



Proces poznawczy w naukach przyrodniczych

Janusz Mroczka

I. Wprowadzenie

*Zawsze najbardziej przyciąga naszą ciekawość to,
co znajduje się poza granicą naszej wiedzy.*

(M. Heller)

Pomiary praktyczne używane są od tysięcy lat. Celem ich jest ustalenie wartości właściwości realnych obiektów podlegających porównaniu i wymianie. W tym celu właściwości te porównuje się z właściwościami przyjętych wzorców, ustala się granice, w których właściwości te leżą na skutek błędów pomiarowych. Pomiary praktyczne obejmują więc przyjęcie wzorców, porównanie ich właściwości z właściwościami obiektów badanych, ustalenie prawdopodobnych granic popełnianych przy tym błędów i metody ich liczenia.

Pomiary stanowiły podstawę rachunków międzyludzkich i tak wrastały w nasze praktyczne życie, że nie widzieliśmy potrzeby tworzenia ich ogólnej nadbudowy teoretycznej, a tym samym rozwiązywania problemów podstawowych nauki o mierzeniu. Nie można chyba zapomnieć o tej nagromadzonej wielopokoleniowej wiedzy empirycznej miernictwa.

Nauka o pomiarach, metrologia, musi spełniać nieco inne zadania. Jak każda nauka zajmuje się nie obiektami materialnymi, lecz abstrakcjami obejmującymi całe klasy właściwości obiektów. Metrologia jest nauką stosunkowo młodą, rodzącą się na naszych oczach. Jej istotą jest teoretyczne, głównie matematyczne, ustalenie zasad całego miernictwa, bez ograniczenia się do opisu konkretnych jego części [1-5].

Jesteśmy w XXI wieku, gdzie technika i technologia oparte będą również na przepływie informacji, a nie jak dotąd, tylko energii. Ta jakościowa zmiana pociąga za sobą rzeczową i metodologiczną zmianę w wielu naukach. Jakościowa i ilościowa zmiana dopływającej informacji z otaczającego nas świata w nowym świetle stawia dotychczasowe problemy oraz wymusza tworzenie nowych koncepcji. Te nowe sytuacje wymagają rozwoju badań o charakterze interdyscyplinarnym. Do takich należy metrologia.

Życie codzienne uświadamia nam, że otacza nas świat realny, materialny od nas niezależny, który jest dla nas obiektem poznania. Nasza świadomość odwzorowuje ten świat w postaci słów i zdań, obrazów, liczb i tym podobnych abstrakcji

stworzonych przez nas samych, jako odbiorców procesu poznawczego. Ten fakt uświadamia nam, że musi istnieć ogniwo, tłumaczące materialną rzeczywistość na abstrakcję obrazów naszej świadomości.

Metodami poznawczymi mogą być obserwacje życia codziennego, w których zmysły wyzyskane są jako środki poznania. To my jesteśmy zespołem narzędzi poznania jak i odbiorcą wyników ich pracy. Ten dualizm ukazuje nam słabość bezpośredniej obserwacji jako metody poznawczej, ponieważ wyniki jej zależą w istotny sposób od indywidualnych cech obserwatora.

Metrologia należy do nauk poznawczych, stworzonych w celu uzyskania w świadomości człowieka obrazu otaczającego go świata. Jak w każdej gałęzi nauki, proces poznawczy przebiega co najmniej przez dwa ogniwa: przedmiot poznania i odbiorcę wyników procesu poznawczego. Przedmiotem poznania jest otaczający nas świat zbudowany z rzeczy martwych i wypełniony istotami żywymi. Na podstawie doświadczenia życia codziennego przyjmujemy, że świat ten jest realny, od nas niezależny.

Chwilowym stanom rzeczy i istot odpowiadają określone stany energetyczne otaczających je pól elektrycznych, cieplnych, optycznych i innych. W procesie poznawczym czerpiemy informacje o obiektach tego świata za pomocą sygnałów powstających przy zmianach tych pól [6-9].

Często w rozważaniach pojawia się pytanie: jakie metody i środki i kiedy mogą być wykorzystane do tworzenia naukowego poglądu na świat? Nauka jest to zbiór twierdzeń prawdziwych lub aktualnie powszechnie za prawdziwe uważanych, sprawdzonych doświadczalnie. Czy więc wyniki obserwacji bezpośredniej spełniają warunek powszechności, czy sprawdzalności doświadczalnej? Nie możemy udowodnić prawdziwości naszych poglądów na świat; możemy jedynie przyjąć aktualnie najprawdopodobniejszy stan ich interpretacji.

Metrologia w procesie swojego ciągłego rozwoju odkrywa nowe problemy pomiarowe, a nawet nieznane dotychczas zagadnienia poznawcze. Każde takie odkrycie prowadzi do powstania nowego kierunku. Oprócz tradycyjnych działań metrologii jak: podstawy metrologii, wzorce, metody pomiarowe, obróbka danych pomiarowych w celu znajdowania błędów, pojawiają się działy nowe jak: miernictwo stochastyczne, rozpoznawanie obrazów, technika systemów pomiarowych i wiele innych. Szczególne zainteresowania i doświadczenia autora obejmują metody nieinwazyjnej metrologii optycznej, fotonicznej i nanometrologii obiektów złożonych, w tym m.in. problematykę pomiarów wielkości cząstek ośrodków dyspersyjnych metodami optycznymi [10-17], w tym hybrydowe metody w opisie

transmitancji światła w warunkach rozproszenia wielokrotnego dla monodispersyjnego rozkładu wielkości cząstek [18, 19] oraz metody inwersyjne wykorzystujące sztuczną sieć neuronową w turbidymetrii spektralnej [20], wykorzystanie spektralnych i polaryzacyjnych właściwości laserowego promieniowania rozproszonego w nieinwazyjnym badaniu materiałów kompozytowych [21-23], nieinwazyjną diagnostykę parametrów optycznych i właściwości rozproszonych pełnej krwi i erytrocytów [24], modelowania matematycznego rozproszenia światła przez cząstki niesferyczne i ich agregaty [25-27], modelowania i symulacji matematycznych przepływów wielofazowych, modelowania matematycznego trójwiązkowej anemometrii dopplerowskiej w określaniu położenia i prędkości cząstek w ośrodkach wielofazowych [28], a także nieinwazyjny pomiar *in situ* średnicy homogenicznych i niehomogenicznych, przezroczystych włókien wykorzystywanych m.in. w materiałach kompozytowych i jako światłowody telekomunikacyjne i pomiarowe [29-31].

Ten proces wewnętrzny zróżnicowania się metrologii sprawia wrażenie, że metrologia jako całość nie istnieje. Taki sposób postrzegania jest powierzchowny. Metrologia nie tylko różnicuje się i specjalizuje, ale również integruje poszczególne wąsko wyspecjalizowane swoje działy w ramach koncepcji ogólniejszych. Wynika to stąd, że za bardziej szczegółową analizą rzeczywistości postępuje pełniejsza synteza pojęciowa. Fakt ten umacnia charakter poznawczy metrologii.

Istotnym w metrologii jest to, że modele fizyczny i matematyczny są tylko hipotezami tak długo, aż zostaną zweryfikowane doświadczalnie, co ostatecznie dokonywane jest za pomocą pomiarów; wtedy stają się twierdzeniami i prawami. W swoim procesie poznawczym metrologia posługuje się analizą i syntezą w dziedzinie abstrakcji na obrazach rzeczywistości wyrażonych przez modele fizyczny i matematyczny. To właśnie na tych modelach zauważamy przykłady analogii „formalnych” między różnymi od strony zjawiskowej zagadnieniami, a podobnymi od strony pojęciowej.

Taki sposób myślenia leży u podstaw działalności metrologii, w której zagadnienia modelowania fizycznego rzeczywistych zjawisk dają się opisać za pomocą pojęć materii, energii (entropii), czasu i informacji (negentropii). Głównym celem metrologii jest przekształcenie modeli fizycznych zbudowanych z pojęć materii, energii, czasu, w modele metrologiczne i doświadczalna weryfikacja ich poprawności, w których to modele fizyczne uzupełniane są pojęciami informacji, tak by dostarczały wiadomości jakościowych (obserwacja) i ilościowych (pomiar). Podstawowy schemat działania metrologii odpowiada schematowi procesu poznawczego stanowiącego połączenia badanego obiektu, będącego celem poznania, z

jego modelem fizycznym i modelami matematycznymi i metrologicznymi, pomiędzy którymi występują sprzężenia zwrotne, stanowiące odzwierciedlenie procesów weryfikacyjnych poszczególnych modeli [32, 33].

Droga powstania modelu fizycznego i matematycznego badanego zjawiska może mieć charakter:

- dedukcyjny, pozwalający poznać logiczne związki przyczynowo-skutkowe właściwości danego obiektu;
- indukcyjny, gdzie eksperyment może być podstawą uogólnionej hipotezy o cechach analogicznych do wnioskowania dedukcyjnego wyróżniającego dane zjawisko.

Weryfikacja modeli ma w fizyce zawsze charakter doświadczalny z tym jednak, że sprawdzenie doświadczalne w określonym przypadku nie jest jeszcze dowodem prawdziwości, a ujemny wynik weryfikacji doświadczalnej, nawet w pojedynczym przypadku, falsyfikuje hipotezę.

Metrologia jak każda samodzielna dyscyplina nauki ma swoje problemy podstawowe tj. takie zagadnienia, bez rozwiązywania których nie mogłaby być nauką i rozwijać się. Do problemów tych należy przede wszystkim tworzenie schematów zastępczych rzeczywistości, jej modeli formalnych, odtwarzających rzeczywistość ze znanym i wystarczającym przybliżeniem. Modele te winna charakteryzować jasność i przystępność pozwalająca na doświadczalne sprawdzenie poprawności odtworzenia przez nie rzeczywistości, jak i pomiarowe ustalenie konkretnych wartości ich elementów.

Metrologia to rezultat przekształceń łączących w sobie wątki naukowe wielu istniejących dyscyplin teoretycznych jak i nauk inżynierskich.

Dowodem odrębności dziedziny jaką jest metrologia są:

- instytucje programowo nastawione na uprawianie tej dyscypliny,
- nowo powstające czasopisma, wydawnictwa, towarzystwa naukowe związane z pomiarami,
- zawiązana wspólnota ludzi nauki uprawiających tę dyscyplinę,
- określona problematyka i tematyka zbudowana na bazie teorii poznania z wynikającymi dla niej metodami i technikami badawczymi,
- fascynacja dziedziną i napływ nowych adeptów jak i specjalistów z innych dziedzin.

