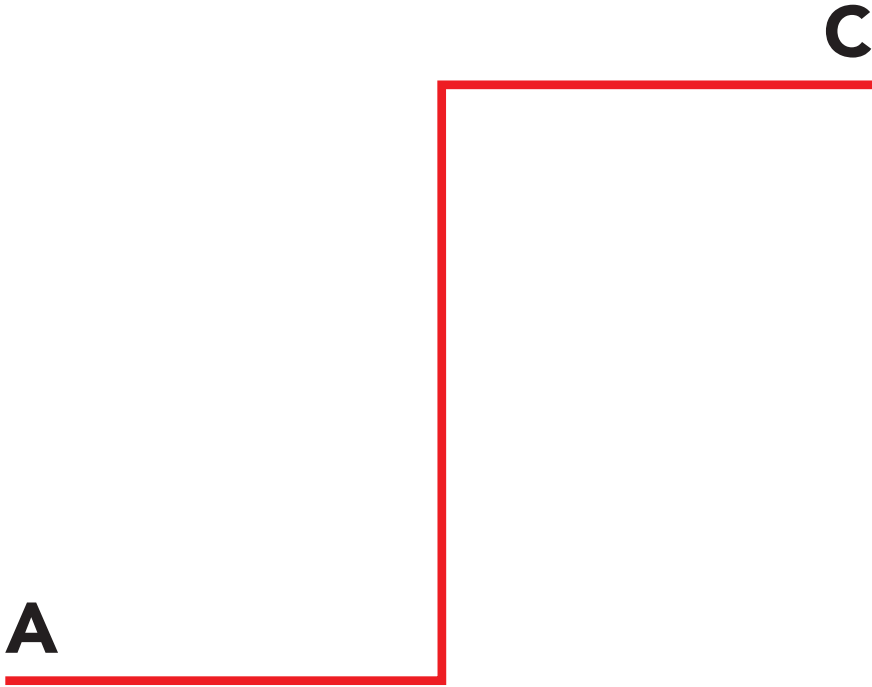


Sławomir Leciejewski

CYFROWA REWOLUCJA

w badaniach eksperymentalnych



WYDAWNICTWO NAUKOWE UAM

CYFROWA REWOLUCJA
W BADANIACH EKSPERYMENTALNYCH

UNIWERSYTET IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNANIU

SERIA FILOZOFIA I LOGIKA NR 114

SŁAWOMIR LECIEJEWSKI

**CYFROWA REWOLUCJA
W BADANIACH EKSPERYMENTALNYCH
STUDIUM METODOLOGICZNO-FILOZOFICZNE**



WYDAWNICTWO
NAUKOWE

POZNAŃ 2013

ABSTRACT. Leciejewski Sławomir, *Cyfrowa rewolucja w badaniach eksperymentalnych. Studium metodologiczno-filozoficzne* [The digital revolution in experimental research. Methodological and philosophical study]. Poznań 2013. Adam Mickiewicz University Press. Seria Filozofia i Logika nr 114. Pp. 169. Fig. 1. ISBN 978-83-232-2558-4. ISSN 0083-4246. Text in Polish with a summary in English.

The main objective of this book is to provide answers to two fundamental questions from the field of philosophical reflection on science and its development. Firstly, if the use of computer in empirical studies has created a brand new computer style of scientific research; secondly, whether computer has revolutionized experimental studies. When providing the answers, monograph refer to the well-known concepts of thought developed by Ludwik Fleck, the style of scientific research by Alistair Cameron Crombie and its further modifications, as much as to several concepts of scientific revolutions (by Thomas Samuel Kuhn, Bernard Cohen and Steven Shapin).

KEYWORDS: methodology of empirical study; computer-supported experiments; philosophy of experiment; philosophy of computer science

Sławomir Leciejewski, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Instytut Filozofii, Zakład Logiki i Metodologii Nauk, ul. Szamarzewskiego 89c, 60-568 Poznań, Poland

Recenzent: dr hab. Marek Sikora, prof. PWr

Publikacja dofinansowana przez
Rektora Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
oraz Wydział Nauk Społecznych UAM

© Sławomir Leciejewski 2013

This edition © Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu,
Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań 2013

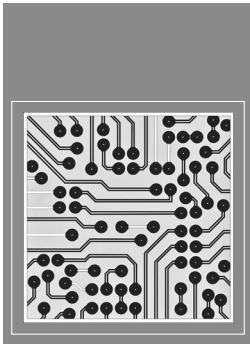
Projekt okładki: Bartosz Makświej, Sławomir Leciejewski
Redakcja: Izabela Baran
Redakcja techniczna: Elżbieta Rygielska
Łamanie komputerowe: Reginaldo Cammarano

ISBN 978-83-232-2558-4
ISSN 0083-4246

WYDAWNICTWO NAUKOWE UNIwersytetu IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNANIU
61-701 POZNAŃ, UL. A. FREDRY 10
www.press.amu.edu.pl
Sekretariat: tel. 61 829 46 46, faks 61 829 46 47, e-mail: wyd nauk@amu.edu.pl
Dział sprzedaży: tel. 61 829 46 40, e-mail: press@amu.edu.pl

Wydanie I. Ark. wyd. 10,75. Ark. druk. 10,625

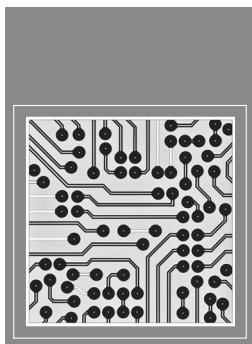
DRUK I OPRAWA: UNI-DRUK s.j., LUBOŃ, UL. PRZEMYSŁOWA 13



Spis treści

Wstęp	7
ROZDZIAŁ 1. Metodologia badań eksperymentalnych	15
1.1. Teoretycyzm a eksperymentalizm	16
1.2. Nowy eksperymentalizm	24
1.3. Taksonomia prac eksperymentalnych Iana Hackinga	30
ROZDZIAŁ 2. Elementy układu eksperymentalnego wspomaganego komputerowo	36
2.1. Urządzenia pomiarowe	41
2.2. Przetworniki analogowo-cyfrowe	44
2.3. Interfejsy	49
2.4. Komputer	52
2.5. Oprogramowanie	56
2.6. Inne elementy (przetworniki cyfrowo-analogowe, urządzenia wykonawcze)	60
ROZDZIAŁ 3. Analiza metodologiczna eksperymentów wspomaganých komputerowo	62
3.1. Rola elementów cyfrowych w układzie eksperymentalnym	63
3.1.1. Metodologiczne i epistemologiczne aspekty włączenia przetworników analogowo-cyfrowych do układu eksperymentalnego	64
3.1.2. Komputer w układzie eksperymentalnym – konsekwencje dla metodologii nauk empirycznych	68
3.2. Status eksperymentatora w badaniach eksperymentalnych wspomaganých komputerowo	76

3.2.1. Komputerowe metody poszerzania możliwości poznawczych podmiotu eksperymentującego	77
3.2.2. Czy możliwe są badania bez podmiotu eksperymentującego?	86
ROZDZIAŁ 4. Badania eksperymentalne wspomagane komputerowo a filozoficzna refleksja nad naukami empirycznymi (status komputera w badaniach eksperymentalnych)	94
4.1. Nowy eksperymentalizm a eksperymenty wspomagane komputerowo	94
4.2. Komputer jako narzędzie umożliwiające współczesne badania eksperymentalne	107
4.3. Komputerowy styl badań naukowych	115
4.4. Czy komputer zrewolucjonizował badania eksperymentalne?	122
Zakończenie	137
Bibliografia	147
Indeks nazwisk	160
Indeks rzeczowy	163
The digital revolution in experimental research. Methodological and philosophical study (S u m m a r y)	167



Wstęp

Pierwszymi urządzeniami liczącymi były palce u rąk, kamienie, muszelki lub figury zapisane na piasku. Później zaczęto używać liczydeł, suwaków algorytmicznych, mechanicznych kalkulatorów oraz arytmometrów. Wszystkie te narzędzia były mechaniczne. Dopiero pod koniec XIX wieku zaczęto używać elektryczności dostarczającej napędu do elektromechanicznych urządzeń liczących. Jednakże maszyny wykorzystujące mechaniczne zasady pracy, udoskonalane przez dwieście lat, stopniowo wyczerpywały dalsze możliwości rozwoju¹.

Ograniczenia mechanicznych urządzeń liczących, rozwój nauki, gospodarki i techniki spowodowały konieczność poszukiwania nowych, doskonalszych urządzeń liczących, umożliwiających badania numeryczne złożonych zjawisk, opisywanych np. nieliniowymi równaniami różniczkowymi. W latach dwudziestych ubiegłego wieku rozpoczął się okres budowy i eksploatacji elektronicznych maszyn analogowych, trwający niemalże pięćdziesiąt lat – do czasu, gdy komputery elektroniczne (zwane początkowo elektronicznymi maszynami cyfrowymi) nie przejęły zadań maszyn analogowych, wykonując je szybciej i efektywniej².

W latach trzydziestych i czterdziestych XX wieku podejmowano udane próby skonstruowania doskonalszych urządzeń liczących z zastosowaniem układów elektromechanicznych (była to tzw. zerowa generacja komputerów). Powszechnie uważa się, że pierwszą elektroniczną maszyną liczącą zbudowaną z lamp był komputer ENIAC, uruchomiony w 1945 roku. Zapoczątkował on pierwszą generację komputerów lampowych. Istotnym mankamentem

¹ Por. J. Papińska-Kacperk (red.), *Spółeczeństwo informacyjne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2008, s. 49–51.

² Por. tamże, s. 51–52.

tego typu komputerów była jednak wysoka awaryjność lamp zużywających ogromną ilość energii elektrycznej i zajmujących bardzo dużo miejsca. Dlatego wynalezienie w 1947 roku tranzystora, półprzewodnikowego elementu zastępującego lampy elektronowe, i uruchomienie w 1951 roku pierwszego komputera tranzystorowego wyeliminowało wady komputerów lampowych. W ten sposób powstała druga generacja komputerów tranzystorowych.

Zmniejszenie odległości między częściami składowymi komputera spowodowało zwiększenie szybkości działania układu. Nadal pozostała jednak istotna niewygodna związana z koniecznością prowadzenia tysięcy połączeń między tranzystorami i innymi elementami komputera. Badania prowadzone w różnych zespołach nad umieszczeniem wielu elementów na jednej płycie półprzewodnika doprowadziły w 1958 roku do wykonania układu scalonego. W roku 1971 skonstruowano pierwszy na świecie mikroprocesor (Intel 4004), co zapoczątkowało pojawienie się trzeciej generacji komputerów skonstruowanych na bazie układów scalonych.

Zastosowanie układów scalonych zaowocowało rozwojem architektury komputerów w dwóch kierunkach: budowy dużych komputerów (superkomputerów – pierwszy był Cray-1 z 1976 roku) oraz komputerów osobistych PC (*Personal Computer*). Zainicjowanie rozwoju tych ostatnich wiąże się z rozpoczęciem w 1975 roku sprzedaży zestawów dla majsterkowiczów, umożliwiających samodzielne złożenie komputera (Altair 8800). W roku 1977 trafił do sprzedaży komputer Apple II, będący pierwszym powszechnie dostępnym komputerem osobistym. Reakcją firmy IBM było wyprodukowanie IBM PC 5150. W 1984 roku rozpoczęto sprzedaż Apple Macintosh – pierwszego łatwo dostępnego komercyjnie komputera stosującego graficzny interfejs użytkownika (pulpit z ikonami oraz oknami), sterowanego za pomocą myszy.

Rozwój komputerów, oprogramowania i urządzeń peryferyjnych umożliwił wykonywanie w coraz efektywniejszy sposób funkcji obliczeniowych, kontrolnych, doradczych, diagnostycznych, monitorujących, pomiarowych, sterujących i innych; spowodował ich zastosowanie w niemalże wszystkich obszarach ludzkiej działalności. Pojawienie się komputerów umożliwiło także rozwój samej informatyki, będącej zespołem dziedzin teoretycznych (metod matematycznych, logiki, teorii automatów, teorii algorytmów, lingwistyki matematycznej), technicznych (budowy sprzętu, tworzenia oprogramowania komputerowego) i aplikacyjnych (zastosowań w różnych dziedzinach). Jednym z bardzo ważnych ich zastosowań jest wspomaganie prac badawczych w naukach empirycznych. Komputery używane były w takich celach od lat czterdziestych XX wieku, początkowo z przewagą zastosowań militarnych. Stopniowo badania naukowe wspomagane komputerowo przestawały być wyłącznie badaniami zlecanymi przez wojsko, a stawały się coraz bardziej badaniami bez konotacji typowo militarnych.

W latach osiemdziesiątych XX wieku wspomaganie komputerowe badań eksperymentalnych stało się standardem podczas prac badawczych prowadzonych w większości dobrych laboratoriów naukowych. Niestety, nie znalazło to odzwierciedlenia w profesjonalnej literaturze przedmiotu z zakresu filozofii i metodologii nauki. Niniejsza monografia jest uzupełnieniem tej luki. Głównym jej celem są metodologiczne i filozoficzne analizy praktyki eksperymentalnej wspomaganej komputerowo oraz wykazanie, że zastosowanie komputera w sposób rewolucyjny zmieniło tę praktykę. Współcześnie możemy bowiem mówić o komputerowym stylu badań naukowych, a tego typu praca badawcza jest jakościowo inna od wcześniejszej, nieskomputeryzowanej, analogowej pracy eksperymentalnej. Komputer nie jest wszakże tylko urządzeniem przyspieszającym obliczenia, choć od lat czterdziestych XX wieku do tego celu był głównie używany.

Komputery stosowane do różnorodnych obliczeń przyspieszały pracę teoretyków, ułatwiając znajdowanie numerycznych wyników prowadzonych przez nich badań. W literaturze przedmiotu pojawiają się metodologiczne i filozoficzne opracowania dotyczące zmian zachodzących w pracy naukowej, a będących konsekwencją zastosowania wspomaganie komputerowego obliczeń numerycznych. Przykładem może być artykuł Petera Galisona *Computer Simulations and the Trading Zone*, w którym omawia on sposoby używania komputera w latach czterdziestych i pięćdziesiątych XX wieku. Prowadzone wtedy symulacje komputerowe z pewnością zmieniły jakościowo pracę naukowców opracowujących dane pomocne podczas budowy bomby atomowej. Jednakże brakuje, nawet w rozważaniach z zakresu filozofii eksperymentu, analiz roli komputerów w badaniach eksperymentalnych. Komputery zmieniły bowiem nie tylko prace teoretyków, ale także pracę eksperymentalną. Fakt ten nie został jednak należycie odnotowany w literaturze z zakresu metodologii i filozofii nauki. To, że nowy eksperymentalizm, jako kierunek zaproponowany po to, aby dokonać adekwatnego opisu praktyki laboratoryjnej, pomija rolę komputera w badaniach eksperymentalnych, jest – moim zdaniem – największym przeoczeniem filozofów nauki będących jego twórcami. Niniejsza monografia stanowi próbę uzupełnienia tego istotnego braku nowego eksperymentalizmu. Jej głównym celem jest metodologiczna i filozoficzna analiza praktyki eksperymentalnej wspomaganej komputerowo.

Rozważania dotyczące wyżej wspomnianego zagadnienia są prowadzone w kontekście ustaleń tych metodologów i filozofów nauki, którzy w swoich dotychczasowych badaniach zajmowali się analizą praktyki eksperymentalnej nauk przyrodniczych, czemu poświęcony jest drugi podrozdział pierwszego rozdziału książki. Punkt odniesienia tej części monografii stanowi filozofia nowego eksperymentalizmu Iana Hackinga, zaprezentowana w jego głównej pracy z tego zakresu *Representing and Intervening*. Rozważania te są poprzedzo-

ne omówieniem dychotomii teoretycyzm-eksperymentalizm, co umożliwia zestawienie tradycji filozofii eksperymentu z najważniejszymi ustaleniami filozoficznymi odnoszącymi się do wytworów pracy naukowej (teorii). Temu zagadnieniu poświęcony jest pierwszy podrozdział pierwszego rozdziału książki. Część ostatnia tegoż rozdziału zawiera taksonomię prac eksperymentalnych Hackinga, opisaną w artykule *The Self-Vindication of the Laboratory Science*. Odwołuję się do niej podczas omawiania elementów współczesnych układów eksperymentalnych wspomaganych komputerowo oraz podczas udzielania odpowiedzi na główne pytania stawiane w książce.

