym w stosunku do postaci analitycznej tej funkcji.

Opis alternatywny tego samego mikroukładu (układu) może być przeprowadzony na gruncie teorii fizykalnych o różnym stopniu fundamentalności. Przykładem może być opis układu termodynamicznego na gruncie termodynamiki fenomenologicznej i statystycznej lub opis pola elektromagnetycznego na gruncie elektrodynamiki klasycznej i kwantowej. W tym ostatnim przypadku pole promieniowania klasycznie traktowane jest jako fala elektromagnetyczna, scharakteryzowana wektorami natężeń pola elektrycznego i magnetycznego lub potencjałami elektromagnetycznymi. Z tego powodu układ nazywa się układem o nieskończonej liczbie stopni swobody. Za pomocą wymienionych funkcji (oraz ewentualnie operacji uśredniania) wyraża się pozostałe wielkości: energię, natężenie, pęd. Według elektrodynamiki kwantowej, pole promieniowania uważane jest za nieskończony (ale przeliczalny) zbiór fotonów. Każdemu fotonowi przypisuje się energię, wektor falowy (a więc i pęd), jednostkowy spin, określoną polaryzację i przynależność do statystyki Bosego-Einsteina, a zbiorowi fotonów – liczbę obsadzeń przez fotony danego stanu kwantowego. Pojęcie fotonu jest bardziej podstawowe niż pojęcie fali elektromagnetycznej.

## XI. OPIS ADEKWATNY

Wyrażenie „opis adekwatny” to tyle, co opis wierny, z czymś zgodny, dokładnie czemuś odpowiadający. Wyraża on wierność rezultatów poznania, także fizykalnego, względem opisywanej rzeczywistości materialnej. W zależności od tego, czy w opisie uwzględnione są wszystkie, czy tylko niektóre aspekty opisywanego układu lub procesu, można mówić o opisie całkowicie lub częściowo adekwatnym.

Opis całkowicie adekwatny jest w fizyce niemożliwy. Wydaje się, że w niektórych przypadkach można by mówić o opisie częściowo (w określonym aspekcie) adekwatnym. Zdania: „Równoległa wiązka światła po przejściu przez soczewkę zbierającą staje się wiązką zbieżną” lub „W ośrodku optycznie jednorodnym promień świetlny porusza się po linii prostej” wydają się wiernie zdawać sprawę z faktycznie zachodzących procesów.

Problem adekwatności (czy nieadekwatności) opisu w fizyce wyraźnie został postawiony w latach trzydziestych XX wieku, w związku z powstaniem mechaniki kwantowej. W odniesieniu do mikroobiektów i zachodzących w nich procesów istnieje on nadal. Poza zagadnieniami postawionymi przez twórców fizyki kwantowej pojawiły się nowe. Mikrofizyka eksponuje modele



mikroobektów: planetarny i powłokowy model atomu, powłokowy, kropłowy, kolektywny (itp.) model jądra atomowego, kwarkowy model budowy hadronów itd. Opis wymienionych mikroobektów uwzględnia cechy odpowiadających im modeli.

W związku z tym zagadnienie adekwatności opisu należałoby zastąpić pytaniem, czy (i ewentualnie w jakim stopniu) określony model odpowiada modelowanemu mikroobektowi. Jeżeli powłokowy model budowy atomu uznalibyśmy za wiernie modelujący atom, to nie można tego powiedzieć o żadnym z modeli jądra atomowego. Podobną uwagę, choć inaczej uzasadnioną, można wypowiedzieć w odniesieniu do oddziaływań elementarnych, jako przykładu procesów fizycznych.

Powyższe rozważania oraz faktycznie stosowane procedury badawcze sugerują, że bardziej niż cechą „adekwatności” fizyk interesuje się cechą „użyteczności” lub „przydatności” opisu, łącząc je z funkcjami wyjaśniająco-prognostycznymi teorii albo hipotezy.

## THE DESCRIPTION IN PHYSICS

### S u m m a r y

The first part of this paper is focussed on the concept of state of a physical system, process, transformation, phenomenon and effect. Due to conceptive difficulty in microobject description, the problem of language in physics, as well as physical values which figure as quantitative characteristic of the description are analyzed here. The further part of the paper is devoted to a typology and characteristic of quantitative and qualitative description, the description of state and process, the precise and approximate description, the statistical, complete and complementary description, alternative means of description as well as the adequate description.