Warunki określające status metrologii jako dziedziny nauki nie mogą być spełnione od razu, nie stanowią więc one obecnie zamkniętego zbioru. Warunki te kształtują się w czasie trwania rozwoju dyscypliny, ulegają one modyfikacji bądź

to na skutek nowo powstałych teorii, bądź też przeniesienia i wykorzystania schematów myślowych z innych dziedzin.

Interdyscyplinarny charakter metrologii wymaga czynnika integrującego zagadnienia wywodzące się z odrębnych dziedzin. Czynnikiem tym jest język opisu, podający związki jednoznacznie definiowane za pomocą prostych formuł [9, 34].

Krótko mówiąc miernictwo jest techniką wartościowania naszych spostrzeżeń świata materialnego, metrologia natomiast jest nauką o zasadach tego wartościowania. Chcąc mówić o pomiarach, trzeba wyodrębnić dziedzinę, w której mają być stosowane; mając mówić o metrologii trzeba określić prawa nauki i cele postrzegania, obserwacji oraz możliwości i potrzeby poznawania otaczającego świata. W obu przypadkach podmiotem jest człowiek, przedmiotem właściwości otaczającego świata. Ostatecznie zatem właściwości człowieka warunkują użyteczność wyników pomiarów i wyników dociekań metrologii.

Ostatnio coraz większą część działalności człowieka w pomiarach przejmują coraz to doskonalsze przyrządy i systemy pomiarowe; w metrologii natomiast człowieka uzupełniają urządzenia informacyjne [35]. Procesy te zmieniają szybko tworzywo i treść dotychczasowego mierzenia jak i zakres dotychczasowej metrologii. Znacznie trwalszy jest udział człowieka tak w technice pomiarowej jak i w nauce o mierzeniu, w metrologii. Od niego więc trzeba zacząć przy omawianiu zasad pomiarów.

Dlatego na początek rozważań omówmy jak postrzegamy rzeczywistość.

2. Postrzegana rzeczywistość

Obraz świata, który każdy z nas tworzy w swojej świadomości nie jest tym ostatecznym, bowiem nie jest on dany nam w sposób bezpośredni, a tworzony jest stopniowo w długim okresie czasu na podstawie naszych subiektywnych przeżyć. Przeżyciami tymi są nasze doświadczenia, na które składa się szereg czynników takich jak: nasza osobowość, inteligencja, sposób postrzegania, sposób przyjmowania i interpretowania informacji itp. Uplywający czas i nowe nasze doświadczenie zmieniają postrzegany przez nas obraz świata. Ta „absolutna” rzeczywistość o świecie jest przedmiotem poznania, który my, przy niedoskonałości swoich zmysłów, budujemy w naszej świadomości.

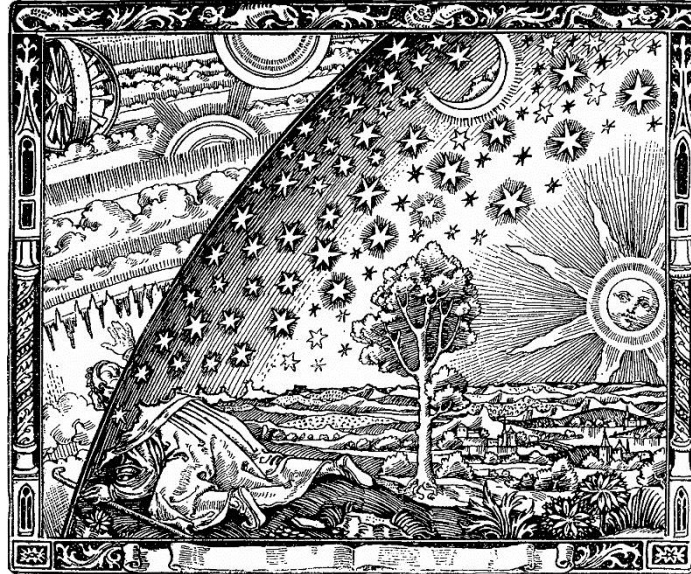
Proces tego budowania to nic innego jak proces poznawczy. W procesie tym dokonujemy przyporządkowania rzeczywistym właściwościom obiektów (zjawisk) abstrakcyjne symbole – najczęściej matematyczne. Ten sposób przyporządkowania stanowi różnicę pomiędzy myśleniem naukowym, a codziennym, wynikającą nie ze swego charakteru, lecz swej kompletności. Wiedząc, że jesteśmy zespołem środków poznania oraz odbiorcą i interpretatorem jego wyników stawiamy sobie pytanie, jaka jest ta rzeczywistość, którą poszukujemy, jeżeli budowana jest ona na wrażeniach zmysłowych i zaprezentowana (zinterpretowana) w sposób osobniczo-subiektywny. Można tu przyjąć, że rzeczywistość zbudowana na wrażeniach zmysłowych jest tą rzeczywistością zmysłową, na której budowane są nauki ścisłe.

Jak w tworzeniu nauki eliminować ten element interpretatorski, który jest subiektywny i rzadko powtarzalny, bowiem każdy wynik obserwacji nie spełnia warunku powszechności? Jak w tworzeniu nauki rozumieć więc jej cel, którym jest osiągnięcie wiedzy obiektywnej?

W metrologii mamy do czynienia z tymi wrażeniami zmysłowymi, które można przedstawić w sposób ilościowy. Istotnym w metrologii jest to, że dowolność interpretatorską jak i upływający czas można eliminować poprzez wskazanie pewnych „poziomów” odniesienia wspólnych dla obserwatorów i niezależnych od nich. Te poziomy to wielkości (zjawiska) uznane za wzorcowe. Czy znalezienie wzorców (zjawisk powtarzalnych itp.) wprowadza porządek i prawidłowość w tak olbrzymiej różnorodności przeżyć wynikających z różnych dziedzin świata zmysłów?

Czy te wzorce to realne elementy tworzące ten świat? Czy sposoby komparacji, spełniające szereg wymogów co do stacjonarności komparacji, dokładności etc. są obiektywne? I tak w tej zawiłej i długiej drodze mnożą się tego typu pytania. Wraz z doskonaleniem środków poznania część z nich eliminuje się, ale jesteśmy świadomi, że pojawiają się nowe. Istotnym jest w tym fakt, że człowiek będący głównym obserwatorem kieruje się w procesie poznania ciekawością, dociekliwością, zdumieniem, które to elementy wyzwalają żądzę poznania.

To człowiek stawia sobie za zadanie stworzenie obrazu świata nie wymagającego żadnych udoskonaleń i przedstawiającego ostateczną jego realność. Ten mechanizm kieruje procesem postępu i ciągłym usubtelnianiem obrazu świata. Bogacąc i doskonaląc obraz świata mamy świadomość ograniczoności tego, że cel ten można osiągnąć, albo przynajmniej udowodnić, że został on osiągnięty. Jestem przekonany, że żądza poznania nie pozwala nam zwątpić w to, że doskonalenie obrazu świata idzie w parze z poznaniem świata realnego.



Ryt przedstawiający obserwatora, odkrywającego piękno Wszechświata ponad firmamentem (C. Flammarion, 1888), jest metaforyczną ilustracją nieustannej ciekawości, dociekliwości i zdumienia człowieka, wyzwających żądzę poznania w procesie poznawczym.

Jak widzimy, to u podstaw poszukiwań naukowych leży idea oparcia ich na czymś, co byłoby ostateczną rzeczywistością, która wymyka się pełnemu poznaniu. I chyba ten realny świat jest zawsze celem dla coraz to doskonalszych metod pracy naukowej. Wynika stąd wniosek, że i metrologia należy do nauk poznawczych i przenika w sposób ciągły w inne gałęzie nauki, tworząc tym samym problemy interdyscyplinarne. Wkracza ona w dziedzinę fizyki, fizjologii, psychologii i filozofii. Jest to chyba zjawisko naturalne, bowiem ostatecznym ogniwem procesu pomiarowego jest zawsze człowiek, a metrologia nie może istnieć bez metrologów.

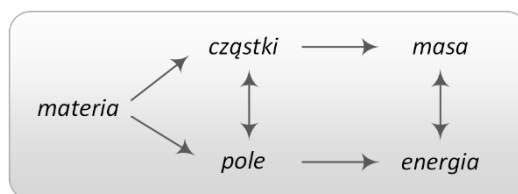
To, co wyodrębnia metrologię od innych gałęzi nauki to specyficzny sposób modelowania przez nią rzeczywistości – i to chyba jest ta jej swoistość. Rozwój metrologii stawia przed człowiekiem pytanie o możliwości techniczne i teoretyczne modelowania otaczającej go rzeczywistości, tej martwej i żywej materii.

3. Opis cech materii

Otoczająca nas rzeczywistość to materia, cząstki, atomy i molekuly, z których zbudowane są ciała martwe jak i organizmy żywe. Osiągnięcia fizyki atomowej, jądrowej i kwantowej w istotny sposób zmieniły pojęcia o budowie materii. Dziś cząstki elementarne nie są uważane za ściśle elementarne, mogą okazać się czymś złożonym. Te elementarne cząstki można dzisiaj zaszeregować w grupy: leptony, nukleony, hiperony i mezony. Wzajemne współdziałanie między cząstkami tworzy złożoność struktury świata.

Są to oddziaływania jądrowe, elektromagnetyczne i słabe. Obowiązują w nich zasady zachowania ładunku, liczby cząstek ciężkich, energii, pędu, spinu. Oddziaływanie cząstek na siebie jak i na inne cząstki dokonujące się za pośrednictwem wytworzonego przez siebie pola (elektromagnetycznego, nukleonowego, mezo-nowego) wiąże się z pewną energią zgodnie z równaniem Einsteina, a więc i z pewną masą. W myśl teorii Lorenza zarówno energia jak i masa cząstki w ruchu będzie odpowiednio większa od masy cząstek będących w bezruchu. Wzór Einsteina oznacza, że masa i energia są równoważne i mogą przechodzić jedna w drugą. Stąd cząstka wypromieniowująca energię traci równocześnie wskutek tego masę. Ten fakt pozwala zrozumieć materialną istotę promieniowania.