Współcześnie komputer w naukach empirycznych spełnia wiele różnych zadań, które można podzielić na trzy główne grupy: analityczne (on-line), syntetyczne (off-line) i prezentacyjne (on-line i off-line). W pierwszej z nich komputer połączony jest bezpośrednio z przyrządem pomiarowym (składającym się z urządzenia pomiarowego, przetworników analogowo-cyfrowych i interfejsu) i służy głównie do gromadzenia i analizy danych empirycznych napływających z układu eksperymentalnego (stąd jego rola analityczna on-line). W drugiej grupie zastosowań komputer nie jest już bezpośrednio podłączony do zestawu eksperymentalnego, ale służy głównie do opracowywania zgromadzonych wcześniej danych empirycznych (stąd jego rola syntetyczna off-line). Ważną klasą zastosowań komputerów jest także prezentacja przetwarzanych danych empirycznych (z grupy pierwszej) i otrzymanych wyników analiz numerycznych (z grupy drugiej). Różnego rodzaju wizualizacje komputerowe mogą być tworzone w trakcie eksperymentu (w trybie on-line) oraz po skończonym eksperymencie, podczas opracowywania zgromadzonych danych empirycznych (off-line).

Zadania wykonywane przez komputer, które zaliczyłem do pierwszej grupy, opisane są w rozdziale drugim – i to właśnie treści w nim zawarte stanowią punkt wyjścia do dalszych metodologicznych i filozoficznych analiz. Wprowadzenie cyfrowych elementów do układów eksperymentalnych zasadniczo zmieniło tę praktykę. Szczególnie ważne w tej zmianie są przetworniki analogowo-cyfrowe, komputer oraz oprogramowanie i dlatego tym cyfrowym elementom współczesnych układów eksperymentalnych poświęcam więcej miejsca. We wstępie do rozdziału drugiego szczegółowo omawiam także pozostałe zadania komputera w naukach empirycznych, gdyż są one przywoływane w rozdziale trzecim i czwartym jako przykłady, na bazie których uzasadniam stawiane przez siebie tezy o charakterze metodologicznym i filozoficznym.

Ważnym zagadnieniem poruszonym w rozdziale trzecim jest to, czy zastosowanie komputerowego (cyfrowego) wspomagania badań eksperymentalnych wprowadza do pracy badawczej tylko niepodlegające dyskusji zmiany ilościowe, czy mamy w tym przypadku do czynienia także ze zmia-

nami jakościowymi. Czy dzięki zastosowaniu przetworników analogowo-cyfrowych oraz interfejsów zmienia się „odległość” pomiędzy podmiotem a przedmiotem eksperymentu? Czy interpretacja wyników eksperymentów przeprowadzanych z udziałem wspomaganie komputerowego różni się od interpretacji wyników klasycznych badań empirycznych? Czy zastosowanie symulacji komputerowych, tj. cyfrowych metod numerycznych, wprowadza inny rodzaj uzasadniania hipotez naukowych – uzasadnianie numeryczne? Czy zatem status eksperymentatora w naukach empirycznych zmienia się w sposób jakościowy w przypadku, gdy badania naukowe wspomagane są przez komputery i inne cyfrowe elementy współczesnych układów eksperymentalnych? Udzielając odpowiedzi na powyższe pytania, odwołuję się do ustaleń z rozdziału drugiego oraz do podstawowej wiedzy z zakresu symulacji komputerowych oraz komputerowych systemów odkryć naukowych, którą w skrócie przywołuję na podstawie dostępnej literatury przedmiotu.

Kluczowy dla książki jest rozdział czwarty, w ramach którego bronię wysuwanych przez siebie tez dotyczących nowego stylu badań eksperymentalnych, nowego stylu badań naukowych oraz cyfrowej rewolucji, jaka dokonała się w naukach empirycznych. Zaskakujące jest to, że w literaturze przedmiotu nie stawiano tego typu tez i nie próbowano ich uzasadniać. Była co prawda odnotowywana rewolucyjna zmiana w rozwoju cywilizacji spowodowana komputeryzacją wielu sfer życia społecznego. Jednakże tego typu tezy pojawiały się niejednokrotnie bez należytego uzasadnienia, głównie w literaturze popularnonaukowej oraz tej z zakresu historii i socjologii nauki. Teza o rewolucji informatycznej w szeroko rozumianej kulturze jest często formułowana³, ale nie znalazła odzwierciedlenia w profesjonalnych publikacjach z zakresu filozofii nauki i metodologii. Koncepcje rewolucji naukowych, do których odwołuję się w książce, nie były dotychczas przywoływane w celu uzasadniania tezy o cyfrowej rewolucji w badaniach eksperymentalnych. Podobnie koncepcje stylu myślowego oraz stylu badań naukowych nie służyły do wykazywania, że cyfryzacja badań empirycznych i, szerzej, naukowych pociąga za sobą pojawienie się nowego stylu badań eksperymentalnych oraz nowego stylu badań naukowych.

Głównym celem mojej książki jest udzielenie odpowiedzi na dwa fundamentalne pytania z zakresu filozoficznej refleksji nad nauką i jej rozwojem. Po pierwsze, czy zastosowanie komputera w naukach empirycznych wyznacza nowy, komputerowy styl badań naukowych? Po drugie, czy komputer zrewolucjonizował badania eksperymentalne? Udzielając na nie odpowiedzi, odwołuję się do znanych koncepcji stylu myślowego Ludwika Flecka, stylu

³ Por. P. Gawrysiak, *Cyfrowa rewolucja. Rozwój cywilizacji informacyjnej*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2008.

badania naukowych Alistaira Camerona Crombiego i jego późniejszych modyfikacji oraz kilku koncepcji rewolucji naukowych (Thomasa Samuela Kuhna, Bernarda Cohena, Iana Hackinga i Stevena Shapina). Ponieważ koncepcje te były wielokrotnie przedstawiane i dyskutowane – również w polskiej literaturze przedmiotu, dlatego nie omawiam ich szczegółowo. Swoje rozważania zaczynam od wykazania, że filozofia nowego eksperymentalizmu nie dostarcza aparatu pojęciowego, który umożliwiłby adekwatną analizę pracy eksperymentalnej wspomaganą komputerowo. Na podstawie najnowszych badań z zakresu fizyki cząstek elementarnych, prowadzonych w największym i najbardziej skomputeryzowanym laboratorium na świecie – CERN, wykazuję, że współcześnie nie można uzyskać doniosłych poznawczo wyników, gdy pracuje się bez wspomaganie komputerowego. Ten sam materiał fakualny pozwala uzasadnić tezę dotyczącą komputerowego stylu badań naukowych.

Odpowiedź na najważniejsze pytanie stawiane przeze mnie w książce: czy mamy do czynienia z cyfrową rewolucją w badaniach eksperymentalnych, staje się możliwa, gdy kryteria rewolucji naukowych zaproponowane przez czterech wspomnianych autorów odniesie się do zmiany spowodowanej przejściem od analogowego do cyfrowego sposobu eksperymentowania. W podrozdziale zamykającym książkę odnoszę się także do taksonomii prac eksperymentalnych Hackinga, pokazując, że niemalże wszystkie elementy prac eksperymentalnych wyróżnione przez autora *The Self-Vindication of the Laboratory Science* są współcześnie wspomaganie komputerowo. Wzmocni to tezę o rewolucji, która dokonała się w badaniach eksperymentalnych za sprawą włączenia cyfrowych elementów do układu eksperymentalnego.

Książkę zamyka spojrzenie w przyszłość, w ramach którego zarysowuję pojawiające się możliwości zastosowania komputerów kwantowych w badaniach naukowych. W pracy wykorzystuję swoje wcześniejsze ustalenia opublikowane w kilku artykułach, co każdorazowo odnotowuję w formie przypisów. Nie analizuję natomiast rozważanych zagadnień z perspektywy socjologii wiedzy. Wiele bowiem o komputerach obecnych w przestrzeni społecznej już powiedziano. Analizowano także tzw. społeczeństwo sieci w kontekstach socjologicznych. Kluczowe dla niego, jak powszechnie wiadomo, jest użycie urządzeń cyfrowych do wspomaganie procesów komunikacji. Większość z nich zaś wiąże się z globalnym narzędziem komunikacyjnym, jakim jest Internet. O jego roli w tego rodzaju procesach napisano już tak wiele, że tym zagadnieniem również nie będę zajmował się w niniejszej monografii.

Ważną kwestią jest nie tylko komunikacja interpersonalna wspomaganą przez Internet. Istnieje także literatura poświęcona optymalizacji procesów komunikacji: człowiek – maszyna cyfrowa (komputer). To istotne zagadnienie stanowi przedmiot badań wielu inżynierów, programistów, filozofów,

kognitywistów oraz specjalistów w zakresie sztucznej inteligencji. Jednakże w sposób znaczący nie wiąże się ono z zasadniczą problematyką mojej książki.

W pracy nie pokusiłem się także o próbę odpowiedzi na pytanie, czy cyfrowa rewolucja w badaniach naukowych może być porównywana do tej, która doprowadziła do powstania nowożytnej nauki. Taka próba wymagałaby sięgnięcia do prac historyków nauki zajmujących się problematyką powstania nowożytnej nauki, np. Herberta Butterfielda, Alistaira Camerona Crombiego, Alfreda Ruperta Halla, Aleksandra Koyrégo. Ci autorzy stosowali inne i mniej sprecyzowane kryteria rewolucji naukowej niż przywoływani przeze mnie filozofowie nauki. Dlatego dokonanie porównania obu rewolucji wymagałoby odrębnego, obszernego studium. Należy również zauważyć, że rewolucja komputerowa w nauce ciągle się dokonuje i trudno powiedzieć, do jakich zmian, w praktyce eksperymentalnej i teoretycznej nauki, doprowadzi.

* * *

Początki mojego zainteresowania problematyką komputerowego wspomagania badań doświadczalnych związane były z lekturą trzech inspirujących książek, z którymi zapoznałem się w drugiej połowie lat dziewięćdziesiątych XX wieku. Pierwszą z nich była *Sztuka badań eksperymentalnych* Danuty Sobczyńskiej⁴, otwierająca przede mną problematykę filozofii eksperymentu. Drugą była praca zbiorowa pod redakcją Danuty Sobczyńskiej i Pawła Zeidlera *Nowy eksperymentalizm – teoretycyzm – reprezentacja*⁵, dzięki której odkryłem dla siebie nowy eksperymentalizm. Trzecią natomiast – książka Juliusza Lecha Kulikowskiego *Komputery w badaniach doświadczalnych*⁶, w której autor przekonał mnie, że komputery już pod koniec XX wieku były niezbędną częścią aparatury eksperymentalnej.

Jestem także niezmiernie wdzięczny wszystkim tym osobom, dzięki którym niniejsza książka ukazuje się w obecnej formie. Pierwotną wersję tekstu zechcieli przeczytać profesor Paweł Zeidler i doktor Mariusz Szynekiewicz. Ich ważne i cenne uwagi przyczyniły się do poprawienia wielu merytorycznie ważnych niejednoznaczności. Te same podziękowania kieruję do recenzenta wydawniczego profesora Marka Sikory – jego rzetelność pomogła mi usunąć wiele błędów, których sam nie byłem w stanie dostrzec. Wiele inspirujących uwag usłyszałem także od uczestników Seminarium Zakładu Logiki i Metodologii Nauk Instytutu Filozofii UAM (szczególnie doktorów

⁴ D. Sobczyńska, *Sztuka badań eksperymentalnych*, Wydawnictwo Naukowe IF UAM, Poznań 1993.

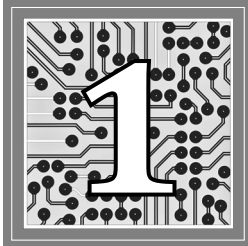
⁵ D. Sobczyńska, P. Zeidler (red.), *Nowy eksperymentalizm – teoretycyzm – reprezentacja*, Wydawnictwo Naukowe IF UAM, Poznań 1994.

⁶ J.L. Kulikowski, *Komputery w badaniach doświadczalnych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993.

Radosława Kazibuta i Jarosława Boruszewskiego). Były one pomocne podczas redagowania niniejszej książki, a wiele z nich z pewnością wykorzystam także w przyszłości podczas rozwijania swojej koncepcji.

Osobne podziękowania kieruję do wszystkich osób, które – w ten czy inny sposób – wspierały mnie podczas pisania książki. Szczególnie wdzięczny jestem żonie Emilii, która cierpliwie znosiła moje wielogodzinne ślęczenie przed komputerem. Dziękuję także za wsparcie duchowe wszystkich pozostałych życzliwych mi osób, szczególnie przyjaciół z *Koinonia Giovanni Battista*.

ROZDZIAŁ



Metodologia badań eksperymentalnych

We współczesnej filozofii nauki niemalże powszechnie przyjmuje się, że teoria naukowa jest zasadniczą jednostką strukturalną wiedzy, gdyż w jej ramach przeprowadza się wszystkie podstawowe procedury badawcze, np. sprawdzanie, przewidywanie i wyjaśnianie. Historię nauk empirycznych sprowadza się zatem do historii teorii formułowanych w ramach tych nauk. Filozofia nauki zaś staje się głównie metodologiczną i filozoficzną refleksją nad teoriami naukowymi. „Określając powyższą tendencję mianem teoretycyzmu, można postawić tezę, iż stanowi on podstawowy paradygmat filozofii nauki, ukształtowany już przez konwencjonalistów, a rozwinięty w neopozytywizmie i hipotetyzmie”¹.

Praktyka eksperymentalna współczesnych nauk empirycznych jest również analizowana przez zwolenników tego teoretycystycznego paradygmatu w kontekście teorii naukowych. To właśnie teorie powinny określać możliwości przeprowadzania eksperymentów, zasady budowy aparatury badawczej oraz sposoby interpretacji wyników, które zostały uzyskane podczas badań eksperymentalnych. Jednakże teoretycyzm, jeśli zestawia się go z rzeczywistą praktyką badawczą, jawi się jako mocno nieadekwatny opis tej praktyki. Praktyka eksperymentalna wykracza bowiem poza ramy wyznaczone dla niej przez teoretycyistów. Skłoniło to Hackinga do zaproponowania nowego programu uprawiania filozoficznej refleksji nad nauką, który został później określony nazwą „nowy eksperymentalizm”².

¹ P. Zeidler, *Nowy eksperymentalizm a teoretycyzm. Spór o przedmiot i sposób uprawiania filozofii nauki*, [w:] D. Sobczyńska, P. Zeidler (red.), *Nowy eksperymentalizm...*, s. 87.

² Nowy eksperymentalizm zapoczątkowała monografia I. Hackinga, *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science*, Cambridge University Press, New York–Cambridge 1983. Por. R. Ackerman, *The New Experimentalism*, „Brit. J. Phil. Sci.” 1989, no. 40, s. 185.

Nowy eksperymentalizm tworzą filozofowie przekonani do tego, że należy prowadzić filozoficzną refleksję nad naukami empirycznymi, wychodząc od analizy rzeczywistej praktyki eksperymentalnej, i w jej kontekście rozpatrywać teoretyczną praktykę naukową. Widać zatem, że przedstawiciele nowego eksperymentalizmu zaproponowali zasadniczą zmianę perspektywy, w ramach której przeprowadza się filozoficzne analizy nauk empirycznych.

Współczesna praktyka eksperymentalna jest jednak wspomagana komputerowo. Warto zatem przypomnieć podstawowe tezy nowego eksperymentalizmu, aby możliwa była odpowiedź na pytanie o to, czy nowy eksperymentalizm jest stanowiskiem metodologicznym adekwatnym w kontekście systemów komputerowego wspomagania badań doświadczalnych. Ponadto włączenie komputera w układ eksperymentalny jeszcze bardziej wyodrębia opozycję eksperymentalizmu wobec tradycji teoretyczystycznej, w ramach której rola komputerów jest w zasadzie pomijana.

1.1. Teoretycyzm a eksperymentalizm

Dla zdecydowanej większości filozofów nauki oczywiste jest, że teoria to podstawowa jednostka strukturalna wiedzy w ramach dyscyplin empirycznych. „Teoretycyzm jest stanowiskiem, którego zwolennicy uważają, iż zmatematyzowane nauki empiryczne są zbiorem teorii, a teorie naukowe są dobrze zdefiniowanymi przedmiotami”³.

Prototeorie pojawiały się już w starożytności, kiedy to pod wpływem geometrii Euklidesa próbowano nadawać różnym fragmentom wiedzy empirycznej postać systemów quasi-dedukcyjnych. René Descartes (Kartezjusz) w XVII wieku postulował także stosowanie metody dedukcyjnej w nowożytnych naukach przyrodniczych. Idea ta została zrealizowana nieco później przez Isaaca Newtona i Josepha Louisa Lagrange’a w systemach mechaniki, które zaproponowali.