W teorii kwantów promieniowanie posiada strukturę cząsteczkową, rozchodzi się w przestrzeni w postaci fotonów o energii $h\nu$, gdzie h – stała Plancka, ν – częstość. Wprowadzenie przez de Broglie'a teorii ruchu falowego do mechaniki kwantowej pozwoliło przyporządkować każdej cząstce określone zjawisko falowe. E. Schrödinger wykorzystał te cechy kwantowo-falowe do określenia stanu kwantowego elektronów w atomie, a tym samym ukazał możliwość określenia parametrów ruchu elektronów w dowolnym miejscu pola. Powyżej zasygnalizowane relacje można obrazowo przedstawić następującym schematem:



będącym strukturalną prezentacją otaczającej nas rzeczywistości. Jeżeli uświadomimy sobie, że pomiędzy poszczególnymi elementami tego schematu występują

określone relacje zapisane już znanymi prawami teorii klasycznej, jak również teorii kwantowej, to ta rzeczywistość, którą postrzegamy bezpośrednio i którą zapisaliśmy w sposób deterministyczny wymyka się nam w sposób nie zawsze dla nas zrozumiały. Przyczyną tego jest fakt, że obiekty postrzeganej przez nas rzeczywistości występują w postaci cząstek i pól; cząstki opisujemy trzema współrzędnymi i trzema pędami, natomiast pola nieskończoną liczbą parametrów (nieskończoną liczbą stopni swobody).

Mamy też świadomość tego, że rozróżnienie między cząstką i falą istnieje raczej w sposobie obserwacji i opisu przyjętego modelu matematycznego niż w samej cząstce czy fali. To dualne ujęcie materii dobrze tłumaczy wiele faktów tworzonych przez nas modeli abstrakcji otaczającej nas rzeczywistości. Układ współzależnych pól i cząstek w otaczającej nas rzeczywistości nie może trwać w określonej stabilności. Przykład takiej niestabilności prześledzimy na zjawisku promieniowania ciała doskonale czarnego.

W zakresie promieniowania widzialnego, w którym to my obserwujemy rzeczywistość, różne długości fali odbierane są jako różne barwy. Pod koniec XIX wieku uwagę uczonych zwróciło tzw. ciało doskonale czarne – ciało całkowicie pochłaniające padające na nie promieniowanie. Wskutek wielokrotnego odbicia na częściowo pochłaniających i rozpraszających ściankach „wnęki” obserwator zewnętrzny nie zaobserwuje wydostającego się z wnętrza światła i odniesie wrażenie „absolutnej” czerni.

Po podgrzaniu tak skonstruowanej „wnęki”, jej ścianki zaczną promieniować. To właśnie promieniowanie nazywamy promieniowaniem ciała doskonale czarnego. Badanie empiryczne ilości energii emitowanego ciała doskonale czarnego zapoczątkowano w 1879 roku, kiedy to D. Stefan na podstawie analizy danych empirycznych sformułował tezę, że całkowita zdolność emisyjna dowolnego ciała jest proporcjonalna do czwartej potęgi jego temperatury bezwzględnej.

W 1884 roku L. Boltzmann stosując metody termodynamiki udowodnił, że teza ta jest prawdziwa. W wyniku tego powstało prawo Stefana-Boltzmanna oraz określono w wyniku wielu doświadczeń współczynnik $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ zwany stałą Stefana-Boltzmanna.

W dalszych naszych rozważaniach rozpatrzemy rozkład widmowy promieniowania ciała doskonale czarnego, czyli przeanalizujemy właściwości funkcji Kirchhoffa.

Funkcje te są krzywymi empirycznymi, które opisał Kirchhoff. Rozkład ten próbowano odtworzyć w teorii klasycznej. Model taki przedstawili Rayleigh i Jeans.

W swoich rozważaniach założyli, że ścianki naczynia, w którym zamknięte jest promieniowanie składają się z oscylatorów (elementów materii), które w sposób ciągły pochłaniają i emitują to promieniowanie, pozostając z nim w stanie równowagi termodynamicznej. Każdy oscylator ma przyporządkowaną sobie falę o określonej długości i polaryzacji, reprezentuje więc jeden stopień swobody układu. W myśl zasady ekwipartycji energii określili oni, jaka część energii przypada na jeden oscylator, a następnie wyznaczyli zdolność emisyjną ciała doskonale czarnego:

$$\varepsilon_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT \quad (3.1)$$

Tak uzyskany model był zgodny z danymi eksperymentu w obszarze małych częstości promieniowania ν . Wyrażenie (3.1) pokazuje nam monotoniczny charakter zmian emisyjności ciała w funkcji częstości, co wskazuje, że całkowita zdolność emisyjna ciała doskonale czarnego dąży do nieskończoności. Ten to fakt pokazał, że stosowanie zasad fizyki klasycznej w badaniach rozkładu widmowego ciała doskonale czarnego daje wyniki sprzeczne z zasadą zachowania energii. Wyjaśnienie tego zjawiska przedstawił 14 grudnia 1900 na posiedzeniu Niemieckiego Towarzystwa Fizycznego Max Planck. Zaproponowany, a następnie wyprowadzony wzór:

$$\varepsilon_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (3.2)$$

poprawnie opisuje wyniki doświadczalne. Wprowadzając go Planck zrobił założenie, że promieniujące elementy materii – nazywane wówczas oscylatorami – mają swoje charakterystyczne częstości drgań ν , że oscylator może pochłaniać lub tracić energię tylko określonymi porcjami $h\nu$, gdzie h jest stałą Plancka. Ten grudniowy dzień w roku 1900 stał się dniem narodzin fizyki kwantowej.

To wydarzenie ukazuje nam, że struktura cząstkowo-polowa materii pozwala na dokładniejsze poznanie właściwości materii, jej indywidualności i różnorodności. Prawo Plancka utworowało drogę dalszym odkryciom praw kwantowych, szczególnie bohrowskiemu modelowi atomu oraz einsteinowskiemu pojęciu fotonu, jako kwantu promieniowania elektromagnetycznego.

Te fakty uświadamiają nam, że atom we wszystkich stanach kwantowych poza stanem podstawowym jest układem nietrwałym, który może rozpaść się na atom o niższym stanie energetycznym oraz foton zmierzając do stanu podstawowo-

wego. Istotnym z punktu widzenia pomiaru jest tutaj problem czasu, jakim dysponujemy w stanie nietrwałym. Czas ten jest ograniczony i jest rzędu średniego czasu życia układu w tym stanie. Istotnym jest, że chcąc mieć pewność, że układ znajduje się w stanie o ustalonej energii musielibyśmy go obserwować nieskończenie długo.

Stąd przy pomiarze energii popełniamy pewien błąd, jeżeli dokonujemy pomiarów w czasie skończonym. A takim czasem dysponujemy w układzie nietrwałym – oczywiście skończonym. Stąd masa stanu nietrwałego nie może być, z przyczyn zasadniczych, określona w sposób dokładny. Tylko stan podstawowy zapewnia dokładny pomiar energii (masy).

4. Zasada przyczynowości

Zasada przyczynowości określa nam relację pomiędzy przyczyną działającą na obiekt w dokładnie określonym stanie, a skutkiem powiązany z tym jednoznacznie z tą przyczyną. Ta jednoznaczność pozwala nam nie tylko przewidywać stany przyszłe obiektu fizycznego, ale również rekonstruować przeszłość.

W ujęciu ogólnym zasada przyczynowości wyraża pogląd, że w otaczającej nas rzeczywistości panuje określony porządek. Znaczący to, że nic nie dzieje się bez przyczyny, jak również to, że określonym przyczynom towarzyszą określone skutki. Pierwsza myśl odnosi się do przyrody, w której nie ma zjawisk izolowanych i dotyczy materii ożywionej i nieożywionej. Druga myśl dotyczy tylko materii nieożywionej w skali makroskopowej.

Mówiąc o przyczynowości, zawsze nasuwa się pytanie: czy związek przyczynowy jest czymś absolutnym, nienaruszalnym?

Jak było dawniej?

„Według Rene Descartes'a, którego często się nazywa ojcem nowoczesnej filozofii, Bóg stworzył wszystkie prawa natury i ducha na mocy swej własnej decyzji, zgodnie z celami tak wzniosłymi, że umysł ludzki nie jest zdolny pojąć ich w pełni. Dlatego też z punktu widzenia systemu Descartes'a istnienie cudów i tajemnic nie jest bynajmniej wykluczone.

W przeciwieństwie do tego Bóg Barucha Spinozy jest Bogiem harmonii i porządku, przenika cały świat, tak że samo prawo powszechnego związku przyczynowego należy uważać za boskie, a więc za wszechobjemujące i absolutnie nienaruszalne. Dlatego też w świecie Spinozy nie ma żadnego przypadku ani cudu.



Czy związek przyczynowy jest czymś absolutnym, nienaruszalnym?

*Według Gottfrieda Wilhelma Leibniza, Bóg zbudował pierwotnie cały świat zgodnie z jednolitym planem, odpowiadającym jego najwyższej mądrości i z góry raz na zawsze podporządkował każdą poszczególną rzecz swoistym prawom, które nią rządzą, tak że de facto zachowuje się ona i rozwija w sposób niezależny od wszystkich pozostałych rzeczy – zgodnie tylko z własną istotą. Dlatego też u Leibniza wzajemne oddziaływanie między dwiema rzeczami jest tylko pozorne. – Jak widzimy: ilu filozofów, tyle teorii. Tą drogą naprawdę nie można daleko zajść.”**

Czym są więc prawa przyczynowe? Jak wiemy zasada przyczynowości stwierdza ogólnie o przyczynie i skutku, natomiast prawa określają cechy reakcji skutku i przyczyny ze szczególnym określeniem co za skutek i przyczynę rozpatrujemy, np. rzecz, właściwość materii, zdarzenia.

Warunek ten ukazuje nam, że prawa przyczynowe w różnych naukach są odrębne. Jakie one są w metrologii? Myślę, że każdy pomiarowiec, przyczynowość pojmuje w kontekście określonego stanu układu (obiektu, pola zjawiska) w danej chwili z uwzględnieniem czynników wpływających, który to stan w następstwie chwili zmienia się w inny stan tegoż układu. Stan poprzedni układu wraz z czynnikami wpływającymi jest przyczyną, stan późniejszy – skutkiem.

Tak podana definicja może być w wielu przypadkach zbyt ogólnikowa. Uświadamiamy sobie, że w świecie realnym nie może być zupełnych powtórzeń, bowiem zjawiska przyrody są nieodwracalne, zgodnie z drugą zasadą termodynamiki. Przyczynowość w tym znaczeniu klasycznym nazywana jest jednoznaczna. To ona występuje w stosowanych przez fizykę klasycznych prawach Newtona,

* Max Planck, odczyt wygłoszony w Pruskiej Akademii Nauk 17 lutego 1923.