Do ugruntowania teoretyczystycznej wizji nauk empirycznych przyczyniło się ich zmatematyzowanie. Umożliwiło to metodologom dokonywanie logicznych rekonstrukcji wiedzy empirycznej i nadawanie jej postaci sformalizowanych systemów dedukcyjnych. Ten sposób analizowania nauk empirycznych został ukształtowany w decydujący sposób przez neopozytywistyczne badania nad rekonstrukcją języka tych teorii w języku rachunku predykatów pierwszego rzędu. W ten sposób teoria stała się tworem językowym, ujmowanym jako sformalizowany system dedukcyjny zamknięty ze względu na relację konsekwencji logicznej, do analizy którego należało stosować metody metamatematyki wypracowane w szkole Hilberta. Rozwój semantyki logicznej

³ P. Zeidler, *Nowy eksperymentalizm...*, s. 89.

pozwoił na semantyczną interpretację sformalizowanej i zaksjomatyzowanej teorii empirycznej. Jednakże interpretacja ta mogła mieć tylko częściowy charakter ze względu na występowanie oprócz terminów obserwacyjnych, które posiadały interpretację empiryczną, również terminów teoretycznych, które nie miały jednoznacznej interpretacji empirycznej, a którą próbowano im nadać poprzez różne próby definiowania ich w języku obserwacyjnym. Dzięki pracom Rudolfa Carnapa przyjęto tzw. kanoniczny model teorii empirycznej, według którego jest ona koniunkcją postulatów teoretycznych oraz reguł korespondencji nadających teorii treść empiryczną⁴. Wszystkie podstawowe procedury badawcze (sprawdzanie, przewidywanie oraz wyjaśnianie) odnoszono do tak zrekonstruowanej teorii. Bazowały one na poszukiwaniu relacji wynikania logicznego między zdaniami teorii empirycznej a zdaniami zdającymi sprawę z obserwacji i eksperymentów. Tak rozumiany sposób rekonstrukcji teorii empirycznej charakteryzował również hipotetyzm Karla Raimunda Poppera.

Zarysowane wyżej, tzw. zdaniowe podejście do konstruowania teorii nie jest jedynym sposobem realizacji paradygmatu teoretycystycznego w filozofii nauki. Od lat sześćdziesiątych XX wieku w filozofii nauki zaczęły się pojawiać próby rekonstruowania teorii jako tworów niezdaniowych. W tym nurcie teoria naukowa jest co prawda nadal podstawową jednostką strukturalną wiedzy, ale nie jest już rekonstruowana jako klasa zdań spełniających określone warunki formalne. Pozalingwistyczne struktury teorii naukowych ujmuje się: za pomocą definicji odpowiednich predykatów teoriomnogościowych (Patrick Suppes, Joseph D. Sneed, Wolfgang Stegmüller), jako przestrzenie stanów (Evert Willem Beth, Bastian Cornelis van Fraassen) lub jako systemy relacyjne (Frederick Suppe). Strukturalna koncepcja teorii Sneeda i Stegmüllera charakteryzuje się najbardziej rozbudowanym aparatem pojęciowym, umożliwiającym analizę wielu szczegółowych problemów filozofii nauki.

Główna różnica pomiędzy zdaniową a niezdaniową koncepcją teorii Sneeda i Stegmüllera polega na tym, że ta ostatnia lepiej oddaje relacje, jakie zachodzą między teorią a danymi empirycznymi ustalonymi na podstawie przeprowadzanych obserwacji i eksperymentów. W koncepcji niezdaniowej uwzględnia się to, iż w praktyce badawczej większość zmian zawartości empirycznej teorii wcale nie oznacza zmiany jej podstawowego aparatu konceptualnego. W ujęciu zdaniowym natomiast, w którym zmiana treści empirycznej teorii oznacza zmianę zbioru zdań protokolarnych lub bazowych (w sensie Poppera), ze względu na istnienie związków logicznych między zdaniami teorii a zdaniami faktualnymi, każde nowe zdanie bazowe zmienia całą teorię⁵.

⁴ Por. R. Carnap, *The Methodological Character of Theoretical Concepts*, [w:] H. Feigl, M. Scriven (eds), *Minnesota Studies in the Philosophy of Science. The foundations of science and the concepts of psychology and psychoanalysis*, vol. 1, University of Minnesota Press, Minneapolis 1956, s. 38–76.

⁵ Por. P. Zeidler, *Nowy eksperymentalizm...*, s. 91–92.

Zmiana sposobu rekonstrukcji struktury teorii empirycznej, jaka zaszła w ramach teoretycyzmu, nie miała jednak dużego wpływu na ujęcie roli praktyki eksperymentalnej w naukach empirycznych. Ograniczano ją tylko do sytuacji, w których dokonuje się wyboru między rywalizującymi teoriami lub do procedury uzasadniania teorii naukowych. Wskazywano także, pod wpływem hipotetyzmu Poppera, na mocne uzależnienie eksperymentu od teorii. Teoretyczny charakter działalności eksperymentalnej miał wyrażać się w tym, że to właśnie teoria wyznaczała cele eksperymentu i sposoby jego przeprowadzenia. Na bazie teorii zbudowana była aparatura eksperymentalna, a ponadto to właśnie teoria umożliwiała interpretację otrzymywanych wyników. Przełamanie takiego stereotypowego podejścia do relacji teoria–eksperyment okazało się możliwe dopiero wtedy, gdy filozofowie nauki zaczęli analizować czynności badawcze, a nie tylko ich wytwory (teorie). Stało się to za sprawą filozofów nauki zaliczanych do nurtu *problem-solving activity*.

Przedstawiony przez Poppera model rozwoju nauki, w ramach którego rozwiązaniem wyjściowego problemu badawczego jest wstępna hipoteza teoretyczna, poddawana krytycznym testom, prowadzącym w razie jej falsyfikacji do modyfikacji wyjściowego problemu, wskazuje, że autor ten był jednym z twórców orientacji *problem-solving activity*. Warto jednak zwrócić uwagę na to, iż zarówno problemy badawcze, jak i hipotezy teoretyczne będące ich rozwiązaniem zalicza Popper do obiektów trzeciego świata. Samo rozwiązywanie problemów jest co prawda procesem intelektualnym przebiegającym w drugim świecie, ale zachodzi na obiektach trzeciego świata. Warto także podkreślić, że w wizji Poppera rozwój nauki nie następuje jako konsekwencja działań uczonych podejmowanych w pierwszym świecie. Tak więc propozycja Poppera nie była czymś zupełnie nowym, nie postulowała odejścia od zdaniowego sposobu rekonstrukcji teorii naukowych.

Taka zmiana dokonała się dopiero u Kuhna, który mówi o teorii naukowej jako aparacie konceptualnym stosowanym do rozwiązywania problemów badawczych. Autor *Struktury rewolucji naukowych* zakwestionował również inne ważne cechy wcześniejszych metodologicznych rekonstrukcji teorii naukowych. Poddał w wątpliwość dystynkcje teoretyczno-obszerności w odniesieniu do jej aparatu pojęciowego, wyłącznie kumulatywistyczną i jedynie hipotetyczną koncepcję rozwoju nauki, wizję metodologicznej jedności nauki oraz możliwość rozdzielenia kontekstu odkrycia od kontekstu uzasadniania. Stanowisko Kuhna mieści się jednak w dalszym ciągu w ramach teoretycyzmu, choć sam autor posługuje się raczej pojęciem paradygmatu, a nie teorii. Warto przypomnieć, że oba te pojęcia nie są precyzyjnie scharakteryzowane przez autora i czasami bywają używane zamiennie. Jeśli termin „paradygmat” oznacza typowe przykłady rozwiązywania łamigłówek nauki normalnej, to łamigłówki te stanowią problemy

badawcze powstające w trakcie praktyki eksperymentalnej, ale wyznaczone przez ogólne założenia o charakterze teoretycznym, a ich rozwiązania przedstawiane są w ramach obowiązujących teorii. Z inną sytuacją mamy do czynienia wtedy, gdy w ramach badań eksperymentalnych dochodzi do odkryć naukowych, które prowadzą do anomalii na gruncie dotychczas obowiązującego paradygmatu. Wykrycie tego typu anomalii następuje najczęściej w przypadkowy sposób podczas badań w ramach nauki normalnej. Może to doprowadzić do sformułowania nowych koncepcji teoretycznych, a w niektórych przypadkach – może zapoczątkować konstytuowanie się nowego paradygmatu.

Thomas Kuhn oraz Paul Feyerabend w swoich pracach sformułowali tezę o niewspółmierności, która stała się jednym z podstawowych argumentów używanych w celu podważania teorii reprezentacji. Teza ta oraz analizy przykładów z dziejów nauki skłoniły Larry'ego Laudana do rezygnacji z klasycznego pojęcia prawdy jako celu badań naukowych. Według tego autora najważniejszym celem poznawczym nauki jest rozwiązywanie problemów. Postęp nauki określa się stosunkiem problemów rozwiązanych do tych, których jeszcze nie udało się rozwiązać. Działanie racjonalne w nauce to dla Laudana postępowanie maksymalizujące postęp naukowy. Filozof ten wyróżnia dwa typy problemów: pojęciowe (wewnętrzne problemy teorii lub tradycji badawczych) i empiryczne (dotyczące świata dostępnego podczas badań empirycznych). Rozwiązanie problemów empirycznych świadczy, według Laudana, o postępie naukowych tradycji badawczych i jest oceniane z perspektywy konkurencyjnych teorii i tradycji badawczych. Tym samym jest to ujęcie teoretycystyczne⁶.

Próba zasadniczego przewartościowania relacji między teoretycznymi a eksperymentalnymi badaniami naukowymi została podjęta dopiero przez twórcę nowego eksperymentalizmu. Jednakże eksperymentalistyczne ujęcie badań naukowych rozwijało się już wcześniej. Sama nazwa „nowy eksperymentalizm” sugeruje, że przed pojawieniem się tego kierunku musiał istnieć inny, jakiś „stary” eksperymentalizm, który zostaje zastąpiony, czy też istotnie zmodyfikowany przez ten nowy.

Istotny dla nauki rozwój metody eksperymentalnej zaczął się w okresie odrodzenia. Wprawdzie starożytność i średniowiecze znały już wiele eksperymentów, jednakże pomysłowe doświadczenia takich badaczy, jak Archimedes, Eratostenes czy Hipokrates, nie doprowadziły do powstania metody eksperymentalnej w nauce. Ważnym tego powodem było z pewnością to, że eksperyment antyczny był eksperymentem jakościowym; poprzestawał

⁶ Szersze omówienie złożonej koncepcji Laudana można znaleźć w: W. Sady, *Larry Laudana modele racjonalności*, „Colloquia Communia” 1991, nr 1-3, s. 95-118.

na stwierdzaniu określonych aspektów jakościowych zjawisk, a niekiedy – na stwierdzaniu zmian jakościowych⁷.

Francis Bacon powszechnie uchodzi za prekursora filozofii i metodologii eksperymentu. W refleksji lorda Verulamusa występuje kilka elementów definiujących praktykę eksperymentalną i decydujących o jego mocy poznawczej. Po pierwsze, ważne jest świadome i celowe wytwarzanie przez badacza sytuacji eksperymentalnej, niezależne od badania i opisywania naturalnych zjawisk przyrody. Po drugie, w eksperymentowaniu konieczne jest użycie narzędzi eksperymentalnych, dzięki którym przyroda ujawnia swoje tajemnice. Po trzecie, eksperyment musi być przedsięwzięciem twórczym, przebiegającym według schematu: badacz obmyśla eksperyment, przeprowadza go i analizuje. Po czwarte, istnieją eksperymenty posiadające szczególną wagę oraz moc rozstrzygającą pomiędzy dwiema różnymi interpretacjami danego zjawiska (eksperymenty krzyżowe lub rozstrzygające)⁸. Warto dodać, że Bacon zajmował realistyczne stanowisko co do istnienia obiektów badanych w doświadczeniu. Cechował go również optymizm dotyczący możliwości poznawczych badań prowadzonych przy użyciu metody doświadczalnej⁹.

Można by oczekiwać, że duże znaczenie badań eksperymentalnych w nauce powinna ugruntować rozwijająca się intensywnie w wiekach XVIII i XIX argumentacja empirystów angielskich. Jednakże tak się nie stało. Zwłaszcza po pracach George'a Berkeleya i Davida Hume'a zrezygnowano także z realistycznej interpretacji danych doświadczenia zmysłowego. Realizm zarezerwowano tylko dla samych wrażeń konstytuujących to doświadczenie. Postawę tę przejął pozytywizm i wywodzące się z niego kierunki¹⁰.

Ernst Mach, prekursor pozytywizmu, a zarazem pracujący teoretycznie i doświadczalnie fizyk, jest autorem koncepcji, którą można określić jako behawioralno-ewolucjonistyczną. Teoria ta bazowała na założeniu o wrodzonym podłożu działań o charakterze badawczo-eksperymentalnym. Człowieka, według Macha, łączy ze światem zwierzęcym instynkt badania, testowania, ulepszania, zaś eksperymentowanie pomaga uporządkować świat wrażeń, ustala w nim hierarchię, umożliwia orientację, a nawet przewidywanie. Od eksperymentowania ludzkiego eksperymentowanie zwierzęce różni się tylko zakresowo i treściowo. W obu jednak przypadkach jednostki dziedziczą po przodkach pewną wiedzę gatunku, która jest bardziej ogólna i prospektywna

⁷ Por. J. Such, *Eksperyment*, [w:] M. Iżewska (red.), *Filozofia a nauka. Zarys encyklopedyczny*, Wydawnictwo PAN, Wrocław-Warszawa-Kraków-Gdańsk-Łódź 1987, s. 129–131.

⁸ Por. D. Sobczyńska, *Wokół filozofii eksperymentu. Poglądy „nowego eksperymentalizmu”*, [w:] J. Such, J. Wiśniewski (red.), *Teoria i eksperyment*, Wydawnictwo Naukowe IF UAM, Poznań 1992, s. 7–8.

⁹ Por. F. Bacon, *Novum Organum*, PWN, Warszawa 1955.

¹⁰ Por. D. Sobczyńska, *Nowy eksperymentalizm i jego miejsce w refleksji nad eksperymentem naukowym*, [w:] D. Sobczyńska, P. Zeidler (red.), *Nowy eksperymentalizm...*, s. 57–59.

niż doświadczenie indywidualne. Owa wiedza instynktowna poucza, według tego uczonego, przede wszystkim o tym, co zdarzyć się nie może, chroni więc badacza przed niektórymi działaniami empirycznymi. Bywa także użyteczna w eksperymentowaniu myślowym (poczucie absurdu płynące z wiedzy gatunku chroni przed przyjmowaniem fałszywych założeń i przed błędnymi interpretacjami). Teoria w systemie Macha nie odgrywa szczególnej, wyróżnionej roli. Podsumowuje ona tylko wiedzę empiryczną, uogólnia doświadczenie oraz pozwala na przewidywanie¹¹.

Inną pod wieloma względami koncepcję naukowych czynności badawczych proponuje Hugo Dingler. Jego koncepcja eksperymentu – empiryczny aprioryzm matrycowy – oscyluje między pozytywizmem, fikcjonalizmem a kantyzmem. Wpływy Kantowskie są w niej zarysowane najwyraźniej, gdyż Dingler mówi o aprioryczności elementarnych postaci form oraz elementarnych postaci działań. Owe postacie elementarne wyposażają badacza w swego rodzaju matryce umysłowe, za pomocą których może on prowadzić badania przyrodnicze. Metoda koincydencji, którą proponuje autor, polega na budowaniu idealnych wzorców umysłowych, idealizacji, i nadawaniu im materialnej postaci, realizacji, w drodze wytwarzania sprzętu badawczego¹².

Dla Macha eksperymentowanie wyrastało z ewolucjonistycznej koncepcji człowieka i włączało badacza w porządek natury. Dla Dinglera pozostaje ono sztuczne, jako realizowane w sztucznym układzie eksperymentalnym. W eksperymencie bowiem występują dwa porządki: naturalny (pochodzący od przyrody) i sztuczny (techniczny – pochodzący od człowieka). Według owego filozofa badacz wchodzi w relacje tylko z drugim z tych porządków.

Filozoficzna perspektywa postrzegania eksperymentu pojawiła się w ramach pozytywizmu, konwencjonalizmu, operacjonizmu oraz pragmatyzmu. Niezależnie od różnic dzielących te koncepcje, w jednej kwestii pozostaje wspólna: realność obiektów badanych w eksperymencie (zwłaszcza mikroobektów) bądź jest negowana, bądź przyjmowana na mocy tezy o ekonomii myślenia, a wreszcie – poddawana różnym ograniczeniom.

We współczesnej refleksji nad eksperymentem naukowym mamy do czynienia z kilkoma różnymi perspektywami badawczymi: metodyczno-metodologiczną, historyczną, socjologiczną i filozoficzną (tutaj zaliczyć można prace nowych eksperymentalistów)¹³. Nurt metodyczno-metodologiczny jest wyrazem rosnącej samoświadomości naukowców eksperymentatorów. Próbując rozwiązać różne problemy związane z przygotowaniem, przeprowadzaniem i analizą eksperymentów, naukowcy opracowali wiele strategii eksperymentalnych. Pierwsze tego rodzaju usiłowania, wyrażające się

¹¹ Por. D. Sobczyńska, *Sztuka badań...*, s. 11-12.

¹² Por. D. Sobczyńska, *Wokół filozofii eksperymentu...*, s. 10-12.

¹³ Por. D. Sobczyńska, *Nowy eksperymentalizm...*, s. 62-66.

w formie zaleceń, odnotować można w pracach Francisa Bacona, Johna Stuarta Milla, Auguste'a Comte'a i Williama Herschela. Jednakże strategie te, oparte na rozmaitych kanonach indukcji, okazały się niewystarczające w odniesieniu do złożonych badań. Nowocześniejsze metody planowania badań doświadczalnych pochodzą od Ronalda Aylmera Fishera i zostały opracowane pod koniec lat dwudziestych ubiegłego wieku. Bazują na losowości procedur eksperymentu oraz na badaniu wpływu grup czynników na badane zjawiska zamiast na badaniu wpływu pojedynczego czynnika, co proponowano w metodach opartych na klasycznej indukcji. Zasadą takich eksperymentów czynnikowych jest stosowanie metod statystycznych nie tylko przy opracowywaniu wyników eksperymentów, lecz włączenie ich także do planowania, doboru prób i kolejności procedur eksperymentalnych¹⁴.

W badaniach z zakresu historii nauki pojawił się zwrot ku historii eksperymentu. Niestety, trudno jest współcześnie dokładnie odtworzyć tajniki historycznych prac eksperymentalnych, aby zrozumieć wszystkie trudności praktyczne, które musieli pokonać badacze, aby dojść do określonych wyników. Z zaniedbanej historii dawnych eksperymentów można wyciągnąć wnioski, że należy pisać ich historię, gdy dostępne są wszystkie źródła i ekspozyty, gdy żyją twórcy przełomowych badań, ich uczestnicy i świadkowie. Wyrazem zrozumienia tego postulatu są historie eksperymentalne związane z ostatnią rewolucją w fizyce – teorią względności i mechaniką kwantową.

Nowa historia i socjologia nauki to kierunek badawczy powstały w latach sześćdziesiątych XX wieku. Jego przedstawiciele traktują naukę jako wynik zbiorowego wysiłku społeczności uczonych oraz z perspektywy relacji osobowych łączących ludzi przeprowadzających duże, wieloetapowe eksperymenty. Celem nowej orientacji badawczej NHS (*new history and sociology of science*)¹⁵ jest między innymi zrozumienie natury i istoty eksperymentu¹⁶. Nurt NHS określane jest niekiedy mianem socjologii wiedzy. Zwolennicy tzw. silnego programu socjologii wiedzy utrzymują, że treść wiedzy naukowej oraz jej zmiany można zrozumieć i wyjaśnić jedynie w kategoriach społecznych i poznawczych interesów naukowców. Wśród zwolenników skrajnej wersji konstruktywizmu społecznego panuje przekonanie, że nauka jest wyłącznie konstruktem społecznym, a jej rezultaty poznawcze są wynikiem konkurencji pomiędzy grupami uczonych lub realizacją interesów społeczności naukowych¹⁷. „Wiedza naukowa ujmowana według konstruktywizmu społecznego

¹⁴ Więcej o współczesnej teorii eksperymentu znaleźć można we wprowadzeniu do rozdziału 2.

¹⁵ Por. D. Collins, S. Shapin, *Experiment, Science Teaching and the New History and Sociology of Science*, [w:] M. Shortland, A. Warwick (eds), *Teaching the History of Science*, Blackwell, Oxford 1989.

¹⁶ Por. M. Shortland, A. Warwick (eds), *Teaching the History...*

¹⁷ Por. R.N. Giere, *Explaining Science. A Cognitive Approach*, The University of Chicago Press, Chicago-London 1988, s. 2.

nie mówi nic o świecie (ten ma być jej przedmiotem tylko rzekomo), lecz jedynie o badających go społecznościach i o konkurencji pomiędzy grupami naukowców realizujących podobne zadania poznawcze¹⁸. Z taką wizją pracy naukowej polemizują przedstawiciele nowego eksperymentalizmu¹⁹, choć – jak wiadomo – nie jest to jedyny wariant konstruktywizmu społecznego²⁰. „Wśród stanowisk konstruktywistycznych wymienia się najczęściej te, które przedstawili Karin D. Knorr Cetina i Bruno Latour. (...) Każde z nich wyraża odmienną wersję konstruktywizmu. Knorr Cetina bardzo mocno akcentuje wpływ czynników społecznych na otrzymywane w procesie badawczym wytwory. Latour zaś zwraca uwagę, że wytwory te zależą nie tylko od czynników społecznych, ale także od wielu innych²¹. W tego typu słabszych wersjach konstruktywistycznego podejścia do nauki²² postuluje się szczegółowy opis praktyki naukowej, wnikliwą analizę podejmowanych przez uczonych w trakcie prac badawczych działań, a nie tylko – jak w tradycji teoretyczystycznej – analizę wytworów tych działań.

Jeszcze inne ujęcia konstruktywizmu, pośrednio związane z naukami empirycznymi, a bezpośrednio z innowacjami technologicznymi, to na przykład SCOT i EPOR. SCOT (ang. *Social Construction of Technology*) to program badań nad społecznym konstruowaniem technologii, który proponował zastosowanie narzędzi i koncepcji empirycznego programu relatywizmu do problematyki technologii²³. EPOR (ang. *Empirical Programme of Relativism*) natomiast to empiryczny program relatywizmu podejmujący próbę sproblematyzowania technologii. W jego ramach wpływ świata materialnego nie występuje w spektrum wyjaśnień tego, co zachodzi w obrębie nauki²⁴. Tak rozumiany konstruktywizm społeczny nie pozwala jednak „zrozumieć, jak inżynierowie budują (konstruują) działające urządzenia. Ujawnia tylko, w jaki sposób dokonuje się selekcja poszczególnych projektów, prototypów

¹⁸ M. Czarnocka, *Koncepcja eksperymentu Allana Franklina. Nowy eksperymentalizm na rozdrożu?*, [w:] D. Sobczyńska, P. Zeidler (red.), *Nowy eksperymentalizm...*, s. 111.

¹⁹ Por. A. Franklin, *The Neglect of Experiment*, Cambridge University Press, Cambridge 1986, s. 103–137; tegoż, *Experiment. Right Or Wrong*, Cambridge University Press, Cambridge 1990, s. 99–197.

²⁰ Różne warianty konstruktywizmu społecznego omówione zostały w pracy: S. Sismondo, *An Introduction to Science and Technology Studies*, Wiley-Blackwell, Oxford 2010, s. 57–71.

²¹ M. Sikora, *Problem reprezentacji poznawczej w nowożytnej i współczesnej refleksji filozoficznej*, Wydawnictwo Naukowe IF UAM, Poznań 2007, s. 132–133.

²² Określa się je mianem socjologii wiedzy naukowej (SSK – ang. *Sociology of Science*), studiami nad nauką i techniką (STS – ang. *Science and Technology Studies*) lub społecznymi badaniami nad nauką (SSS – ang. *Social Studies of Science*). Por. tamże, s. 22–24.

²³ Por. Ł. Afeltowicz, *Laboratoria w działaniu. Innowacja technologiczna w świetle antropologii nauki*, Oficyna Naukowa, Warszawa 2011, s. 168–169.

²⁴ Por. tamże, s. 80–82; E. Bińczyk, *Technonauka w społeczeństwie ryzyka. Filozofia wobec niepożądanych następstw praktycznego sukcesu nauki*, Wydawnictwo Naukowe UMK, Toruń 2012, s. 169–170.

i gotowych artefaktów. (...) Język socjologii nie pozwala (...) zrozumieć, w jaki sposób naukowcom i inżynierom udaje się sprawić, że bomby wybuchają, samochody jeżdżą, szczepionki uodparniają, a lodówki chłodzą”²⁵. Problem ten został zaniedbany przez socjologów wiedzy naukowej, ale również nie przedstawiono jego rozwiązania w ramach teoretyczystycznej filozofii nauki²⁶.

Warto także dodać, że filozofia eksperymentu to nie tylko – wspomniany już – nowy eksperymentalizm. Na gruncie polskim zagadnieniem tym zajmowali się wcześniej: Jan Such rozważający znaczenie i rolę eksperymentów rozstrzygających²⁷, Jerzy Szymański analizujący rolę technicznych środków poznania naukowego²⁸, Leszek Nowak omawiający metodę idealizacji i stopniowej konkretyzacji mającą znaczenie dla zrozumienia relacji zachodzących między eksperymentalnym a teoretycznym poziomem badań²⁹, Małgorzata Czarnocka opisująca doświadczenie w nauce i epistemologię eksperymentu³⁰. Warto zaznaczyć, że większość z tych prac powstała, zanim pojawiła się książka Hackinga *Representing and Intervening*, którą uważa się za pracę wyznaczającą program nowego eksperymentalizmu.

Filozoficzne i metodologiczne analizy eksperymentu niewątpliwie są obecne w literaturze drugiej połowy XX wieku. Składają się na nie elementy wiedzy o strategiach eksperymentalnych powstałe w obrębie nauk przyrodniczych i technicznych, odtwarzana wiedza historyczna dotycząca ważnych eksperymentów, dorobek badaczy spod znaku NHS oraz dawne i współczesne filozofie eksperymentu. W kontekście tych dokonań powstała nowa filozofia nauki – nowy eksperymentalizm.

1.2. Nowy eksperymentalizm

Ian Hacking, Peter Galison, Allan Franklin to filozofowie nauki, którzy dowartościowali rolę eksperymentu w badaniach naukowych. Reprezentują oni nowy styl uprawiania metodologii. Śledzą osiągnięcia nauki, spisują współczesne historie eksperymentalne związane głównie z fizyką wysokich energii, asystują przy przebiegu eksperymentów, reprezentują wysoki poziom znajomości fizyki i zasad budowy aparatury badawczej.

²⁵ Ł. Afeltowicz, dz. cyt., s. 83.

²⁶ Por. tamże, s. 83–85.

²⁷ Por. J. Such, *Czy istnieje experimentum crucis?*, PWN, Warszawa 1975.

²⁸ Por. J. Szymański, *Rola teorii i techniki w eksperymentalnym testowaniu wiedzy*, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań 1982.

²⁹ Por. L. Nowak, *Wstęp do idealizacyjnej teorii nauki*, PWN, Warszawa 1977.

³⁰ Por. M. Czarnocka, *Doświadczenie w nauce. Analiza epistemologiczna*, Instytut Filozofii i Socjologii PAN, Warszawa 1992.

Nowi eksperymentalisci twierdzą, że w dotychczasowej filozofii i historii nauki mieliśmy do czynienia z lekceważeniem realiów praktyki eksperymentalnej. Hacking postuluje, aby filozofię nauki zaczynać od analizy rzeczywistej praktyki badawczej, a nie tylko skupiać się na analizie jej wytworów. Franklin ukazuje natomiast główne role, jakie eksperyment może odgrywać w pracy badawczej: może dostarczać konfirmacji lub falsyfikacji panującej teorii, pomaga w rozstrzygnięciu między rywalizującymi teoriami lub w zaakceptowaniu danej teorii. Jednakże eksperymenty mogą także wskazywać potrzebę nowej teorii (np. eksperymenty z 1928 i 1930 roku ujawniające zjawisko niezachowania parzystości)³¹.

Jedną z ról eksperymentu jest kreowanie nowych zjawisk, takich, które nie występują w przyrodzie w stanie czystym. Fizycy pod koniec XIX wieku tego rodzaju zjawiska zaczęli nazywać „efektami” (efekt Comptona, fotoelektryczny, piezoelektryczny itd.). Według Hackinga zatem „eksperymentować – znaczy wytwarzać, produkować, doskonalić i stabilizować zjawiska”³². Przeprowadzanie przez naukowców eksperymentów kreujących zjawiska ma dostarczać, zdaniem tego uczonego, podstawowego argumentu na rzecz realizmu. Istnieją te przedmioty, które mogą być użyte w celu wytworzenia nowych zjawisk. Dla Hackinga występuje jednak różnica między realizmem w odniesieniu do przedmiotów teoretycznych (przedmioty postulowane przez teorie istnieją realnie) a realizmem w odniesieniu do teorii (celem teorii jest prawda, a teorie funkcjonujące w nauce zbliżają się do prawdy)³³. Realista w odniesieniu do teorii naukowych to ktoś stosujący względem nich zasadę wiary, nadziei i życzliwości. Natomiast realistą względem przedmiotów teoretycznych badacz staje się w sposób naturalny w trakcie praktyki eksperymentalnej, polegającej na manipulowaniu tymi przedmiotami i kreowaniu nowych zjawisk. „Tylko na poziomie praktyki eksperymentalnej realizm jest nieunikniony – ale ten realizm nie dotyczy teorii i prawdy. Eksperymentator powinien jedynie być realistą co do obiektów zastosowanych jako narzędzia”³⁴.

Oprócz argumentu z interweniowania, nowi eksperymentalisci przytaczają kilka innych argumentów dotyczących realizmu w odniesieniu do przedmiotów praktyki eksperymentalnej (argument z niepewności teorii, z rozszerzania w dzisiejszej nauce pojęcia obserwowalności, argumenty technologiczne, argumenty z demaskowania artefaktów). Teorie naukowe bywają hipotetyczne, wybiórcze, uwzględniają zazwyczaj wybrany aspekt złożonych

³¹ Por. A. Franklin, *The Neglect...*, s. 103–137.

³² I. Hacking, *Representing and Intervening...*, s. 230.

³³ Realizm Hackinga szczegółowo został przedyskutowany w monografii: P. Giza, *Realizm Iana Hackinga a konstruktywny empiryzm Basa C. van Fraassena*, Wydawnictwo UMCS, Lublin 1990, s. 48–86.

³⁴ I. Hacking, *Representing and Intervening...*, s. 160.

zjawisk. Jedno zjawisko może zostać wyjaśnione przez wiele różnych teorii. Realizm dotyczący teorii to raczej optymizm co do jej przyszłych osiągnięć lub ideał, do którego zmierzamy. Realizm odnoszący się do przedmiotów teoretycznych, stwierdza Hacking, obywa się bez optymistycznych prognoz dotyczących przyszłości. Swoją prawomocność opiera bowiem na źródłach płynących z praktyki eksperymentalnej.

W przeciwieństwie do tradycji filozoficznej, która za obserwowalne przedmioty uznaje to, co jest widoczne gołym okiem, fizyk uznaje za nie to, co jest widoczne dzięki całemu szeregowi technik pośrednich (np. za pomocą neutronów możemy obserwować gorące wnętrza gwiazd)³⁵. Filozofia pozytywistyczna uległa fascynacji widzeniem gołym okiem – stworzyła teorię wiedzy według naocznego świadka. Hacking zastanawia się, dlaczego nieprzezroczystość obiektów była i jest tak fascynująca dla wielu filozofów nauki. Według niego współczesna technologia rozszerza na różne sposoby drogi poznania poprzez obserwację, a ponadto – rozszerza granice ludzkiej świadomości i wiedzy.

Nowi eksperymentalisci twierdzą także, że technika i technologia dostarczają środków i sposobów przekonujących o realności, np. mikroobektów. Stosowane w tym celu koncepcje inżynierskie nie zawsze odwołują się do fundamentalnych teorii fizycznych, natomiast często wystarcza tym koncepcjom znajomość operacyjnego sensu owych teorii³⁶. „Jesteśmy zupełnie przekonani o realności elektronów, gdy po prostu przystępujemy do budowania – i często osiągamy w tym sukcesy – nowych rodzajów urządzeń, które wykorzystują dobrze znane przyczynowe własności elektronów, aby oddziaływać w innych, bardziej hipotetycznych obszarach przyrody”³⁷.