Maxwella itp. To dla tego rodzaju związków przyczynowych istnieje postulat ciągłości procesów przyrody w czasie i przestrzeni.

Jak ta przyczynowość wygląda w pojęciach fizyki współczesnej tj. w fizyce atomowej, mechanice kwantowej? Traci ona sens w stosunku do indywidualnych zdarzeń atomowych, zachowując jednak ograniczoną, w znaczeniu statystycznym ważność dla zjawisk zbiorowych, w których uczestniczy wielka ilość jednakowych składników świata atomowego.

Znamienną jest tu myśl, którą J. V. Neumann podał w swoim dziele *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*: „niemożliwe jest sprowadzenie przewidywania procesów atomowych do jednoznaczności bez naruszenia podstaw mechaniki kwantowej; jak również zawarł w nim myśl, że obecnie nie ma powodu ani usprawiedliwienia, abyśmy mówili o przyczynowości w naturze, żadne bowiem doświadczenie nie stwierdza jej istnienia: makroskopowe doświadczenia są do tego celu zasadniczo nieprzydatne, jedna zaś znana teoria, która jest w zgodzie z naszymi doświadczeniami nad procesami elementarnymi, mianowicie mechanika kwantowa jej przeczy”.

Problem przyczynowości jest tematem licznych dyskusji od kilku stuleci. Dyskusje te ożywiły się z chwilą powstania mechaniki kwantowej. Zasada przyczynowości była poddana ostrej krytyce przez wielu filozofów (Hume, Mili, Wittgenstein...), a głównym argumentem było twierdzenie, że nie można poznać związku przyczynowego między przyczyną i skutkiem, lecz jedynie można stwierdzić następstwo czasowe skutku po przyczynie.

Mówiąc o przyczynowości zwykle utożsamiamy to z determinizmem mechaniki klasycznej. Mówiąc o zjawiskach kwantowych twierdzimy, że przyczynowość traci swój sens. Czy jest to prawdziwe? Czy funkcja falowa w mechanice kwantowej nie podlega prawom deterministycznym? Chyba trzeba przyjąć, że przy przejściu z mechaniki klasycznej do mechaniki kwantowej przyczynowość zmienia swoje znaczenie. To nowe rozumienie przyczynowości wyrażone jest rozróżnieniem między przyczynowością jednoznaczną i wieloznaczną.

Zgodnie z zasadą przyczynowości jednoznacznej zawsze z A wynika B . W przypadku przyczynowości wieloznaczej z A wynika $B1$ z prawdopodobieństwem $P1$, lub $B2$ z prawdopodobieństwem $P2$ lub $B3$ z prawdopodobieństwem $P3$... itd., przy czym suma wszystkich prawdopodobieństw, $P1 + P2 + P3 + \dots$, musi być równa jedności. Jak możemy zauważyć, przyczynowość zarówno jednoznaczna jak i wieloznaczna, sprowadza się do żądania ażeby stan układu materialnego był związany ze stanem bezpośrednio poprzedzającym czy to na mocy konieczności,

czy prawdopodobieństwa; to następstwo stanów nie przeszkadza w łączeniu się poszczególnych układów w całości hierarchiczne.

Mechanika kwantowa ustanawia między częściami składowymi układu atomowego związek bardziej wielostronny i ścisły, aniżeli fizyka klasyczna. Całość układu jest nadrzędna do samych części, o czym świadczy równanie, w którym funkcja stanu reprezentuje cały układ i służy do opisu wszystkich jego właściwości. Istotnym jest to, że w mechanice kwantowej stan układu nie jest opisany modelem matematycznym, który określałby go w sposób jednoznaczny, lecz opisany jest wyrażeniem ukazującym probabilistyczną charakterystykę rozważanego układu.

5. Determinizm i indeterminizm

Nieustający rozwój nauk obejmujący większość zjawisk fizycznych, chemicznych i biologicznych wciąga nas w skomplikowaną sieć przyczyn i skutków sięgających nie tylko Ziemi, ale już przestrzeni kosmicznej i Wszechświata. Ten fakt wyzwała w nas uczucie zwątpienia, czy to co poznaliśmy i to co robimy w pełni rozumiemy? Czy pojęcia energii, materii, czasu, przestrzeni itp. są tymi samymi pojęciami, które poznawaliśmy ucząc się mechaniki klasycznej? Pomocnym w wyjaśnieniu tego jest pogląd deterministyczny oraz indeterministyczny, które są nierozłączne w tworzonych od wieków koncepcjach świata. Mamy świadomość, że pojęcia te należą do filozofii. Czy można daną dziedzinę nauki łączyć z filozofią oraz czy można rozwijać naukę bez filozofii [36]?

Akceptując taki pogląd prześledźmy jak kształtowały się deterministyczne i indeterministyczne koncepcje świata pod wpływem rozwoju nauki. Determinizm jest poglądem zakładającym we wszechświecie określoną zależność stanów późniejszych od poprzedzających go stanów wcześniej. Ta maksyma stanowi podstawę formułowania teorii fizycznych, chemicznych, socjologicznych itp. gdzie postulowane jest jednoznaczne przewidywanie zjawisk i to zarówno w sensie poznawczym jak i metodologicznym. To u podstaw determinizmu leży przekonanie o istnieniu ścisłych i powszechnych praw rzeczywistości. Z dziejów znamy, że ta rzeczywistość determinowana jest przez bogów. W średniowieczu analizowano przyczynową zależność bytów od siebie i wskazywano wzajemne ich relacje. To ze średniowiecza pochodzą koncepcje, że zjawiska wszelkiego typu są ściśle ze sobą powiązane przyczynowo i tak zależne, że przyjęto w świecie brak wolności, a w przypadku człowieka odpowiedzialności.

Czasy nowożytne, kiedy to deterministyczna koncepcja świata kształtowała się pod wpływem rozwoju nauk, utorowały drogę koncepcji, gdzie świat jest mechanizmem, w którym zdarzenia raz na zawsze ustalone dokonują się według zawsze obowiązujących praw. To w prawach Galileusza widzimy determinizm wynikający z obserwacji zjawisk wskazujących na istnienie praw przyczynowych. W tym to czasie R. Descartes zastępuje koncepcję mechanistyczną, dynamiczną koncepcją przyrody, w której ciała ulegają zmianom mechanicznym pod wpływem zewnętrznych oddziaływań.

B. Spinoza teorią powszechnego porządku przyrody, gdzie mogą istnieć tylko układy przyczynowo-skutkowe, eliminował przypadek i wolność z otaczającej rzeczywistości, która jest mechanizmem, a człowiek i jego działania tworem mechanicznie rozwijającego się otoczenia. Ten deterministyczny pogląd potwierdzali swoimi wywodami B. Pascal, P. S. Laplace, I. Newton, I. Kant, G. W. F. Hegel, J. Lachelier stwarzając tym samym deterministyczną koncepcję świata, którą można również opisywać sferę psychiczną człowieka.

To J. F. Herbert twierdził, że psychiczne życie człowieka jest tworem wzajemnie oddziaływujących elementów określonych przez prawa, a osiągnięcia człowieka (jego odkrycia), to twory materialne podlegające zdeterminowanemu mechanizmowi wyobrażeń. W wieku dziewiętnastym, zdominowanym przez rozwój nauki, utrwalił się mechanistyczny model otaczającej rzeczywistości. J. Lachelier uważał, że przyroda byłaby całkowicie niezrozumiała, gdyby nie panował powszechny determinizm. To H. Spencer twierdził, że obserwowane zjawiska różnią się złożonością, a nie naturą, którą należy odczytywać w sposób mechanistyczny w relacjach materii, siły i ruchu.

Te i inne poglądy nie były przyjmowane bezkrytycznie. Reakcją na tak dynamiczny rozwój determinizmu były pojawiające się poglądy ograniczające jego zasięg, a niekiedy zgoła je odrzucające. Determinizm wg H. Bergsona należy odczytywać jako konstrukcję intelektualną, a otaczającą nas rzeczywistość jako samoistny i twórczy twór kierowany siłami wewnętrznymi, dla których to otaczająca bezwładna materia jest elementem hamującym.

Można przytoczyć tu różne punkty widzenia negacji np. Ch. Dumana, P. Ferriera, H. Reichenbacha, E. Macka; czy bardzo skrajne stanowisko B. Russella uznającego, że determinizm jest prymitywny i nienaukowy, a każda przyczyna może wywołać różne skutki. Fascynacja determinizmu jak i jego nieakceptacja przybierały różne formy i jak widzimy dyktowane były nowymi wynikami badań.

To badania świata mikrocząstek stanowiły tu przełomowy moment i dały początek rodzącego się indeterminizmu, gdzie zasada przyczynowości i jej sposób

stosowania pozostał pod znakiem zapytania. Aby lepiej ukierunkować nasze rozważania i prowadzoną tu systematykę przypomnijmy, że ze względu na dziedzinę wyjściową wyróżniamy:

- determinizm przyrodniczy,
- determinizm filozoficzny,
- determinizm psychospołeczny,
- determinizm teologiczny.

To, czym się zajmujemy tworząc coraz to doskonalsze narzędzia pomiarowe, uzupełniające nasze zmysły w poznaniu otaczającej nas rzeczywistości, określa determinizm przyrodniczy, a w szczególności determinizm mechanistyczny, w myśl którego formułowano prawa fizyki klasycznej przyjmując, że w świecie panuje powszechna przyczynowość i stąd wszelkie zdarzenia mogą być przewidywalne w myśl stworzonych i zapisanych praw przyrody. To pod wpływem tych postulatów determinizmu powszechnego rozciągano je na świat biologii i socjologii, traktując tym samym życie jako nieprzerwany ciąg zjawisk opartych na mechanizmie podziału komórki, a istotę żywą jako maszynę fizyko-chemiczną.