Hacking³⁸ i Franklin³⁹ analizują także kwestie „oszustw” produkowanych przez aparaturę badawczą na przykładzie artefaktów mikroskopowych. Każde urządzenie eksperymentalne wytwarza właściwe sobie efekty, zwane ogólnie „szumami”. Efekty te powstają jako wynik pracy samej aparatury bez badanego obiektu. Oczywiście jest, że niepożądane efekty pracy aparatury eksperymentalnej budzą niepokój wśród przyrodników i filozofów nauki. Jednakże zdaniem nowych eksperymentalistów wyolbrzymianie negatywnego znaczenia artefak-

³⁵ Por. tamże, s. 161.

³⁶ „Istnieje ogromna ilość sposobów, dzięki którym wykonujemy instrumenty realizujące przyczynowe własności elektronów w celu wytwarzania wymaganych efektów o nieźrównanej precyzji”, tamże, s. 150.

³⁷ I. Hacking, *Experimentation and Scientific Realism*, [w:] J. Leplin (ed.), *Scientific Realism*, University of California Press, Berkeley-Los Angeles-London 1984, s. 161. Wydanie polskie w tłumaczeniu D. Sobczyńskiej: I. Hacking, *Eksperymentowanie a realizm naukowy*, [w:] D. Sobczyńska, P. Zeidler (red.), *Nowy eksperymentalizm...*, s. 18.

³⁸ Por. I. Hacking, *Do We See through a Microscope?*, [w:] P.M. Churchland, C.A. Hooker, *Images of Science*, Chicago-London 1985, s. 132-152.

³⁹ Por. A. Franklin, *The Neglect...*, s. 226-243.

tów jest niepotrzebne. W funkcjonalno-inżynierskim podejściu do aparatu badawczego znaleźć można bowiem sposoby demaskowania wspomnianych niepożądanych efektów. W odniesieniu do mikroskopów Hacking przedstawia trzy podstawowe sposoby odróżniania artefaktów od obrazów rzeczywistych: na podstawie sieci, na podstawie koincydencji oraz metodę „ślepej próby”⁴⁰.

Do obserwacji mikroskopowej różnych obiektów przygotowuje się skalowane siatki. Rysunek sieci wykonany przez badacza jest poddawany procesowi pomniejszania mikrograficznego, a następnie powiększany pod mikroskopem tyle razy, ile razy był pomniejszony. Osoba korzystająca z mikroskopu otrzymuje obraz sieci o takiej samej jak wyjściowa wielkości oczek. Kontrola badacza nad pracą aparatury – od wykonania siatki do obserwacji obrazu powiększonego – przekonuje go, że obserwuje obraz rzeczywisty, a nie artefakt.

Oprócz mikroskopów optycznych stosowane są współcześnie mikroskopy elektronowe, fluoryzacyjne, polaryzacyjne, akustyczne i inne. Jeśli obraz danego preparatu oglądany w każdym z tych przyrządów wygląda tak samo, stanowi to potwierdzenie rzetelności obrazów pochodzących z różnych mikroskopów i jest argumentem na rzecz stanowiska realistycznego co do obserwowanych przedmiotów. Wzmocnieniem tego argumentu jest fakt, że różne typy mikroskopów działają na podstawie zupełnie różnych praw fizycznych i byłoby dziwne, gdyby różne teorie dotyczące funkcjonowania różnych typów mikroskopów były w ten sposób fałszywe, aby produkować w każdym aparacie dokładnie taki sam artefakt.

Metoda ślepej próby (*calibration*) Franklina⁴¹ polega na tym, że osobno bada się zawieszinę, a osobno preparat w zawieszinie, aby sprawdzić, czy ta ostatnia nie daje sygnału absorpcji w przewidywanym dla próbki zakresie długości fali (np. w spektroskopii IR). Widmo substancji bierze się pod uwagę tylko wtedy, gdy wynik ślepej próby był negatywny. Warto dodać, że analogiczne zabiegi rutynowo wykonuje się w różnych operacjach badawczych⁴².

Filozofię nauki Hackinga zaliczyć można do nurtu *problem-solving activity*, lecz różni się ona zasadniczo od innych koncepcji tego typu (np. Kuhna czy Laudana). Rozwiązywanie problemów badawczych nie jest, w ujęciu Hackinga, rozwiązywaniem łamigłówek nauki normalnej w ramach konkretnego paradygmatu, nie jest również miernikiem teoretycznego postępu nauki. Większość problemów badawczych nauk przyrodniczych to problemy empiryczne

⁴⁰ Por. I. Hacking, *Do We See...*, s. 145–151.

⁴¹ Polską nazwę tej metody powtarzam za: D. Sobczyńska, *Sztuka badań...*, s. 29.

⁴² Do metod demaskowania artefaktów w kontekście systemów komputerowego wspomaganie badań doświadczalnych wróć w podrozdziale 4.1. Dokonam wtedy szczegółowego porównania głównych tez nowego eksperymentalizmu ze współczesną praktyką eksperymentalną wspomaganą komputerowo.

powstające w trakcie eksperymentalnej praktyki badawczej. Hacking osłabia także tezę o całkowitej teoretycznej zależności eksperymentu. Nie twierdzi przy tym, że eksperymentowanie może się obyć bez jakichkolwiek założeń, ale uważa, iż w wielu przypadkach teorie powstawały na bazie preteoretycznych eksperymentów.

Hacking twierdzi, że analiza praktyki badawczej nauk empirycznych sugeruje, iż dominuje w niej praktyka eksperymentalna, a teoretyzowanie nie jest jakąś jednorodną formą pracy naukowej, lecz ulega rozbiciu na szereg działań, takich jak: spekulacja, kalkulacja i budowanie modeli. Spekulacja, w ujęciu Hackinga, stanowi wstępny etap działalności teoretycznej, umożliwiającą zrozumienie rozpatrywanych zjawisk w kategoriach jakościowych. Polega ona na wypracowaniu podstawowych pojęć umożliwiających dokonanie opisu danego zjawiska oraz na poszukiwaniu jego modeli. Modelami mogą być zarówno matematyczne reprezentacje zjawiska, jak i różnego typu modele fizyczne. Ostatni poziom spekulacji stanowią próby wyjaśnienia danego zjawiska na gruncie odpowiednio ogólnej teorii⁴³.

Kolejnym etapem aktywności o charakterze teoretycznym jest dla Hackinga kalkulacja. Polega ona nie tylko na dokonywaniu obliczeń, ale głównie na poszukiwaniu rachunku matematycznego, za pomocą którego można w sposób jednoznaczny eksplikować wielkości fizyczne i – docelowo – obliczać ich wartości. Umożliwia zatem dopasowanie spekulacji do wyników przeprowadzonych badań eksperymentalnych. Matematyka jest dla tego naukowca narzędziem pozwalającym na budowanie modeli badanych zjawisk, eksplikację wielkości pomiarowych i dokonywanie potrzebnych obliczeń.

Budowanie modeli ma – za Nancy Cartwright, na którą Hacking się powołuje – dwie płaszczyzny. Pierwsza dotyczy związków matematycznego formalizmu teorii z modelem zjawiska, druga natomiast obejmuje związki modelu zjawiska ze zjawiskiem danym poprzez ewidencję empiryczną. Modele służą do realizacji rozmaitych celów. Podczas modelowania zjawiska dążymy do jego rozpoznania przy użyciu matematycznej struktury teorii, lecz dla różnych problemów różnie można rozkładać akcenty. Możemy na przykład chcieć obliczyć jakąś wielkość z bardzo dużą dokładnością lub ustalić precyzyjnie jej relacje z inną wielkością. Możemy także chcieć, zamiast przedstawiać wierną kopię jakiegoś zjawiska, opisać je z szczerzej perspektywy, kosztem mniejszej dokładności. Modele zatem zawsze są nieadekwatne i tym samym mają nierealistyczny charakter⁴⁴.

Zdaniem Hackinga badania teoretyczne i odkrycia eksperymentalne w nauce często przebiegają niezależnie i dopiero później są ze sobą łączone, two-

⁴³ Por. I. Hacking, *Representing and Intervening...*, s. 212.

⁴⁴ Por. tamże, s. 210–217; N. Cartwright, *How the Laws of Physics Lie*, Oxford University Press, Oxford 1983, s. 152.

rząc teoretycznie opracowane fakty naukowe (np. odkrycie pozytonów czy promieniowania relikтового⁴⁵). Tak więc rola eksperymentów naukowych nie ogranicza się tylko do sytuacji, w których dokonuje się wyboru między rywalizującymi teoriami, lub do procedur sprawdzania teorii naukowych.

Postulatem nowego eksperymentalizmu jest także przyznanie zasadniczej roli w badaniu naukowym manipulowaniu, działaniu, interweniowaniu (*intervening*) w świat. Działalność naukowców polega zatem w zasadniczej mierze na świadomym interweniowaniu w świat, a w znacznie mniejszym stopniu na jego reprezentowaniu w teoriach naukowych. Hacking wyróżnia dwie wersje tezy o teoretycznym charakterze eksperymentów naukowych⁴⁶. Słaba wersja mówi, że muszą istnieć pewne idee i pojęcia dotyczące zarówno przedmiotu eksperymentu, jak i aparatury, które są niezbędne, aby eksperyment mógł zostać przeprowadzony. Silna wersja głosi, że eksperyment jest istotny tylko w kontekście teorii, którą testuje. Hacking twierdzi, iż zasadniczo trafna jest słaba wersja tezy o teoretycznym charakterze eksperymentów naukowych.

Nowi eksperymentalisci są także zdania, że działalność eksperymentalna w nauce staje się współcześnie dziedziną w dużej mierze autonomiczną. Własne życie eksperymentu przejawia się w różnych płaszczyznach. Jedną z nich jest coraz wyraźniejsza od XX wieku dychotomia „kultur teoretycznych” i „kultur eksperymentalnych”. Drugą płaszczyzną jest bliska łączność pracy eksperymentalnej z techniką i technologią. Płaszczyzną trzecią jest znaczna czasami nie-teoretyczność lub a-teoretyczność praktyki eksperymentalnej (np. PEGGY II)⁴⁷.

Ważną tezę odnoszącą się do nauki, którą odczytać można z *Representing and Intervening*, jest ta, że – wbrew powszechnie obowiązującym opiniom – nauki nie da się sprowadzić jedynie do poznawania i reprezentowania świata. Nauka jest również, według Hackinga, działaniem i interweniowaniem w świat. Proponuje on zatem nową wizję nauki, w której staje się ona nie tyle wiedzą, ile praktyką. Kultura nauki nie ogranicza się zatem tylko do teorii (jak w tradycji empiryzmu logicznego) czy paradygmatów (jak w propozycji

⁴⁵ Jeśli prześledzić historię odkrycia promieniowania relikowego, zawartą m.in. w monografiach: A. Sierotowicz, *Między ewolucyjnym a stacjonarnym obrazem świata. Refleksje z pogranicza historii i filozofii nauki*, Wydział Filozoficzny Towarzystwa Jezusowego w Krakowie, Kraków 1989, oraz tegoż, *Mikrofalowe promieniowanie tła jako experimentum crucis w kosmologii*, Wydział Filozoficzny Towarzystwa Jezusowego w Krakowie, Kraków 1993, to okaże się, że przykład podany przez Hackinga nie jest adekwatny. Odkrycia teoretyczne i eksperymentalne były niezależne, ale tylko to pierwsze było odkryciem promieniowania tła. Drugie było odkryciem szumu zakłócającego transmisję i dopiero przez teoretyków zostało zinterpretowane jako eksperymentalne odkrycie promieniowania relikowego. Bez pracy zespołu Gamowa – Penzias i Wilson byłoby tylko „odkrywcami” szumu anteny rożkowej.

⁴⁶ Por. I. Hacking, *Representing and Intervening...*, s. 153–154.

⁴⁷ Por. I. Hacking, *Experimentation...*, s. 161–170.

Kuhna), lecz składa się na nią wiele różnych elementów wchodzących z sobą w relacje.

Rozwinięciem stanowiska Hackinga z *Representing and Intervening* jest jego artykuł *The Self-Vindication of the Laboratory Science*⁴⁸, gdzie – w kontekście konieczności rozszerzenia kultury naukowej – wprowadza pojęcie nauk laboratoryjnych (węższe od nauk eksperymentalnych). W ramach nauk laboratoryjnych uczeni badają zjawiska, które spowodowane są aktywnością człowieka, które są raczej kreowane niż odkrywane (np. fizyka cząstek elementarnych). Nauki te są stabilne w swoim rozwoju, twierdzi Hacking, polemizując tym samym z poglądami w filozofii nauki, według których nauka rozwija się rewolucyjnie. Nauki laboratoryjne od razu po ich powstaniu zmierzają do wytworzenia pewnego rodzaju samouwierzytelniającej się struktury, która podtrzymuje swoją stabilność⁴⁹. Nie ma to oznaczać, że nauki laboratoryjne są rozumowym lub społecznym konstruktem. Hacking wskazuje, że opierają się na wielu wzajemnie ze sobą powiązanych zależnościach, które zachodzą między zjawiskami naturalnymi; opierają się na określonych ujęciach tych zjawisk za pomocą zakładanej teorii i dostępnej aparatury badawczej generującej dane poddawane analizie.

1.3. Taksonomia prac eksperymentalnych Iana Hackinga

Ian Hacking w *The Self-Vindication of the Laboratory Science* uzasadnia tezę o stabilności nauk laboratoryjnych. Twierdzi, że im większa jest niezależność praktyki eksperymentalnej od teorii fundamentalnych (systematycznych), tym bardziej stabilna jest praktyka badawcza nauk laboratoryjnych. Tym samym przeciwstawia się rozpowszechnionemu przekonaniu, że radykalne zmiany koncepcji teoretycznych, powodujące niewspółmierność paradygmatów, determinują całą praktykę badawczą – również laboratoryjną. Dążąc do scharakteryzowania elementów praktyki laboratoryjnej, które przesądzają o jej stabilności, wyróżnił trzy ich podstawowe grupy. Pierwsza stanowi szeroko rozumianą teoretyczną (myślową) bazę eksperymentu, druga obejmuje przedmiotowe składniki praktyki laboratoryjnej, a trzecia odnosi się do wyników eksperymentów.

Hacking pokazuje zatem bogactwo tego, co mieści się w ramach prac laboratoryjnych. Przedstawia taksonomiczny schemat tych prac, w którym wyróżnia piętnaście elementów pozostających ze sobą w różnych związkach.

⁴⁸ *The Self-Vindication of the Laboratory Sciences*, [w:] A. Pickering (ed.), *Sciences as practice and culture*, The University of Chicago Press, Chicago-London 1992.

⁴⁹ Por. I. Hacking, *The Self-Vindication...*, s. 29–30.

Elementy te – o czym już wspomniałem – dzieli na trzy grupy: a) idee (*ideas*), b) rzeczy (*things*), c) znaki (*marks*)⁵⁰.

W grupie idei sytuują się rozmaite rodzaje pytań i teorii tworzących intelektualne składniki przeprowadzanych eksperymentów. Hacking wymienia tutaj: pytania, wiedzę podstawową, teorię systematyczną, hipotezy lokalne (fenomenologiczne) oraz modelowanie aparatury badawczej.

1. Pracę eksperymentalną zaczyna się od pytań (*questions*), jakie stawia się w związku z tym, co jest przedmiotem badań empirycznych. W dyscyplinach eksperymentalnych pytania dotyczą przede wszystkim samej praktyki laboratoryjnej, a rzadziej odnoszą się do jej zaplecza teoretycznego, natomiast bardzo rzadko zadawane są pytania – stawiane najczęściej przez filozofów nauki – dotyczące oceny konkurencyjnych teorii w świetle wyników badań empirycznych⁵¹.
2. Wiedza podstawowa (*background knowledge*) są to pewne, nie w pełni usystematyzowane, przekonania i przewidywania eksperymentatorów zakładane przy organizowaniu danego eksperymentu, bez których jego przeprowadzenie nie byłoby możliwe. Wiedza ta może pochodzić z różnych dziedzin nauki, a nawet z praktyki życia codziennego⁵².
3. Teoria systematyczna (*systematic theory*) to najbardziej ogólne i zarazem najbardziej typowe twierdzenia teorii, które przyjmuje się podczas eksperymentowania. Należy w tym kontekście mówić raczej o teoriach naukowych, gdyż eksperymentowanie bardzo często zakłada prawa podstawowe należące do różnych teorii. Prawa te mogą nie posiadać same przez się eksperymentalnych konsekwencji, lecz dostarczają uzasadnienia teoretycznego dla przypuszczalnego przebiegu planowanego eksperymentu⁵³.
4. Hipotezy lokalne (*topical hypotheses*) to najbardziej złożony i niejednoznaczny element teoretycznej podstawy eksperymentowania. Hacking zalicza do nich hipotezy lokalne o charakterze fenomenologicznym, które mają łączyć prawa ogólne teorii systematycznej ze zjawiskami. W tradycji neopozytywistycznej były to reguły korespondencji Carnapa, jednakże Hacking odwołuje się tutaj do praw pomostowych Carla

⁵⁰ Warto zaznaczyć, że zaproponowana przez Hackinga taksonomia elementów składających się na praktykę laboratoryjną nie spełnia podstawowych kryteriów metodologicznych nakładanych na klasyfikację, która powinna być: wyczerpująca (adekwatna), rozłączna i użyteczna. Może być zatem uznana co najwyżej za próbę pogrupowania tychże elementów. Por. T. Kwiatkowski, *Klasyfikacja*, [w:] *Filozofia a nauka. Zarys encyklopedyczny*, Wydawnictwo PAN, Wrocław-Warszawa-Kraków-Gdańsk-Lódź 1987, s. 283–297.

⁵¹ Por. I. Hacking, *The Self-Vindication...*, s. 44.

⁵² Por. tamże, s. 44–45.

⁵³ Por. tamże, s. 45.

Hempla i słownika Normana Campbella⁵⁴. Autor *The Self-Vindication of the Laboratory Science* rezygnuje z dychotomii: terminy teoretyczne – terminy obserwacyjne, i dlatego utożsamia ten element teoretycznej bazy eksperymentu ze zbiorem procedur aproksymowania i modelowania, które są przedmiotem analiz Cartwright⁵⁵. W najbardziej ogólnym sensie elementy tej grupy mogą podpadać pod to, co Kuhn nazwał artykulacją teorii w celu powiązania jej z doświadczeniem. Zdaniem Hackinga to właśnie ten element myślowej aktywności eksperymentatorów posiada dla praktyki decydujące znaczenie, gdyż to właśnie on, a nie systematyczne teorie, decyduje o jej przebiegu⁵⁶.

5. Modelowanie stosowanej aparatury badawczej (*modeling of the apparatus*) polega na wykorzystaniu teorii opisujących sposób zachowania się aparatury i jej oddziaływanie z przedmiotami (raczej z punktów 1 i 4, a mniej z punktu 3), z którymi lub na których się eksperymentuje. Teorie te umożliwiają ustalenie tego, jak zachowują się przyrządy i urządzenia wraz z innym wyposażeniem stosowanym w laboratorium⁵⁷.

Do przedmiotowych składników praktyki laboratoryjnej Hacking zalicza wszystkie te elementy, które podpadają pod kategorię rzeczy. Przez rzeczy rozumie nie tylko materialne substancje, które poddawane są badaniu lub z którymi przystępuje się do badań, lecz także wykorzystywane w badaniach przyrządy i urządzenia oraz samych eksperymentatorów. Wybór przedmiotów eksperymentowania jest w sposób oczywisty zależny od stawianych pytań. Sama zaś aparatura badawcza, która służy do detekcji lub modyfikowania obiektów, jest uzależniona od różnych założeń teoretycznych, które opisują oddziaływanie tej aparatury z badanymi obiektami. To samo odnosi się do generatorów danych, którymi mogą być odpowiednie urządzenia lub sami badacze. Rzeczy stanowią zatem drugą grupę elementów w taksonomii Hackinga (punkty 6–10).

6. Obiekt badania (*target*) wraz z wymienionymi niżej (w punktach od 7 do 10) elementami wchodzi w skład tego, co Hacking nazywa materiałem (*materiel*) eksperymentu⁵⁸.

⁵⁴ Campbell w pracy *Physics: The Elements* (Cambridge University Press, Cambridge 1920) wykazał, że nie ma uzasadnionej metody na wyprowadzenie testów eksperymentalnych z fundamentalnych praw przyrody. Wskazał więc na potrzebę wyróżnienia dwóch poziomów teorii. Poziom pierwszy tworzą hipotezy, tj. twierdzenia teoretyczne obejmujące zbiór ogólnych idei danej teorii. Poziom drugi natomiast składa się ze słownika ustalającego relacje między czystymi pojęciami teorii a terminami obserwacyjnymi.

⁵⁵ Por. N. Cartwright, *The Simulacrum Account of Explanation*, [w:] tejsze, *How the Laws...*, s. 144–151.

⁵⁶ Por. I. Hacking, *The Self-Vindication...*, s. 45.

⁵⁷ Por. tamże, s. 45–46.

⁵⁸ Por. tamże, s. 46.

7. Źródła modyfikacji (*source of modification*) to ta część aparatury wykorzystywanej w laboratorium, która może wywoływać zmiany w materialnej strukturze badanego obiektu⁵⁹.
8. Detektory (*detectors*) to przyrządy i urządzenia, które służą do wykrywania, przekształcania i mierzenia wszelkich sygnałów pochodzących od badanego obiektu⁶⁰.
9. Narzędzia (*tools*) nie odgrywają tak istotnej roli w badaniach eksperymentalnych jak źródła modyfikacji i detektory, jednakże są w nich również niezbędne⁶¹.
10. Sprawcy danych (*data generators*) to na przykład ludzie, którzy dokonują pomiarów. W przypadku bardziej złożonych eksperymentów ludzie zostają zastąpieni skomplikowaną aparaturą. Podobnie jak nie ma, w opinii Hackinga, wyraźnej granicy między detektorami a narzędziami, tak też nie ma jej między detektorami a sprawcami danych⁶².

Trzecią grupę elementów w taksonomii Hackinga stanowią dane (wyniki) eksperymentów (*marks*), a dokładniej – wszystkie operacje, jakie mogą być na nich dokonywane. Są to nie tylko wyniki eksperymentów, ale także różne operacje, które na nich można wykonać. Oprócz otrzymanych danych (wyników) są to: oszacowanie danych, ich redukcowanie, analizowanie oraz interpretacja. Operacje te w różnym stopniu wymagają zastosowania określonych elementów teoretycznych należących do grupy pierwszej (punkty 1–5).

11. Dane (*data*) dostarczane są przez sprawców danych. Takimi danymi, w opinii Hackinga, są niezinterpretowane napisy (odczyty z przyrządów pomiarowych), wykresy, fotografie, tabele z numeryczną zawartością itd. Choć autor *The Self-Vindication of the Laboratory Science* zdaje sobie sprawę, że w laboratorium wyniki badań eksperymentalnych nie są dane, ale raczej uzyskiwane czy nawet wytwarzane, to jednak wyróżnia dane jako względnie ateoretyczne przedstawienia wyników badań. Można zgodzić się z takim przedstawieniem danych jedynie wtedy, gdy przez teoretyczne ujęcie wyników badań będziemy rozumieli ich interpretację w świetle teorii. Jednakże nawet gdy pominiemy fakt, że pewne teoretyczne ustalenia są niejako wpisane w konstrukcję i funkcjonowanie danych aparatów pomiarowych, warto zwrócić uwagę na to, iż wyniki badań laboratoryjnych są prezentowane przez urządzenia pomiarowe jako wielkości wymiarowe, co musi zakładać

⁵⁹ Por. tamże, s. 46–47.

⁶⁰ Por. tamże, s. 47.

⁶¹ Por. tamże, s. 47–48.

⁶² Dawniej kamerę fotograficzną rejestrującą obraz z mikroskopu elektronowego można było określić jako sprawcę danych, obecnie trzeba ją raczej uznać za detektor, zaś sprawcą danych jest płytka CCD sterowana mikroprocesorowo. Por. tamże, s. 48.

- pewne prawa teoretyczne. Jeśli zaś przedstawienie wyników odbywa się w formie wykresu lub tabeli z liczbami, to znaczenie założeń teoretycznych (z punktów 1–5) jest tym bardziej istotne. Warto także dodać, że większość z wymienionych przez Hackinga sposobów przedstawiania danych wymaga przeprowadzenia operacji, które autor zaliczył do trzeciej grupy swojej taksonomii (punkty 12–15)⁶³.
12. Oszacowanie danych (*data assessment*) to jeden z trzech typów operacji przetwarzania danych (pozostałe zostaną omówione w punktach 13–14). Polega ono na obliczaniu prawdopodobnych błędów, jakie mogą towarzyszyć pomiarom, oraz na statystycznych ujęciach tych błędów⁶⁴.
 13. Redukowanie danych (*data reduction*) potrzebne jest wtedy, gdy jako wyniki eksperymentu pojawiają się jakieś rozległe, nie w pełni zrozumiałe dane liczbowe. Dane te są przetwarzane w taki sposób, aby stały się zrozumiałe. Podczas tego przetwarzania korzysta się najczęściej z – w założeniu neutralnych – technik statystycznych⁶⁵.
 14. Analizowanie danych (*data analysis*) wyników eksperymentów zależy, zdaniem Hackinga, od wybranych pytań (punkt 1), lokalnych hipotez (punkt 4), sposobów modelowania aparatów (punkt 5) i innych elementów intelektualnego zaplecza praktyki eksperymentalnej. Operacja ta może przebiegać podobnie jak w przypadku redukcji danych. Analiza danych – co warto podkreślić – nie ma jednak charakteru neutralnych technik statystycznych⁶⁶.
 15. Interpretacja (*interpretation*) dotyczy danych uzyskanych dzięki zastosowaniu przez badaczy różnego rodzaju elementów materialnych (punkty 6–10). Wymaga to przyjęcia jakiejś teorii, najczęściej z poziomu tła wiedzy (punkt 2). Czasem przy interpretacji danych korzysta się także z innego zaplecza teoretycznego: teorii systematycznej (punkt 3), lokalnych hipotez (punkt 4) czy modelowania stosowanej aparatury badawczej (punkt 5). Widać zatem, że interpretacja danych w największym stopniu uwikłana jest teoretycznie⁶⁷.

Warto zwrócić uwagę, że wszystkie elementy praktyki laboratoryjnej, analizowane w *The Self-Vindication of the Laboratory Science*, mają charakter wewnętrzny względem tej praktyki. Nie uwzględniają zatem czynników zewnętrznych, które interesują socjologów wiedzy. Hackinga nie zajmują przyzwyczajenia badaczy, sposoby komunikowania się między nimi, otoczenie, w jakim pracują, czy instytucje, w ramach których funkcjonują. Uwzględnienie

⁶³ Por. tamże.

⁶⁴ Por. tamże, s. 48–49.

⁶⁵ Por. tamże, s. 49.

⁶⁶ Por. tamże.

⁶⁷ Por. tamże, s. 49–50.

takich czynników socjologiczno-instytucjonalnych, ekonomicznych i politycznych z pewnością zmieniloby perspektywę badawczą, w ramach której analizuje się zagadnienie rozwoju nauki i problem stabilności jej praktyki. Część tych czynników została uwzględniona przez Hackinga, gdy analizował styl uprawiania nauki⁶⁸ (do zagadnień tych wróć w podrozdziale 4.3).

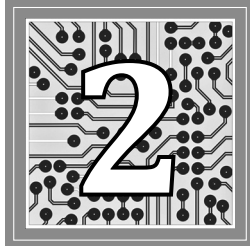
Autor ten sugeruje również, że wszystkie prawdy podstawowe przyjmowane jeszcze przed eksperymentem (z punktów 2-5) nie muszą być przez cały czas jego trwania niezmiennie. Eksperyment może prowadzić do permanentnych zmian i wzajemnych zależności między wiedzą teoretyczną, aparaturą i praktyką badawczą. Dokonane przez niego analizy wyraźnie pokazują, że uzyskanych podczas prac eksperymentalnych wyników nie można oddzielić od użytej przez eksperymentatorów aparatury oraz od przyjętych przez nich wcześniej (choć zmiennych) założeń teoretycznych.

Hacking obserwację i teorię charakteryzuje z punktu widzenia prac eksperymentalnych. Jest to niewątpliwie zupełnie nowy sposób przedstawiania relacji pomiędzy teorią a eksperymentem. Elementy prac eksperymentalnych wymienione w *The Self-Vindication of the Laboratory Science* (punkty 1-15) pokazują, że owe związki są dużo bardziej złożone niż te, które zostały przedstawione w tradycji teoretycystycznej. Nie formułujemy hipotez, żeby następnie sprawdzić, czy są one prawdziwe (jak chciałby Popper); sytuacja – w opinii Hackinga – jest inna. Na podstawie prawd podstawowych projektujemy i budujemy aparaturę badawczą, by interweniować w naturalny bieg rzeczy w przyrodzie. Aparatura ta wytwarza pewne dane, które możemy odczytywać jako opisy zjawisk zachodzących w świecie tylko wtedy, gdy zostaną one zinterpretowane. Interpretacja ta odbywa się na dwóch poziomach: na poziomie dostępnej aparatury i na poziomie zakładanej teorii. Właśnie w ten sposób dochodzi do zestrojenia naszych teorii, aparatów badawczych i obserwacji. „Interpretacja okazuje się, jak widać, swoistym spoiwem łączącym teoretyczne i materialne elementy eksperymentu, umożliwiając tym samym określenie kształtu zaobserwowanych danych (lub, mówiąc inaczej, nadanie znaczenia znakom). Określenie kształtu danych (nadawanie znaczenia znakom) to po prostu ich interpretowanie za pomocą aparatury i teorii”⁶⁹. Tak rozumiane pojęcie interpretacji zilustrować można tym, jak dzięki praktykom eksperymentalnym doszło do zakwestionowania zachowania parzystości przy wykorzystaniu polaryzacyjnego działła elektronowego PEGGY II (do przykładu tego wróć w podrozdziale 4.1)⁷⁰.

⁶⁸ Por. I. Hacking, *'Style' for Historians and Philosophers*, „Studies in History and Philosophy of Science” 1992, vol. 23, no. 1, s. 1-20.

⁶⁹ M. Sikora, *Problem interpretacji w metodologii nauk empirycznych*, Wydawnictwo Naukowe IF UAM, Poznań 1997, s. 120.

⁷⁰ Por. I. Hacking, *Representing and Intervening...*, s. 265-275.



Elementy układu eksperymentalnego wspomagane komputerowo

W ostatnim czasie na badania coraz większy wpływ mają dwa ważne czynniki: czas ich trwania i koszty. Presja związana z redukcją tychże stała się główną przyczyną powstania nowej dziedziny wiedzy, nazywanej obecnie „teorią eksperymentu”¹. Od naukowca pracującego w obszarze badań empirycznych wymaga się znajomości metodyki badań empirycznych, którą „stanowi zbiór zasad (reguł, wytycznych, ...) dotyczących sposobów postępowania, efektywnych ze względu na określony cel badań empirycznych – cel eksperymentu naukowego. (...) Można przyjąć stwierdzenie, iż metodyka stanowi, w pewnym sensie, zbiór metod badań empirycznych”². Można wyróżnić dwie podstawowe metody badań: metodę badań kompletnych³ i metodę badań monoselekcyjnych⁴ (obie powstały, zanim pojawiła się współczesna teoria eksperymentu). Pierwsza z nich okazała się praktycznie niemożliwa do stosowania ze względu na zbyt dużą liczbę wymaganych pomiarów, natomiast praktycznie możliwa do wykonania metoda badań monoselekcyjnych nie zapewniała wymaganej informacji przydatnej do optymalizacji i sterowania cyfrowym układem eksperymentalnym.

Współczesna teoria eksperymentu powstawała stopniowo. W 1925 roku Fisher (angielski statystyk i genetyk) tworzy szersze podstawy matematycznego opracowania wyników pomiarów w pracy *Statistical Methods for Research Workers*. Dziesięć lat później w książce *The Design of Experiments* kładzie podwaliny pod teorię eksperymentu. Po tej publikacji następuje przełom w meto-

¹ Por. Z. Polański, *Badania empiryczne – metodyka i wspomaganie komputerowe*, [w:] J. Barzykowski (red.), *Współczesna metrologia. Zagadnienia wybrane*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2004, s. 124–126.

² Tamże, s. 126–127.

³ Szczegółowy opis metody badań kompletnych znaleźć można w: tamże, s. 127–129.

⁴ Szczegółowy opis metody badań monoselekcyjnych znaleźć można w: tamże, s. 129–130.

dycznej koncepcji eksperymentu. Tradycyjna metodyka badań empirycznych (badania kompletne i monoselekcyjne) pozostawiała badaczowi swobodę wyboru wartości wielkości wejściowych, dla których realizowano eksperyment. Wyniki pomiarów analizowano matematycznie dopiero po przeprowadzeniu eksperymentu. Teoria eksperymentu odwraca tę kolejność. Zaczyna się od ustalenia planu eksperymentu wynikającego z teorii eksperymentu. Plan ten zapewnia uzyskanie wymaganej informacji doświadczalnej, przy jednoczesnym ograniczeniu liczby pomiarów (zmniejsza to czas i koszty badań). Analiza matematyczna (statystyczna) wyników pomiarów także jest wykonywana po zakończeniu pomiarów, jednakże stosowane metody analizy danych są ściśle związane z zastosowanym planem eksperymentu⁵.