Wracając do indeterminizmu poznajmy ważniejsze fakty z historii fizyki współczesnej, aby móc głębiej zastanowić się nad znaczeniem tak zasadniczej zmiany punktu widzenia. To N. Bohr, M. Planck, W. C. Heisenberg, Cz. Białobrzeski oraz P. A. M. Dirac w duchu indeterminizmu zinterpretowali nieprzydatność pojęć i praw mechaniki klasycznej do opisu zjawisk kwantowych. I tak:

- Bohr twierdził, że zasada determinizmu nie ma zastosowania w fizyce kwantowej, ponieważ cząstka elementarna nie jest ściśle zlokalizowana w czasie i przestrzeni, a tym samym nie może być określony jej stan początkowy, a tym bardziej następny.
- Planck utrzymywał, że światem mikrofizyki rządzą odrębne prawa, gdzie np. czas pozostawienia atomu w stanie stacjonarnym jest nieokreślony jak i nie można przewidzieć zmiany danego stanu.
- Heisenberg twierdził, że wyniki obserwacji nie pozwalają na wyznaczenie położenia i pędu cząstki niezależnie od błędów przypadkowych. To rozwój mechaniki kwantowej kwestionował zasady deterministycznego opisu zjawisk – bowiem jednoznaczne scharakteryzowanie układów mikroskopowych jest niemożliwe.

Aby zrozumieć tę zasadniczą zmianę punktu widzenia, która stała się niezbędna w fizyce współczesnej należy prześledzić ważniejsze fakty z mechaniki kwantowej.



*„Bóg nie tylko gra w kości, ale czasami rzuca je tam gdzie nie mogą być widziane”
(S. Hawking). Czy model Wszechświata według mechaniki kwantowej tłumaczy fundamen-
tenty budowy i funkcjonowania rzeczywistości?*

6. Zasada nieoznaczoności Heisenberga

Korpuskularno-falowa natura cząstek w mechanice kwantowej oraz statystyczny charakter funkcji falowej określającej położenie cząstki w przestrzeni rodzi wątpliwości i stawia pytanie, gdzie jest granica stosowalności pojęć fizyki klasycznej w mikroświecie.

Pytanie o stosowalności przyjętych pojęć nie jest niczym nowym w nowo tworzonej dziedzinie, bowiem w samej fizyce klasycznej znamy takie problemy. I tak np. temperatury jednej cząstki, czy punktowej lokalizacji w przypadku fali elektromagnetycznej.

Właściwości falowe mikrocząstek wprowadzają ograniczenia co do możliwości określenia równocześnie współrzędnych cząstki oraz jej pędu stosując klasyczne pojęcie pędu i położenia [37, 38].

W fizyce klasycznej można wykazać, że występowanie w przestrzeni Δx ciągu fal jest związane z faktem, że musi on zawierać fale o częstościach z określonego $\Delta \omega$ tzn. o liczbach falowych z przedziału Δk , a tym samym pomiędzy tymi wielkościami istnieje związek $\Delta x \cdot \Delta k \geq 1$. Zależność ta jest prawdziwa dla wszystkich zjawisk falowych, czyli również fali de Broglie'a cząstki poruszającej się wzdłuż osi x z pędem $p_x = \hbar k$. Stąd możemy zapisać:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar \quad (6.1)$$

Biorąc pod uwagę trójwymiarową przestrzeń, w której porusza się cząstka możemy zapisać:

$$\Delta y \cdot \Delta p_y \geq \hbar \quad (6.2)$$

$$\Delta z \cdot \Delta p_z \geq \hbar \quad (6.3)$$

Wyrażenia (6.1)–(6.3) opisują tzw. zasadę nieoznaczoności Heisenberga. Werner Heisenberg wykazał w sposób ogólny, że kwantowo-mechaniczny opis stanu cząstki nie może jednocześnie określać położenia i pędu cząstki. Zgodnie z mechaniką kwantową może istnieć stan odpowiadający określonemu pędowi cząstki, ale jej położenie będzie wówczas nieokreślone. I odwrotnie, gdy kwantowy opis cząstki zawiera informację o określonym położeniu cząstki, wówczas nie może on zawierać informacji o określonym pędzie.

W stanach pośrednich, gdzie położenie jest określone przedziałem Δx i pęd Δp , związkiem łączącym te wielkości jest zależność (6.1).

Zasada nieoznaczoności w mechanice kwantowej narzuca ograniczenie na możliwość opisu toru, po którym porusza się cząstka. W mechanice klasycznej poruszająca się cząstka ma określone w dowolnej chwili swoje współrzędne x , y , z oraz pęd p_x , p_y i p_z . Taki przypadek jest możliwy w mechanice kwantowej i dotyczy on przebywania cząstki w makroskopowej przestrzeni. Wówczas istnieje możliwość zarejestrowania cząstki na kliszy fotograficznej. Położenie elektronu ustalone jest z dokładnością wynikającą z liniowych rozmiarów ziarna emulsji fotograficznej ($\Delta x \approx 10^{-6}$ m). Stąd niedokładność określenia prędkości w myśl równania (6.1) wynosi $\Delta v = 10^2$ m/s. W praktyce rejestrowane są ślady prędkich elektronów, których prędkość v jest rzędu 10^6 m/s.

Błąd rejestracji torów takich elektronów jest rzędu 10^{-2} % więc w praktyce makroskopowej można mówić o ruchu elektronu po określonym torze z dokładnie znaną w każdym punkcie swego toru prędkością. Gdy ten ruch elektronu rozpatrujemy w atomie, gdzie $\Delta x = 10^{-10}$ m, to nieoznaczoność prędkości elektronu wówczas wynosi $\Delta v_x = 10^6$ m/s, co odpowiada realnym prędkościom elektronów, czyli $v \approx \Delta v_x$. Stąd nie można mówić o ruchu elektronu w atomie po ściśle określonym torze z dokładnie znaną prędkością w każdym jego punkcie. Zwróćmy uwagę, że dla obiektów makroskopowych, dla których właściwości falowe (fale de Broglie'a) nie ujawniają się, zasada nieoznaczoności nie odgrywa żadnej roli [39].

Zasada nieoznaczoności dotyczy nie tylko położenia i pędu. W formalizmie mechaniki kwantowej występują i inne pary tzw. wielkości kanonicznie sprzężone. Przykładem może być tu czas t i energia E , które spełniają zasadę nieoznaczoności:

$$\Delta t \cdot \Delta E \geq \hbar \quad (6.4)$$

W praktyce oznacza to, że na wykonanie jakiegokolwiek pomiaru w stanie nietrwałym mamy ograniczony czas – rzędu średniego czasu życia układu w tym stanie. Widzimy, że chcąc mieć pewność, że układ znajduje się w stanie o ustalonej energii winniśmy obserwować go nieskończenie długo. Podobnie chcąc przekonać się, że fala jest falą płaską winniśmy ją obserwować w całej nieskończonej przestrzeni.

Stany nietrwałe muszą więc charakteryzować się pewnym rozmyciem energii, które w ich układzie spoczynkowym odpowiada rozmyciu ich masy. Widzimy więc, że tylko stan podstawowy będzie stanem nierozmytym, natomiast wszystkie stany wzbudzone nie będą miały dokładnie określonej wartości energii. Stąd, też linie emitowane przez atom mają pewną naturalną szerokość, co oznacza, że zwiększając dokładność pomiaru nie uczynimy tą linię węższą.

7. Zagadnienie pomiaru w mikroświecie

Rozważania poprzedniego rozdziału ukazały nam raczej formalną stronę zasady nieoznaczoności. Jakie są zatem związki z rzeczywistością prowadzonymi doświadczeniami? Sam Heisenberg uważał, że zasada nieoznaczoności wyznacza doświadczalną granicę dokładności, z jaką można wykonywać równocześnie pomiary wielkości kanonicznie sprzężonych. Jego eksperymenty myślowe potwierdziły jego tezę [40].

Heisenberg wiązał ten fakt z przekonaniem, że żaden pomiar wykonany w mikroświecie nie może pominąć oddziaływania mierzonego obiektu z urządzeniem pomiarowym. W miernictwie wielkości fizyki klasycznej zagadnienie to minimalizowane jest drogą doskonalenia urządzeń pomiarowych, które ukazywane jest przez wnikliwszą analizę przyjętych modeli, czy to badanego zjawiska fizycznego, czy już skonstruowanego przyrządu pomiarowego. W świecie mikrofizyki ograniczenia pomiarowe nie wynikają z technicznej niedoskonałości przyrządów.

Mówiąc o pomiarze w mikroświecie winniśmy uzmysłowić sobie dwa fakty. Pierwszy – istnienie związków nieoznaczoności, który podsuwa nam wątpliwość świadomego stosowania pojęć fizyki klasycznej do opisu stanu mikroobiektów. Drugi – że przeprowadzane doświadczenia informujące nas o stanie mikroobiektów mają charakter makroskopowy (np. rejestracja drogi elektronu na kliszy foto-

graficznej), a tym samym muszą być one oparte o zasady tych teorii, które ją stworzyły tzn. mechanikę klasyczną, elektrodynamikę itp., a otrzymywane z nich informacje muszą być opisane pojęciami fizyki klasycznej.

Mamy świadomość, że proces oddziaływania urządzenia pomiarowego z badanym obiektem jest procesem obiektywnym. W przypadku oddziaływania z obiektem makroskopowym jest to oddziaływanie pomiędzy dwoma układami makroskopowymi, a w przypadku obiektów mikroskopowych w wyniku obiektywnie istniejącej dwoistości natury mikroobektów sama czynność wykonania pomiaru np. położenia mikrocząstki powoduje zmianę jego pędu.

Zmiany tej nie możemy technicznie zmierzyć, ale możemy ją wyznaczyć ze związku nieoznaczoności Heisenberga. Nie możemy, tym samym pominąć oddziaływania urządzenia pomiarowego na badany obiekt, czyli stosować pojęcia przedmiotu badanego w oderwaniu od badającego przedmiotu.

Wyniki pomiarów zależne są więc od obserwatora. Tej roli obserwatora i aparatury nie można było tak doceniać dopóki badania ograniczały się do skali makroskopowej. To badania w skali mikroskopowej ujawniły jej „zaskakującą” dla nas rolę [41].

Mechanika kwantowa nie może dostarczyć nam informacji, gdzie w przestrzeni znajduje się cząstka. Może natomiast za pomocą swojego formalizmu jakim jest równanie Schrödingera wyliczyć ewolucję czasową funkcji falowej cząstki w przestrzeni. Akt pomiaru zmienia funkcję falową w sposób nieciągły. Spośród wszystkich możliwych wartości dopuszczalnych przez funkcję falową, pomiar określa tę jedną możliwość, która rzeczywiście zachodzi [42, 43].

Ciekawa jest myśl, którą wypowiedział Heisenberg: *„Tak więc przejście od tego co możliwe do tego co rzeczywiste, dokonuje się podczas aktu obserwacji. Jeżeli chcemy opisać przebieg zdarzenia w świecie atomów, musimy zdać sobie sprawę z tego, że słowo ‘zachodzi’ może dotyczyć tylko aktu obserwacji, nie zaś sytuacji między dwiema obserwacjami”*.

Myślę, że każde zdarzenie zachodzące w rzeczywistości na skutek wpływu wielu wzajemnie oddziaływujących na siebie procesów, nie może być określone zupełnie ściśle. Dają się podporządkować wyidealizowane zdarzenia w fizycznym obrazie świata, odosobnione od otoczenia i uwolnione od nie dających się skontrolować wpływów czynników ubocznych.

Stąd jak widzimy w obrazie świata fizycznego są obecne nadto twory czysto umysłowe, nie występujące w realnym świecie jak np. układ współrzędnych kar-

tezjańskich. Tego rodzaju twór (model) odgrywa rolę pomocniczą. Wyniki rzeczywistych naszych obserwacji pomiarów wyrażamy w symbolach obrazu „przenosząc” go tym samym ze świata rzeczywistego do modelu. Następnie na tych symbolach dokonujemy operacji arytmetycznych w celu uzyskania możliwych następstw, wyniki wyrażone symbolicznie określają nam te wielkości, które obserwowaliśmy i mierzyliśmy.

To te rozważania tworzyły niekończące się dyskusje, które szukały odpowiedzi na pytanie, czy koncepcja fizycznego obrazu świata może ułatwić wyjście z sytuacji, jaka wytworzyła się wskutek odkrytej przez Heisenberga zasady nieoznaczoności. Wśród filozofów rodzą się pytania, czy nieoznaczoność Heisenberga ma charakter ontologiczny, tzn. cząstka sama w sobie po prostu nie ma jednoznacznie określonego równocześnie położenia i pędu, czy też ma ona charakter epistemologiczny, tzn. nieoznaczoność istnieje nie w niej samej, lecz stworzonej przez nas wiedzy o niej?

8. Przyczynowość a indeterminizm w metrologii

Przytoczone elementy pojęciowe mechaniki kwantowej, a w szczególności zasada nieoznaczoności powoduje, że w świecie cząstek zasady determinizmu nie mogą być stosowane. Zanim zaczniemy rozwijać problem przyczynowości w tych nowych warunkach omówimy jeszcze pojęcie komplementarności, którą wprowadził Niels Bohr. Przez wielkości komplementarne (dopełniające się) w fizyce współczesnej nazywamy te wielkości, które nie mogą być poznane jednocześnie. Należą do nich np.: położenie – prędkość, czas – energia, fala – cząstka itp. Próba czasoprzestrzennego opisu elektronu jako zlokalizowanej cząstki jest komplementarna względem opisu deterministycznego.

To znaczy, że chcąc określić położenie elektronu w czasoprzestrzeni, możemy to zrobić wykonując odpowiedni pomiar, wiedząc jednocześnie, że tracimy informację o czasowej ewolucji badanego układu. Jeżeli natomiast interesuje nas czasowa ewolucja układu to badamy ją za pomocą deterministycznie zachowującej się funkcji falowej, ale wtedy mamy prawdopodobieństwo, a nie dokładne położenie elektronu. Niech innym przykładem poznania będzie ta sama cząstka, która w określonych warunkach obserwacji, przy określonych urządzeniach pomiarowych, postrzegana jest jako fala, w innych zaś warunkach i przy zastosowaniu odmiennej aparatury pomiarowej – jako cząstka.

Nasuwa się pytanie czy może ona jako przedmiot poznania być poznana naraz w obu postaciach. Biorąc pod uwagę fakt, że obserwatorem i eksperymentatorem dobierającym stosowne urządzenia pomiarowe winien być metrolog, zachodzi pytanie czy wobec wyżej przedstawionych przykładów ma on zachować stanowisko realistyczne i wnioskować na podstawie tego, co obserwowalne i mierzalne.

Myślę, że ten problem jest istotny z filozoficznego punktu widzenia i chyba znajduje odpowiedź na pytanie: czy w nauce można utożsamiać otaczającą, dostępną naszym zmysłom w sposób jakościowy przyrodę, z niezależną od podmiotów poznających rzeczywistością. Przed metrologiem są do wyboru dwa stanowiska poznawcze: realizmu krytycznego oraz radykalnego pozytywizmu lub fenomenalizmu.

Myślę, że metrolog przyjmując stanowisko realisty krytycznego nie sądzi, że elektron jest „rzeczą w sobie”, podobnie jak łyżka czy but, cząstka elementarna fizyki współczesnej jest chyba dla nas przejawem rzeczywistości obiektywnej, niezależnej od poznających podmiotów. Metrolog może być realistą, nie będąc metafizykiem, bowiem w nauce stanowisko realistyczne jest racjonalniejsze od idealistycznego czy fenomenalistycznego.

Z chwilą rozwoju indeterminizmu zasada przyczynowości była krytykowana, bowiem rozpowszechniła się opinia utożsamiająca przyczynowość z determinizmem mechaniki klasycznej. Jako argument podnoszono kwestię, że nie możemy poznać związku przyczynowego między przyczyną i skutkiem, lecz stwierdzamy jedynie następstwo czasowe skutku po przyczynie.

Wprowadzenie pojęcia przyczynowości jednoznacznej i wieloznacznej będącej przejawem realizmu naukowego pozwala sądzić przy przejściu od mechaniki klasycznej do mechaniki kwantowej, że przyczynowość nie zostaje wyeliminowana, lecz zmienia się jej rozumienie. W myśl przyczynowości jednoznacznej zachowuje się funkcja falowa, natomiast zasadę przyczynowości wieloznacznej stosuje się do stanów cząstek. Istotnym jest również to, że termin „indeterminizm” nie oznacza braku przyczyny.

W metrologii przyczynowość przy przejściu z mechaniki klasycznej do mechaniki kwantowej zmienia swoje znaczenie, wyraża się ono w sposobie oddziaływania przyrządu pomiarowego z badanym obiektem. I tak dla obiektów makroskopowych stosowane są pojęcia klasyczne jak pojęcie współrzędnych i pędu, a proces oddziaływania zachodzi w przestrzeni i czasie i jest określany jednoznacznie przez przyjęte modele (teorie). Mamy świadomość, że sposób oddziaływania

przyrządu pomiarowego w przypadku ośrodka makroskopowego jest oddziaływaniem pomiędzy dwoma układami makroskopowymi i dysponujemy wystarczającym aparatem pojęć fizyki klasycznej do jego pełnego opisu.

W przypadku mechaniki kwantowej oddziaływanie przyrządu z mikroobiektem (cząstką, elektronem itp.) jest zupełnie odmienne. Wynika to z faktu dwoistej natury mikroobiektów. I tak w procesie pomiaru położenia mikrocząstki ulega zmianie pęd cząstki.

Granice zmniejszania tego oddziaływania określa związek nieokreśloności $\Delta p \geq \hbar/\Delta x$, który ukazuje, że sposób oddziaływania urządzenia pomiarowego na badany obiekt nie można pominąć, czy go zaniedbać. W mechanice kwantowej pomiar zmienia stan obiektu i w procesie pomiarowym określenie jakiejś wielkości charakteryzującej cząstkę jest możliwe tylko z dokładnością określaną przez związek nieoznaczoności.

Ta zależność wyników pomiaru od przyrządu pomiarowego (rzeczywistego obserwatora) może być interpretowana jako stanowisko idealizmu subiektywnego i prowadzić do idealistycznych wniosków opartych na związkach nieoznaczoności, które odrzucają zasadę przyczynowości w świecie mikrocząstek. Czy tak jest w rzeczywistości? W mechanice kwantowej pojęcie stanu układu jest zupełnie odmienne niż w mechanice klasycznej.

Opisem stanu w mikroświecie jest funkcja falowa cząstki Ψ . Znając wartości funkcji Ψ w czasie t_0 można określić przez rozwiązanie równania Schrödingera jej wartość w chwili $t > t_0$. Ta ewolucja czasowa funkcji falowej ma charakter deterministyczny i jest otrzymana z równania matematycznego mającego cechy równania deterministycznego. Musimy pamiętać, że funkcja falowa nie opisuje toru cząstki, lecz wyraża prawdopodobieństwo znalezienia się cząstki w danym obszarze przestrzeni. Stąd można powiedzieć, że zdeterminowane są prawdopodobieństwa, a nie stany cząstki.

Zasada nieoznaczoności Heisenberga zmusza nas do innego spojrzenia na fakt, że gdy znamy położenie i prędkość wszystkich mas układu odosobnionego to możemy przewidzieć ich przyszłe położenie i prędkość (to nasze myślenie wynikające z zasady przyczynowości). Zasada nieoznaczoności nie stwierdza, że powyższe stwierdzenie jest nieprawdziwe, ale uświadamia nam, że nie jest zawsze użyteczne.

I tak w mikroświecie nie możemy przewidzieć dokładnie położenia pojedynczego elektronu lub atomu i nie ma tu miejsca na układy odosobnione. Nasuwa

się tutaj pytanie. Czy niemożliwość zmierzenia danej wielkości eliminuje poczyna-
nia metrologa w mikroświecie?

Czy to, co jest niedostępne pomiarom nie zależy od metrologii? Metrolog ma świadomość tego, że pomiar położenia cząstki w mikroświecie zakłóca jej ruch i uświadamia sobie, że taki skutek pomiaru pozbawia go właśnie możliwości przewidywania jej dalszego położenia. Metrolog przeprowadzający badania doświadczalne coraz to doskonalszymi urządzeniami nie musi zadręczać się zasadą nieo-
znaczoności, ale musi zawsze odróżnić ograniczenia od ograniczeń fundamental-
nych, z których wynikać może np. nieużyteczność danego urządzenia pomiaro-
wego.

Jak widzimy w mikroświecie rola obserwacji za pomocą urządzeń pomiaro-
wych odgrywa istotne znaczenie w procesie interpretacyjnym szeregu zjawisk.
Okazuje się, że sposób interpretacji i opisu oddziaływania urządzenia pomiaro-
wego z układem kwantowym może być bardzo ważny.