Dalsza formalizacja teorii eksperymentu następuje w latach pięćdziesiątych i sześćdziesiątych XX wieku. Dzięki pracom George'a Edwarda Pelhama Boxa wprowadzone zostaje pojęcie „powierzchni odpowiedzi” i rozszerzone zostają formalne podstawy matematyczne planowania eksperymentu. Powstaje także skuteczna w zastosowaniach metoda optymalizacji empirycznej („metoda Boxa-Wilsona”). Następny krok w rozwoju teorii eksperymentu wyznaczyły prace Jacka Carla Kiefera i Jacoba Wolfowitza (rok 1959) wprowadzające pojęcie „planu ciągłego” podlegającego optymalizacji. Znaczącym wydarzeniem stało się rozpoczęte w latach osiemdziesiątych XX wieku trwałe połączenie teorii eksperymentu z komputerem. To wtedy zaczęły powstawać metody komputerowego wspomaganie eksperymentu oparte na oprogramowaniu CADEX/DOE (ang. *Computer Aided Design and Analysis of Experiments/Design of Experiments*)⁶. Wszystkie programy komputerowe CADEX/DOE prezentują bardzo szeroką ofertę różnego rodzaju planów eksperymentu. Jednakże wybór konkretnego planu oraz ustalenie jego szczegółowej charakterystyki zawsze pozostaje w gestii badacza⁷.

Można zatem powiedzieć, że rozwój komputerów, oprogramowania i urządzeń peryferyjnych umożliwił wykonywanie w coraz efektywniejszy sposób funkcji obliczeniowych, kontrolnych, doradczych, diagnostycznych, monitorujących, pomiarowych, sterujących i innych; spowodował zastosowanie komputerów w niemalże wszystkich obszarach ludzkiej działalności. Pojawienie się komputerów umożliwiło także rozwój samej informatyki, będącej zespołem dyscyplin teoretycznych (metod matematycznych, logiki, teorii automatów, teorii algorytmów, lingwistyki matematycznej), technicznych (budowy sprzętu, tworzenia oprogramowania komputerów) i aplikacyjnych (w różnych dziedzinach). Jednym z bardzo ważnych zastosowań komputerów jest wspomaganie prac badawczych w naukach empirycznych.

⁵ Por. tamże, s. 130–141.

⁶ Por. tamże.

⁷ Por. tamże, s. 141–150.

Współcześnie funkcje komputera w naukach empirycznych można podzielić na trzy główne grupy: analityczną (on-line), syntetyczną (off-line) i prezentacyjną (on-line i off-line). W pierwszej z nich komputer połączony jest bezpośrednio z przyrządem pomiarowym (składającym się z urządzenia pomiarowego, przetworników analogowo-cyfrowych i interfejsu) i służy głównie do gromadzenia i analizy danych empirycznych napływających z układu eksperymentalnego (stąd jego funkcja analityczna on-line). W skład tej grupy zastosowań komputera w naukach empirycznych wchodzi:

- 1) pobieranie danych empirycznych z urządzeń pomiarowych przez przetworniki analogowo-cyfrowe (a/c) i interfejsy oraz sterowanie przebiegiem eksperymentu przez przetworniki cyfrowo-analogowe (c/a) i urządzenia wykonawcze⁸;
- 2) gromadzenie danych empirycznych (tworzenie cyfrowych baz danych empirycznych)⁹;
- 3) porównywanie danych empirycznych z danymi teoretycznymi¹⁰.

W drugiej grupie zastosowań komputer nie jest już bezpośrednio podłączony do zestawu eksperymentalnego, ale służy głównie do opracowywania zgromadzonych wcześniej danych empirycznych (stąd jego funkcja syntetyczna off-line). Do tej grupy zadań komputera zaliczyć można:

- 4) formułowanie prostych praw fenomenologicznych (komputerowe uogólnienia indukcyjne formułowane na bazie cyfrowych baz danych empirycznych)¹¹;
- 5) numeryczne uzasadnianie przeprowadzenia kolejnych eksperymentów (optymalizacja kolejnych eksperymentów poprzez zawężanie możliwej klasy eksperymentów)¹²;
- 6) symulacje komputerowe przebiegu zjawisk/procesów (na podstawie zgromadzonych danych empirycznych i założonych teorii);
- 7) projektowanie i optymalizacja nowych, wspomaganych komputerowo, zestawów eksperymentalnych.

Ważną klasą zastosowań komputerów jest prezentacja przetwarzanych danych empirycznych (z grupy pierwszej – punkty 1-3) i otrzymanych wyników analiz numerycznych (z grupy drugiej – punkty 4-7). Wizualizacja może się

⁸ Zagadnienie to będzie przedmiotem dalszych analiz zawartych w bieżącym rozdziale i rozdziałach następnych.

⁹ Tym zagadnieniem zajmę się głównie w podrozdziale 2.4.

¹⁰ Do tego rodzaju porównań służy oprogramowanie. Zostanie to przedstawione w podrozdziałach: 2.5, 3.2 oraz 4.2.

¹¹ Zagadnienie to szczegółowo analizował już Piotr Giza w książce *Filozoficzne i metodologiczne aspekty komputerowych systemów odkryć naukowych* (Wydawnictwo UMCS, Lublin 2006). W paragrafie 3.2.2 przywołam uzyskane przez niego wyniki, aby udzielić odpowiedzi na pytanie, którego w tej formie nie stawiał: „Czy możliwe są badania bez podmiotu eksperymentującego?”.

¹² O punktach 5-8 będę wspominał w podrozdziale 3.2 oraz w rozdziale 4.

odbywać podczas pracy komputera jako część zestawu eksperymentalnego (w trybie on-line) oraz poza zestawem eksperymentalnym (w trybie off-line). Do tej grupy zastosowań komputera w naukach empirycznych należą:

- 8) wizualizacja danych empirycznych i otrzymanych wyników analiz numerycznych¹³;
- 9) elektroniczna komunikacja pomiędzy ośrodkami naukowymi (wymiana danych, symulacji i wizualizacji)¹⁴;
- 10) optymalizacja procesów komunikacji człowiek – maszyna (naukowiec – system komputerowy wspomagający badania naukowe)¹⁵.

Nietrudno zauważyć, że nie jest to podział rozłączny. Niektóre z punktów pokrywają się zakresowo, np. 8 zawiera się w 6, dalej 5 krzyżuje się z 6, podobnie jak 6 i 7 (jednakże te ostatnie w małym zakresie).

W ogólności jednak, w badaniach doświadczalnych mamy do czynienia z trzema wzajemnie na siebie oddziałującymi czynnikami: 1) eksperymentatorem, czyli podmiotem P stymulującym eksperyment i interpretującym jego wyniki, 2) badanym obiektem O, czyli przedmiotem badań doświadczalnych, 3) oraz tym, co między nimi pośredniczy – tj. z systemem automatyzacji badań doświadczalnych (abd)¹⁶. Cele wprowadzenia takiego ogniwa pośredniczącego mogą być wielorakie¹⁷.

Podsystemem systemu automatyzacji badań doświadczalnych współcześnie zazwyczaj jest komputerowe wspomaganie badań doświadczalnych (kwbd). Jest to „ogół metod i środków służących usprawnieniu, zgodnie z ogólnymi założeniami eksperymentu (naukowego, technicznego, medycznego itp.), procesów pobierania informacji o badanym obiekcie i jej przetwarzania za pomocą środków techniki komputerowej”¹⁸.

We współczesnych układach eksperymentalnych wspomaganych komputerowo można wyróżnić kilka elementów sprzętowych stanowiących jedną

¹³ Wizualizacje mogą być częścią komputerowych metod poszerzania możliwości poznawczych naukowca i dlatego wspomnę o nich w paragrafie 3.2.1.

¹⁴ O roli Internetu w komunikacji napisano już tak wiele, że tym zagadnieniem w ogóle nie będę się zajmował.

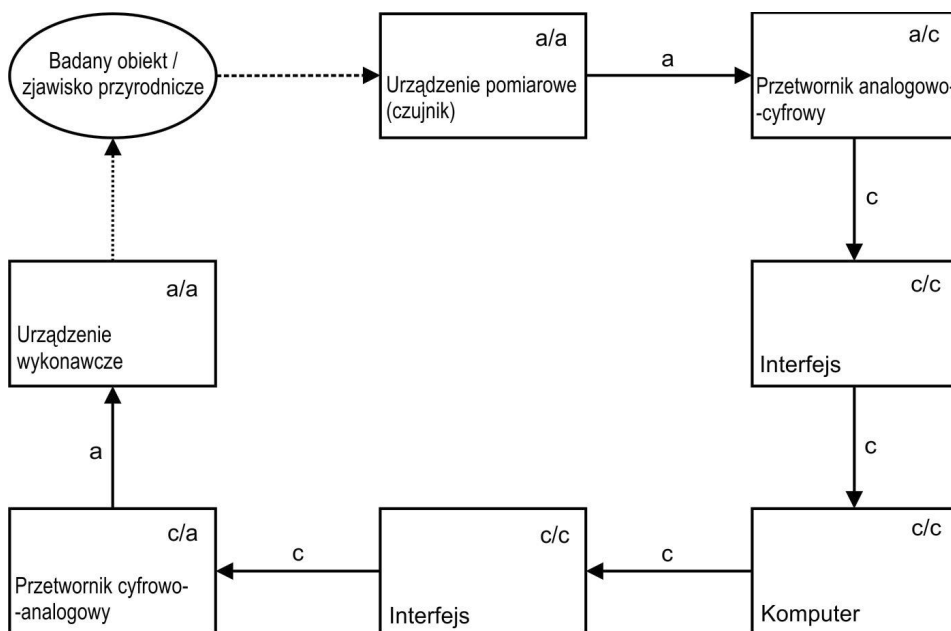
¹⁵ To ważne zagadnienie jest przedmiotem badań wielu kognitywistów oraz specjalistów w zakresie sztucznej inteligencji. Nie jest to dla mnie zagadnienie pierwszoplanowe, choć z pewnością o nim wspomnę w podrozdziałach 3.2. i 4.2.

¹⁶ Por. J.L. Kulikowski, dz. cyt., s. 7–10.

¹⁷ „System abd może chronić organizm eksperymentatora przed szkodliwym oddziaływaniem obiektu lub jego najbliższego otoczenia, może odciążyć eksperymentatora od zbyt żmudnych i czasochłonnych czynności, zwiększyć dokładność pomiarów lub ich liczbę wykonywanych w jednostce czasu, ułatwić operowanie dużymi zbiorami danych, umożliwić koordynację wielu czynności związanych z wykonywaniem złożonego doświadczenia, zapewnić optymalne warunki dokonywania doświadczeń zgodnie z założonymi kryteriami ich efektywności, pomóc w przedstawianiu wyników badań w sposób bardziej poglądowy, w dokonywaniu selekcji wyników, ich syntezy itp.”, tamże, s. 8.

¹⁸ Tamże.

funkcjonalną całość, stanowiącą pierwszą z wymienionych wyżej funkcji komputera w naukach empirycznych. Informacje z obiektu badań doświadczalnych pobiera się za pomocą urządzeń pomiarowych (czujników). Następnie ta analogowa informacja ulega wstępnemu przetwarzaniu przy użyciu przetworników analogowo-cyfrowych. Następnie zdigitalizowane dane przesyła się za pomocą różnego rodzaju interfejsów do komputera. Tam informacja – w wyniku działania różnorodnego oprogramowania – może być przetwarzana, przechowywana i udostępniana (np. w postaci wizualizacji). Komputer wraz ze stosownym oprogramowaniem może sterować przebiegiem eksperymentu (poprzez interfejsy, przetworniki cyfrowo-analogowe i urządzenia wykonawcze). Wymienione środki sprzętowe systemów komputerowego wspomaganie badań doświadczalnych (przedstawione na rysunku 1) zostaną omówione w następnych podrozdziałach.



Rysunek 1. Schemat układu eksperymentalnego wspomaganego komputerowo. Linia przerywaną zaznaczono sygnały nieelektryczne; strzałkami zaznaczono kierunek transmisji analogowych (a) bądź cyfrowych (c) sygnałów elektrycznych przekazywanych pomiędzy częściami układu.

W niniejszym rozdziale omawiam wszystkie elementy układu eksperymentalnego wspomaganego komputerowo, aby umożliwić czytelnikowi zrozumienie współczesnego sposobu eksperymentowania. Szczegółowo natomiast analizuję tylko cyfrowe części układu eksperymentalnego (przetwornik analogowo-cyfrowy, interfejs, komputer wraz z oprogramowaniem) – z kilku

powodów. Chcę ukazać i uwypuklić specyfikę cyfrowych badań eksperymentalnych, ponieważ jest to niezbędne do dalszych analiz z zakresu filozofii i metodologii eksperymentu wspomaganego komputerowo. Niemożliwe byłoby uzasadnienie tez o charakterze metodologicznym i filozoficznym, które stawiam w rozdziałach trzecim i czwartym, bez przedstawienia materiału faktualnego używanego podczas argumentacji. Materiałem tym jest bowiem sposób działania współczesnego układu eksperymentalnego wspomaganego komputerowo.

2.1. Urządzenia pomiarowe

Celem badań eksperymentalnych może być rozstrzygnięcie problemu, poznawczego lub użytkowego, dotyczącego przedmiotu O. Problemowi temu można zwykle nadać postać pytania dotyczącego na przykład: istnienia O (jest to pytanie typu egzystencjalnego), cechy jakościowej O lub jego przynależności do określonej klasy obiektów (pytanie typu jakościowego), cechy ilościowej, wartości parametrów odnoszących się do O (pytanie typu ilościowego), struktury wewnętrznej O (pytanie typu systemowo-strukturalnego), sposobu zachowania się O w określonych sytuacjach (pytanie typu behawioralnego), przyczyny zachowania się O w danej sytuacji (pytanie typu kauzalnego), sposobu oddziaływania na O, który zapewniałby zmianę jego właściwości (pytanie typu metodycznego), roli O w kontekście jego powiązań z innymi obiektami (pytanie typu funkcjonalnego). Nietrudno zauważyć, że tego typu pytania można zaliczyć do pierwszej grupy z taksonomii Hackinga omówionej w podrozdziale 1.3 (idei)¹⁹. Pierwszy natomiast element układu eksperymentalnego wspomaganego komputerowo odpowiadałby punktowi ósmemu z drugiej grupy tej taksonomii. Detektory bowiem, według Hackinga, są to przyrządy i urządzenia, które służą do wykrywania oraz mierzenia sygnałów pochodzących od badanego obiektu²⁰.

Tak więc pierwszym elementem układu eksperymentalnego wspomaganego komputerowo, dzięki któremu można szukać odpowiedzi na pytania stanowiące pierwszy element w taksonomii Hackinga²¹, jest urządzenie pomiarowe (czujnik)²². Czujnik przetwarza wielkość mierzoną na inną wielkość fizyczną, łatwiej mierzalną lub wygodniejszą do przesyłania na odległość (wielkością

¹⁹ Por. I. Hacking, *The Self-Vindication...*, s. 44–45.

²⁰ Por. tamże, s. 47.

²¹ Por. tamże, s. 44.

²² Por. T.W. Wojtatowicz, *Badania doświadczalne wspomagane komputerowo*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2010, s. 6. Autor ten utożsamia pojęcia „urządzenie pomiarowe” oraz „czujnik”. W swojej pracy także przyjmuję zamiennie używanie tych dwóch pojęć, tożsamy z pojęciem „detektor” z taksonomii Hackinga. Por. I. Hacking, *The Self-Vindication...*, s. 47.

wejściową czujnika jest wielkość mierzona)²³. Czujniki pomiarowe dzieli się na: generacyjne i parametryczne.

W przypadku czujników generacyjnych energia pobierana jest ze źródła wielkości mierzonej. Zaletą tego rodzaju czujników jest to, że do działania takiego układu pomiarowego nie jest potrzebne doprowadzanie energii z dodatkowego źródła. Wadą zaś takiego układu pomiarowego jest to, że pobierając energię, obciąża źródło wielkości mierzonej i zmniejsza jej wartość (pobieranie energii od obiektu badanego wprowadza błąd metody). Nośnikami energii potrzebnej do działania czujnika generacyjnego są wielkości odpowiadające sile i prędkości w dziedzinie energii mechanicznej (ciśnienie płynu i strumień przepływu), napięcie i natężenie prądu elektrycznego, temperatura i strumień energii cieplnej itd.²⁴ Natomiast czujniki parametryczne potrzebują doprowadzenia energii ze źródła zewnętrznego. Wielkość wyjściowa czujnika jest skorelowana z właściwością mierzonego obiektu, np. masą, gęstością, przewodnością cieplną lub elektryczną, rezystancją, pojemnością elektryczną itd.²⁵

Współczesne urządzenia pomiarowe mogą z łatwością dokonywać pomiarów: temperatury, ciśnienia, poziomu, prędkości i przepływu cieczy, drgań i wstrząsów, hałasu, składu chemicznego, wilgotności powietrza i ciał stałych.