9. Modelowanie i symulacja w procesie poznania

Istotnym dla nauki, a zarazem ważnym punktem wyjścia dla licznych zagadnień o charakterze metodologicznym każdej jej dyscypliny są czynności modelowania i symulacji. To właśnie modelowanie i symulacja pobudzają ludzką wyobraźnię oraz kierują naszą uwagę na podstawowy czynnik określający poznanie jakim jest jego przybliżony charakter w stosunku do rzeczywistości. Poznanie nasze jest wy-
biórcze, aspektowe, ale również w istotny sposób przybliżone i ma charakter aproksymacyjny. Celem naszych poczynań jest uzyskanie poznania wiernego w stosunku do otaczającej nas rzeczywistości.

Ideał ten chcemy osiągnąć drogą kolejnych przybliżeń w oparciu o ciągle mo-
dyfikowane eksperymenty doświadczalne i wnikliwą analizę błędów, które stano-
wią elementy weryfikacji teorii naukowych. Jesteśmy świadomi, że żaden ekspe-
ryment doświadczalny nie jest w stanie udowodnić teorii w sposób bezwzględny,
ale jedynie w mniejszym lub większym stopniu ją potwierdza, bowiem przybli-
żony charakter poznania wynika z posługiwania się w badaniu opracowanymi mo-
delami rzeczywistości.

Wykorzystywanie modeli w poznaniu świata rzeczywistego ukazuje nam drugą cechę poznania, czyli jej charakter zastępczy [44]. W naszym postępowaniu naukowym idziemy od jednego modelu do drugiego, tworząc tym samym coraz to bardziej adekwatne modele, z których wyciągamy wnioski i konfrontujemy je z doświadczeniem. Mamy świadomość tego, że model w poznaniu jest ogniwem pośredniczącym między badaczem a rzeczywistością i jest on tylko środkiem a nie celem, bo w poznaniu chodzi przecież o możliwie najwierniejsze odzwierciedlenie obiektywnej rzeczywistości [45].

9.1. Model i modelowanie

Modelowaniem nazywamy czynność, którą posługujemy się w opisie naukowym rzeczywistości polegającą na badaniu jej modeli, stanowiących jej przybliżenie. Modelowanie to nie tylko otrzymanie konkretnego modelu, lecz to cały cykl badawczy od utworzenia modelu poczynając przez jego weryfikację, interpretację, kończąc na jego kolejnym przybliżeniu. Modelowanie jako czynność jest z reguły niezakończona [46, 47].

Chcąc uchwycić przybliżony charakter poznania należy rozpatrywać obiekty (pola zjawiska), których parametry mają charakter przybliżony, bowiem wtedy mogą one reprezentować rzeczywistość dostępną nam w eksperymencie [35].

W kontekście aproksymacyjnego charakteru poznania w naszym procesie myślowym zaczynamy używać pojęć – oryginał, model. Celem poznania naukowego jest poznanie oryginału. Model jest środkiem tego poznania [48, 49].

Z praktyki wiemy, że w zależności od przyjętego punktu widzenia posługujemy się różnymi rodzajami modeli. Wynika to z wielu możliwych punktów widzenia. W metrologii generalnie przyjmujemy modele fizyczne i matematyczne. Modele fizyczne stanowią przedstawienie fizyczne postrzeganej przez nas rzeczywistości, natomiast matematyczne będące częścią ogólniejszej dziedziny modeli symbolicznych, przedstawiają myślowy opis oryginału. Wśród modeli fizycznych, w zależności od obserwowanego pola zjawiska możemy wyróżnić modele mechaniczne, termiczne, radiacyjne, optyczne, chemiczne.

Pomiędzy wymienionymi modelami istnieją różnego rodzaju powiązania wynikające ze względności pojęcia oryginału i modelu. Między oryginałem a modelem może zachodzić relacja homomorfizmu i izomorfizmu. Wyróżnienie i przyjęcie w opisie rzeczywistości konkretnego modelu jest czynnością podyktowaną przyjętym punktem widzenia, który jest względny, subiektywny i warunkowany cza-

sowo. Istnieje wiele systematyk dotyczących modeli, co prezentuje specjalistyczna literatura. Jedną z nich jest ta, która wyróżnia modele operacyjne, modele syntaktyczne oraz modele semantyczne. A w przypadku modeli fizycznych np. modele strukturalne, funkcjonalne.

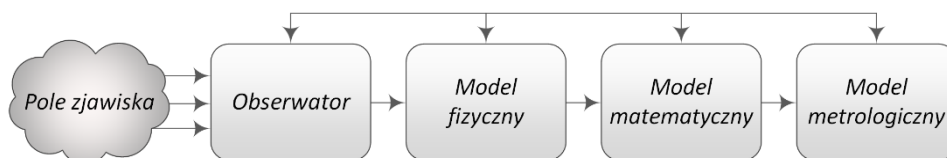
9.2. Symulacja

Pojęcie „symulacja” jest ściśle związane z badanym przez nas obiektem i występuje tam, gdzie nie mamy możliwości bezpośredniego badania oryginału. Wówczas nasze czynności związane są bezpośrednio z modelem. I tu odróżniamy obiekt symulowany – czyli ten nasz oryginał oraz obiekt symulujący – czyli nasz model. Również odróżniamy symulację od badań symulacyjnych. Badania symulacyjne to nic innego jak stosowanie symulacji, która jest procesem opisującym stany modelu – a więc czynnością, (procesem) konstruowania stanów przeszłych modelu. Może ona być stosowana do obiektów (zjawisk) istniejących, jak i tych planowanych nieistniejących, w przypadku których badania symulacyjne falsyfikują wysuniętą hipotezę.

10. Proces poznawczy w metrologii

Ta droga od jednego modelu do drugiego, gdzie kolejne jej kroki to następne przybliżenia, stanowi proces poznawczy danej dziedziny nauki.

Relacje i wzajemne powiązania modelu fizycznego, matematycznego i metrologicznego mierzonego zjawiska, zastosowanej metody pomiarowej i użytych do tego celu urządzeń pomiarowych można przedstawić w postaci schematu procesu myślowego, który jest procesem poznawczym w metrologii. Schemat przyporządkowania dokonywanym obserwacjom wyrażonym przez wrażenia w świadomości obserwatora zjawiskom fizycznym, będącym wynikiem przemian energetycznych w otaczającej nas rzeczywistości można graficznie przedstawić jak na Rys. 10.1.



Rys. 10.1. Schemat procesu poznawczego w metrologii

Tak przedstawiony schemat procesu poznawczego ma charakter formalny (myślowy). Cechą modeli myślowych jest forma ich prezentacji. Należy do nich postać symboli logicznych, równań – wyrażeń matematycznych, wykresów, tabel itp. Forma i budowa procesu poznawczego w metrologii jest podstawą systematyki podjętej przez autora w niniejszej pracy. Przykładem tego jest rodzaj opisów tu prezentowanych modeli słownych, numerycznych, analitycznych czy graficznych.

W zaprezentowanym tu schemacie procesu poznawczego metrologii występuje szeregowo połączenie badanego obiektu (pola zjawiska) będącego celem poznania z jego układem fizycznym, matematycznym i metrologicznym, pomiędzy którymi występują sprzężenia zwrotne stanowiące odzwierciedlenie procesów weryfikacyjnych poszczególnych modeli, uwarunkowane zewnętrznymi kryteriami oceny.

Droga powstawania modeli w procesie prawnym metrologii przyjmuje założenie, że metody indukcyjne i dedukcyjne przeplatają się wzajemnie i stanowią procedurę tworzenia uogólnionej systematyki metrologii.

Prawa fizyki, które są dla nas modelem fizycznym wyrażamy zwykle w postaci równań modelujących przyczynowe zależności między wielkościami, które my przy pomocy swoich zmysłów lub za pomocą doskonałych przyrządów pomiarowych potrafimy wyodrębnić z pola zjawiska, mają postać przyczynowych zależności.

W klasycznych pomiarach wielkości fizycznych proces przyczynowo – skutkowy jest gwarantem poprawnie postawionej hipotezy. W procesie tym o przyczynie dowiadujemy się na podstawie analizy skutków. Złożoność współczesnych metod pomiarowych pociąga za sobą wnikliwą analizę procesu przyczynowo-skutkowego obejmującą również szeroko rozumianą analizę modelu matematycznego metody pomiarowej.

Problem ten w literaturze nazywany jest *forward problem* i ukazuje on model matematyczny, odzwierciedlający obserwowane przez nas wielkości, charakteryzujący zachowanie lub stan pola zjawiska w relacji innych wielkości będącymi przyczynami tego zachowania lub stanu.

W przypadku kiedy obserwowane przez nas wielkości tworzące zachowanie lub stan pola zjawiska są skutkiem oddziaływania innych wielkości powodujących taki stan lub zachowanie, mamy do czynienia z *inverse problem*.

W metrologii klasycznym problemem „wprost” jest to pomiar dokonywany z wykorzystaniem wzorca danej wielkości. Z problemem odwrotnym mamy do czynienia wówczas kiedy nie posiadamy wzorca badanej przez nas właściwości (cechy) badanego obiektu, a jedynie opis (model matematyczny) właściwości związanych (pokrewnych) z daną właściwością [13].

Wówczas na podstawie skutków wnioskujemy o przyczynie. Ponieważ przeważająca większość problemów rozwiązywanych obecnie przez metrologów dotyczy pomiaru właściwości nie posiadających wzorców, stąd obecnie zagadnienie problemu odwrotnego jest bardzo istotne. Pomocnym w rozwiązaniu problemu odwrotnego jest fakt, że algorytmizacja, symulacja przenika już do każdej dziedziny nauki, a coraz to szybsze komputery pozwalają na ukazanie i eliminację błędnych koncepcji pomiaru [14, 15].

I I. Zakończenie

Do podstawowych założeń naszej nauki należy to, że o pomiarach mówimy językiem mającym zasadniczo taką samą strukturę jak ten, którym mówimy o doświadczeniach życia powszedniego. Nauczyliśmy się, że język ten jest bardzo niedoskonałym instrumentem orientacji i porozumienia. Instrument ten jest jednak jednocześnie założeniem naszej nauki.

(N. Bohr)

Metrologia mimo, że skrywa w gąszczu swoich różnych zbiorów terminologicznych nie zawsze łatwe do zrozumienia dla nas fakty, to swoimi koncepcjami ukazuje intelektualne uroki naszej działalności. Upływający czas ukazuje nam, że niektóre metrologiczne koncepcje były niepełne lub wręcz chybione. Ciągłe poszukiwanie nowych systematyk (uogólnień), celem których jest prostsze, a zarazem pełniejsze ukazanie otaczającej nas rzeczywistości jest tym wtórnym myśleniem, dzięki któremu każda nauka może żyć.

Metrologia, jako zbiór faktów teoretycznych i empirycznych weryfikujących ludzkie hipotezy, jest nauką łączącą w sobie osiągnięcia wielu nauk podstawowych od fizyki, matematyki poczynając, a na cybernetyce, informatyce, teorii chaosu kończąc [5, 8, 9, 13, 32-34, 46, 47, 50].

Istotnym jest fakt, że jest ona tworem ludzkiego umysłu niosącego w sobie wartości kulturowe, w których nieograniczona żądza poznania, estetyka, pomysłowość, wyobraźnia, pedanteria, skromność stanowią elementy twórczego myślenia. Przewaga intelektualnych osiągnięć w danej dziedzinie nauki nad jej rutynowymi badaniami i technicznymi osiągnięciami stanowi podstawowy element jej cywilizacyjnego rozwoju.

W pracy tej pragnąłem pokazać, że metrologia ma swoje zagadnienia podstawowe i że jest ona tą intelektualną nadbudową miernictwa, dzięki której może się ono rozwijać i swoimi technicznymi wynalazkami przenikać do nowych osiągnięć nauki.

Jestem przekonany, że czas zweryfikuje i zastąpi prezentowane tu koncepcje innym, głębszym i ogólniejszym spojrzeniem na miarę intelektualnych osiągnięć kolejnego stulecia.

12. Literatura

- [1] B. Ellis, *Basic Concepts of Measurement* (Cambridge University Press, Cambridge, 1966).
- [2] L. Finkelstein, "Fundamental Concepts of Measurement," in *Acta IMEKO VI*, (IMEKO, 1973), 11-18.
- [3] L. Finkelstein, "Representation by symbols as an extension of the concept of measurement," *Kybernetes* **4**, 215-223 (1972).
- [4] L. Finkelstein, "Fundamental concepts of measurement: definition and scales," *Measurement and Control* **8**, 105-111 (1975).
- [5] P. Suppes and J. L. Zinnes, "Basic measurement theory," in *Handbook of Mathematical Psychology*, R. D. Luce, R. R. Bush, and E. Galanter, eds. (Wiley, New York, 1965).
- [6] L. Finkelstein, "Instrument science: introductory article," *Journal of Physics E: Scientific Instruments* **10**, 566-572 (1977).
- [7] L. Finkelstein, M. El-hami, and R. Ginger, "Conceptual design of instrument systems utilizing physical laws," *Measurement* **23**, 9-13 (1998).
- [8] E. Hutten, *The Ideas of Physics* (Oliver and Boyd, London, 1967).
- [9] E. Hutten, *The Language of Modern Physics* (George Allen And Unwin Ltd., 1956).
- [10] **J. Mroczka**, "Turbidimetric methods in particle sizing," in *Digest of the 12th Triennial World Congress of the International Measurement Confederation (IMEKO)*, (Beijing, China, 1991), pp. II-109.

- [11] **J. Mroczka**, "Integral transform technique in particle sizing," in *Digest of the 12th Triennial World Congress of the International Measurement Confederation (IMEKO)*, (Beijing, China, 1991), pp. II-125.
- [12] **J. Mroczka**, "Method of Moments in Light Scattering Data Inversion in the Particle Size Distribution," *Optics Communications* **99**, 147-151 (1993).
- [13] **J. Mroczka** and D. Szczuczyński, "Inverse problems formulated in terms of first-kind Fredholm integral equations in indirect measurements," *Metrology and Measurement Systems* **16**, 333-357 (2009).
- [14] **J. Mroczka** and D. Szczuczyński, "Improved regularized solution of the inverse problem in turbidimetric measurements," *Applied Optics* **49**, 4591-4603 (2010).
- [15] **J. Mroczka** and D. Szczuczyński, "Simulation research on improved regularized solution of inverse problem in spectral extinction measurements," *Applied Optics* **51**, 1715-1723 (2012).
- [16] **J. Mroczka** and D. Szczuczyński, "Improved technique of retrieving particle size distribution from angular scattering measurements," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **129**, 48-59 (2013).
- [17] F. Onofri, M. Krzysiek, S. Barbosa, V. Messenger, K. F. Ren, and **J. Mroczka**, "Near-critical-angle scattering for the characterization of clouds of bubbles: particular effects," *Applied Optics* **50**, 5759-5769 (2011).
- [18] M. Czerwiński, **J. Mroczka**, T. Girasole, G. Gouesbet, and G. Gréhan, "Light-transmittance predictions under multiple-light-scattering conditions. Pt. 1. Direct problem: hybrid-method approximation," *Applied Optics* **40**, 1514-1524 (2001).
- [19] M. Czerwiński, **J. Mroczka**, T. Girasole, G. Gouesbet, and G. Gréhan, "Light-transmittance predictions under multiple-light-scattering conditions. Pt. 2. Inverse problem: particle size determination," *Applied Optics* **40**, 1525-1531 (2001).
- [20] T. Guskowski and **J. Mroczka**, "Metoda inwersyjna wykorzystująca sztuczną sieć neuronową w turbidymetrii spektralnej.," in *Metrologia wspomagana komputerowo. MWK '2003. VI Szkoła - konferencja.*, (Instytut Podstaw Elektroniki Wydział Elektroniki WAT, Waplewo, 2003), pp. 29-34.
- [21] T. Girasole, H. Bultynck, G. Gouesbet, G. Gréhan, F. Le Meur, J. N. Le Toulouzan, **J. Mroczka**, K. F. Ren, C. Roze, and D. Wysoczański, "Cylindrical fibre orientation analysis by light scattering: Part 1: Numerical aspects," *Particle & Particle Systems Characterization* **14**, 163-174 (1997).
- [22] T. Girasole, G. Gouesbet, G. Gréhan, J. N. Le Toulouzan, **J. Mroczka**, K. F. Ren, and D. Wysoczański, "Cylindrical fibre orientation analysis by

- light scattering: Part 2: Experimental aspects," *Particle & Particle Systems Characterization* **14**, 211-218 (1997).
- [23] T. Girasole, J. N. Le Toulouzan, **J. Mroczka**, and D. Wysoczański, "Fiber orientation and concentration analysis by light scattering: experimental setup and diagnosis," *Review of Scientific Instruments* **68**, 2805-2811 (1997).
- [24] **J. Mroczka**, D. Wysoczański, and F. Onofri, "Optical parameters and scattering properties of red blood cells," *Optica Applicata* **32**, 691-700 (2002).
- [25] K. Skorupski and **J. Mroczka**, "Effect of the necking phenomenon on the optical properties of soot particles," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **141**, 40-48 (2014).
- [26] K. Skorupski, **J. Mroczka**, N. Riefler, H. Oltmann, S. Will, and T. Wriedt, "Impact of morphological parameters onto simulated light scattering patterns," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **119**, 53-66 (2013).
- [27] M. Woźniak, F. Onofri, S. Barbosa, J. Yon, and **J. Mroczka**, "Comparison of methods to derive morphological parameters of multi-fractal samples of particle aggregates from TEM images," *Journal of Aerosol Science* **47**, 12-26 (2012).
- [28] T. Wojtaszek and **J. Mroczka**, "Light scattering simulations of spheroids using three beams phase Doppler system," in *XVIII IMEKO World Congress Metrology for a Sustainable Development*, (Rio de Janeiro, Brazil, 2006).
- [29] G. Świrniak, G. Głomb, and **J. Mroczka**, "Inverse analysis of the rainbow for the case of low-coherent incident light to determine the diameter of a glass fiber," *Applied Optics* **53**, 4239-4247 (2014).
- [30] G. Świrniak, G. Głomb, and **J. Mroczka**, "Inverse analysis of light scattered at a small angle for characterization of a transparent dielectric fiber," *Applied Optics* **53**, 7103-7111 (2014).
- [31] G. Świrniak and **J. Mroczka**, "Approximate solution for optical measurements of the diameter and refractive index of a small and transparent fiber," *Journal of the Optical Society of America A* **33**, 667-676 (2016).
- [32] R. O. Kapp, *The Presentation of Technical Information* (Constable and Co., London, 1948).
- [33] J. E. Nelson, "Trends in instrumentation," in *WESCON 76 Conference, Session 24*, (1976).
- [34] S. S. Stevens, "On the theory of the scales of measurement," *Science* **103**, 677-680 (1946).
- [35] **J. Mroczka**, "The cognitive process in metrology," *Measurement* **46**, 2896-2907 (2013).

- [36] B. Russell, *Human Knowledge, Its Scope and Limits* (Simon and Schuster, New York, 1948).
- [37] J. Pfanzagl, *Theory of Measurement* (Physica-Verlag, Würzburg-Wien, 1968).
- [38] C. Piron, *Foundations of Quantum Physics*, Frontiers in Physics (W. A. Benjamin, Inc., 1976).
- [39] J. von Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics* (Princeton University Press, Princeton, 1955).
- [40] W. Heisenberg, *Wandlungen in der Grundlagen der Naturwissenschaft* (Hirzel Verlag, Leipzig, 1943).
- [41] F. S. Roberts, *Measurement Theory, with Applications to Decisionmaking, Utility, and the Social Sciences* (Addison Wesley, Reading, MA, 1979).
- [42] H. Primas, *Chemistry, Quantum Mechanics and Reductionism*, Lecture Notes in Chemistry (Springer-Verlag, Heidelberg, 1981), Vol. 24.
- [43] E. Prugovečki, *Quantum Mechanics in Hilbert Space* (Academic Press, New York, 1981).
- [44] J. Barzykowski, ed., *Współczesna metrologia: zagadnienia wybrane* (Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2004).
- [45] R. Z. Morawski, "Application-oriented approach to mathematical modelling of measurement processes," in *Joint International IMEKO Symposium*, (Jena, Germany, 2011).
- [46] C. H. Coombs, H. Raiffa, and R. M. Thrall, "Some views on mathematical models and measurement theory," *Psychological Review* **61**, 132-144 (1954).
- [47] L. Finkelstein and R. D. Watts, "Mathematical models of instruments-fundamental principles," *Journal of Physics E: Scientific Instruments* **11**, 841-855 (1978).
- [48] J. Schwartz, "The Pernicious Influence of Mathematics on Science," in *Journal of Philosophy*, 1962, 356-360.
- [49] W. Stegmüller, *Theorie und Erfahrung* (Springer Verlag, Berlin, 1970).
- [50] C. W. Churchman and P. Ratoosh, eds., *Basic Concept of Measurements* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1959).