Obecnie dokładnych pomiarów temperatury nie wykonuje się już przy użyciu termometrów nieelektrycznych, zaś w powszechnym użyciu podczas badań eksperymentalnych są termometry rezystancyjne i termoelektryczne, półprzewodnikowe czujniki temperatury, pirometry, termometry szumowe, luminescencyjne, światłowodowe oraz ultradźwiękowe²⁶. Pomiary temperatury są pomiarami inwazyjnymi, gdyż czujnik pomiarowy wprowadzany jest do obiektu pomiaru (pomiar stykowy) i tym samym narusza stan badanego ośrodka. Wyjątkiem są pomiary za pomocą pirometrów (pomiar bezstykowy). Inwazyjność pomiaru temperatury oznacza, że wprowadzając do badanego ośrodka czujnik, zmieniamy temperaturę, którą chcemy zmierzyć. Czujnik jest bowiem dodatkowym ciałem, które odprowadza (lub absorbuje) ciepło przenoszone przez promieniowanie z ciał otaczających badany ośrodek. Ze względu na złożone kształty ciał biorących udział w wymianie ciepła oraz niejednorodność materiałów, teoretyczny opis zjawisk zakłócających pomiary temperatury jest bardzo skomplikowany, gdyż nie sposób uwzględnić wszystkich istotnych elementów zniekształcających ten pomiar. Dlatego zamiast

²³ Por. J. Piotrowski (red.), *Pomiary. Czujniki i metody pomiarowe wybranych wielkości fizycznych i składu chemicznego*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2009, s. 19–21.

²⁴ Por. tamże, s. 28.

²⁵ Por. tamże.

²⁶ Szczegółowy opis urządzeń służących do pomiaru temperatury znaleźć można w: tamże, s. 75–133.

interpretacji teoretycznej podaje się wiele zaleceń i reguł mających zmniejszyć oddziaływanie czujnika na wynik pomiaru²⁷.

W przypadku pomiarów ciśnienia brakuje metod pomiaru i czujników, które pozwalałyby bezpośrednio, w prosty sposób przetworzyć wielkość mierzoną na sygnał elektryczny, co jest możliwe w pomiarach innych wielkości, np. temperatury. W praktyce zatem przetwarzanie ciśnienia na użyteczny sygnał elektryczny jest zazwyczaj pośrednie oraz wielostopniowe. Współczesne ciśnieniomierze to wiele różnych czujników ciśnienia: hydrostatyczne, tłokowo-wagowe, sprężyste, piezoelektryczne, rezonansowe, optyczne, przepływowe termiczne oraz wagi prądowe²⁸.

Poziom²⁹, wraz z temperaturą, ciśnieniem i strumieniem przepływu, jest jedną z częściej mierzonych wielkości. Mierzy się poziom cieczy, mułu, zawiesiny, piany, substancji sypkich i granulowanych oraz położenie płaszczyzny rozdziału dwóch cieczy. Poziomomierze są najczęściej dzielone według zasady działania (można wyróżnić aż 19 zasad pomiarowych, które stosowane są przy budowie poziomomierzy³⁰). Ogólne metody pomiaru poziomu można podzielić na bezpośrednie i pośrednie³¹.

We współczesnych pomiarach przepływu³² wyróżnia się kilka różnych celów: pomiar prędkości płynów, turbulencji, pomiar strumienia masy lub objętości płynu transportowanego rurociągiem, pomiar strumienia masy lub objętości cieczy transportowanej kanałem otwartym oraz pomiar objętości lub masy płynu przez odmierzanie. Czujniki przyspieszenia (nazywane akcelerometrami) stosuje się natomiast do pomiarów wszystkich rodzajów przyspieszeń. Każdy akcelerometr składa się z dwóch podstawowych podsystemów: układu mechanicznego oraz przetwornika przemieszczania masy względem obudowy na sygnał elektryczny³³.

Zagadnienia związane z pomiarami oraz czujnikami dźwięku należą do najważniejszych problemów współczesnej techniki, która powszechnie wykorzystuje komunikację telefoniczną, przekazy radiowe i telewizyjne, zapis muzyki i mowy na różnych nośnikach. Pierwsze czujniki dźwięku, skonstruowane przez Johanna Philippa Reisa (w 1861 roku) oraz Aleksandra Grahama Bella

²⁷ Zalecenia te znaleźć można w: tamże, s. 134–161.

²⁸ Opis współczesnych urządzeń służących do pomiaru ciśnienia znaleźć można w: tamże, s. 162–236.

²⁹ Opis współczesnych urządzeń służących do pomiaru poziomu znaleźć można w: tamże, s. 237–257.

³⁰ Por. tamże, s. 237–238.

³¹ Szczegółowy podział poziomomierzy (metod pomiaru poziomu) znaleźć można w tabeli 4.1, w: tamże, s. 238.

³² Opis współczesnych urządzeń służących do pomiaru prędkości i przepływu płynów znaleźć można w: tamże, s. 258–344.

³³ Opis współczesnych pomiarów drgań i wstrząsów znaleźć można w: tamże, s. 345–386.

(w 1876 roku), były przeznaczone do wykorzystania w telefonie. Późniejszy rozwój elektroniki, bazujący na lampach próżniowych i tranzystorach w połączeniu z opracowanymi wcześniej technikami rejestracji dźwięku, zainicjował trwający do dziś intensywny rozwój elektronicznych środków komunikacji. Współcześnie pomiary dźwięku i hałasu odgrywają ważną rolę w przemyśle, budownictwie, motoryzacji, medycynie i wielu innych dziedzinach. Czujniki pomiarów dźwięków nazywane są mikrofonami³⁴.

Pomiary składu chemicznego należą do najtrudniejszych, ponieważ działanie aparatury pomiarowej opiera się na złożonych i różnorodnych zjawiskach fizycznych, a obiekt mierzony jest często w skali mikroskopowej, w bardzo złożonym otoczeniu i w zróżnicowanych warunkach. Są to ponadto pomiary niezwykle ważne, gdyż dotyczą na przykład jakości leków, żywności, środowiska, jakości wyrobów i materiałów. Za punkt wyjścia przy konstrukcji tego typu urządzeń pomiarowych należy przyjąć modele budowy materii prezentowane przez współczesną fizykę i chemię. Celem pomiarów składu chemicznego jest wyznaczenie zawartości określonych pierwiastków w próbce lub udziału ich poszczególnych form chemicznych i fizycznych³⁵.

Pomiary wilgotności powietrza realizowane są przez różnego rodzaju higrometry³⁶. Pomiary wilgotności ciał stałych natomiast realizowane są za pomocą jakościowo innych urządzeń pomiarowych³⁷.

Urządzenie pomiarowe będące częścią układu eksperymentalnego wspomaganego komputerowo musi charakteryzować się tym, że wynik pomiaru ma określoną wartość wyrażoną poprzez konkretną wielkość fizyczną: napięcie lub natężenie prądu. Urządzenia pomiarowe, w których wielkość mierzona przetwarzana jest w inną niż napięcie lub natężenie prądu wielkość fizyczną, nie mogą być stosowane we współczesnych, skomputeryzowanych układach eksperymentalnych.

2.2. Przetworniki analogowo-cyfrowe

Urządzenia pomiarowe (czujniki) są pierwszym elementem układu eksperymentalnego. Wielkość wyjściowa czujnika musi być przetworzona na inną wielkość, która będzie mogła zostać poddana dalszemu przetwarzaniu. Tymi kolejnymi elementami są przetworniki pomiarowe, które można zaliczyć do

³⁴ Opis współczesnych pomiarów hałasu znaleźć można w: tamże, s. 387–421.

³⁵ Opis współczesnych metod pomiaru składu chemicznego znaleźć można w: tamże, s. 422–557.

³⁶ Opis współczesnych sposobów pomiaru wilgotności znaleźć można w: tamże, s. 558–599.

³⁷ Najważniejsze zalety i wady podstawowych metod pomiaru zawartości wilgoci w ciałach stałych i sypkich przedstawiono w tabeli 9.5, w: tamże, s. 597–598.

dziesiątego elementu z taksonomii Hackinga, tj. do sprawców danych. Według Hackinga, w przypadku bardziej skomplikowanych eksperymentów, ludzie zostają zastąpieni skomplikowaną aparaturą³⁸. Z tym mamy do czynienia we wszystkich eksperymentach wspomaganych komputerowo. W takim wypadku tą skomplikowaną aparaturą są przetworniki, interfejsy oraz komputery wraz z oprogramowaniem, opisane w następujących podrozdziałach. Pierwszym sprawcą danych jest jednak przetwornik – dzięki niemu informacje z urządzeń pomiarowych (detektorów) mogą uzyskać postać danych, które zostaną poddane obróbce cyfrowej (punkty 11–15 z taksonomii Hackinga³⁹) za pomocą komputera wraz z oprogramowaniem.

We współczesnej pracy eksperymentalnej stosuje się przetworniki: analogowo-analogowe (a/a) i analogowo-cyfrowe (a/c). Podstawą klasyfikacji jest charakter wielkości wyjściowej, a więc czy jest analogowa⁴⁰, czy cyfrowa⁴¹. Analogowy sygnał z czujnika, aby można było go przetworzyć na postać cyfrową (w przetworniku a/c) „zrozumiałą” dla komputera, musi posiadać odpowiedni poziom energetyczny. Zapewnieniu tego poziomu służą najczęściej przetworniki a/a (dostosowują wartość energetyczną wyjścia czujnika do zakresu wejściowego przetwornika a/c).

Przetwarzanie natomiast wielkości analogowej w sygnał cyfrowy składa się z trzech operacji: próbkowania (dyskretyzacja sygnału w czasie), kwantowania (dyskretyzacja wartości sygnału) i kodowania. Próbkowanie następuje przez kolejne pobieranie próbek wartości sygnału w pewnych odstępach czasu w taki sposób, aby ciąg próbek umożliwiał jak najwierniejsze odtworzenie całego przebiegu funkcji. Kwantowanie przebiegu analogowego polega na przyporządkowaniu każdej próbce skończonej liczby poziomów amplitudy, odpowiadającej dyskretnym wartościom od zera do pełnego zakresu.

Próbkowanie sygnału polega na tym, że w ustalonych odstępach czasu pobierane są próbki (ang. *sample*) i mierzony jest poziom sygnału. Wynik pomiaru zostaje skwantowany tak, aby mógł zostać przedstawiony w postaci liczby całkowitej. Aby spróbkowany sygnał w postaci cyfrowej dało się przekształcić z powrotem do postaci analogowej, musi być spełnione twierdzenie Kotelnikowa-Shannona o próbkowaniu. Mówi ono, że częstotliwość prób-

³⁸ Por. I. Hacking, *The Self-Vindication...*, s. 48.

³⁹ Por. tamże, s. 48–50.

⁴⁰ Wielkość jest analogowa, jeśli zbiór wartości tej wielkości przedstawiany na osi liczbowej jest zbiorem ciągłym (składającym się z liczb rzeczywistych). Por. J. Piotrowski (red.), dz. cyt., s. 28.

⁴¹ Wielkość jest cyfrowa, jeśli są spełnione trzy warunki: zbiór wartości tej wielkości jest dyskretny, elementy zbioru wartości zmieniają się w dyskretnych przedziałach czasu, sygnały cyfrowe są zakodowane, co oznacza, że do odczytania wartości wielkości trzeba znać kod. Por. tamże.

kowania nie może być mniejsza niż podwojona wartość największej częstotliwości występującej w sygnale⁴².

Podobnie sformułowane jest twierdzenie Nyquista, zgodnie z którym sygnał ciągły może być ponownie odtworzony z sygnału dyskretnego, jeśli był próbkowany z częstotliwością co najmniej dwa razy większą od granicznej częstotliwości swego widma⁴³. Częstotliwość Nyquista definiuje się jako najmniejszą, z jaką należy próbować sygnał, aby można go było odtworzyć bez przekłamań. Jeśli jednak w sygnale analogowym obecne są składowe o częstotliwości wyższej od częstotliwości Nyquista, spowoduje to powstanie błędów próbkowania (*aliasing*)⁴⁴.

Kwantowanie (kwantyzacja) przebiegu analogowego polega natomiast na przyporządkowaniu każdej próbce skończonej liczby poziomów amplitudy, odpowiadającej dyskretnym wartościom od zera do pełnego zakresu. Proces kwantowania polega na zaokrągłaniu wartości wyznaczonej próbki do takiej, którą – przy danej rozdzielczości cyfrowej – można zapisać w postaci zadanej liczby bitów. Widać zatem, że bardzo często będziemy mieli do czynienia z błędem kwantowania. Jest to różnica między wartością cyfrową (wynikiem kwantowania) a wartością analogową mierzonej wielkości. Na ogół wartości tego błędu dla poszczególnych pomiarów nie są znane. Najczęściej korzysta się ze statystycznego modelu dla procesu kwantowania, przyjmując, że błąd kwantowania jest białym szumem⁴⁵.

Aby skwantowany przebieg analogowy mógł zostać przesłany z urządzenia pomiarowego do komputera, musi zostać zakodowany (w postaci słowa binarnego). W informatyce powszechnie używany jest dwójkowy (binarny) system liczbowy, będący pozycyjnym systemem liczbowym, w którym podstawą pozycji są kolejne potęgi liczby 2. Do zapisu liczb potrzebne są więc tylko dwa znaki: 0 i 1. Jak w każdym pozycyjnym systemie liczbowym, liczby zapisuje się tu jako ciąg cyfr, z których każda jest mnożnikiem kolejnej potęgi liczby stanowiącej podstawę systemu. Wewnątrz sprzętu cyfrowego liczby są reprezentowane za pomocą cyfr dwójkowych, znanych jako bity (ang. *binary digit*). W przetwornikach analogowo-cyfrowych najczęściej wykorzystuje się: kod uzupełnień do dwóch⁴⁶, kod binarny z przesunięciem⁴⁷ oraz kod

⁴² Por. J. Izydorczyk, G. Płonka, G. Tyma, *Teoria sygnałów*, Helion, Gliwice 1999, s. 191.

⁴³ Por. tamże.

⁴⁴ *Aliasing* to szczególny typ zniekształcenia sygnału, który może wystąpić w trakcie przetwarzania cyfrowo-analogowego lub analogowo-cyfrowego. Występuje wówczas, gdy w wyniku intermodulacji częstotliwości próbkowania oraz składowych o częstotliwości wyższej od częstotliwości Nyquista pojawiają się zniekształcenia o częstotliwości leżącej w paśmie sygnału. Por. W. Nawrocki, *Rozproszone systemy pomiarowe*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006, s. 39.

⁴⁵ Por. T.W. Wojtatowicz, dz. cyt., s. 23.

⁴⁶ Opis binarnego kodu uzupełnieniowego znaleźć można w: tamże, s. 24–25.

⁴⁷ Opis kodu binarnego z przesunięciem znaleźć można w: tamże, s. 26–27.

znak-moduł⁴⁸. Za pomocą tych kodów zapisuje się binarnie słowa wyjściowe (liczby zapisane cyfrowo) odpowiadające wartościom wielkości wejściowych dla przetwornika analogowo-cyfrowego.

Każdy przetwornik analogowo-cyfrowy charakteryzuje się określonymi ilościowymi własnościami. Umożliwia to dobór odpowiedniego układu do spełnienia założonych, przez eksperymentatora, wymagań. Parametry te określają przede wszystkim, z jaką dokładnością i szybkością odbywa się proces przetwarzania.

Nominalny, pełny zakres przetwarzania jest wartością napięcia przetwarzanego, odpowiadającego maksymalnej wartości słowa wyjściowego powiększonej o 1. Natomiast rzeczywisty zakres przetwarzania jest to wartość napięcia wejściowego, której odpowiada maksymalna wartość zakodowana na wyjściu przetwornika. Różnica między nominalną a rzeczywistą wartością zakresu przetwarzania wynika z faktu, że w przetworniku n-bitowym jednym z 2^n możliwych stanów jest stan zerowy, więc istnieje $2^n - 1$ przedziałów kwantowania.

Rozdzielczość lub zdolność rozdzielcza (ang. *resolution*) wyraża najmniejszą wielkość sygnału wejściowego rozróżnialną przez przetwornik (może być wyrażona w miliwoltach jako wielkość przedziału kwantyzacji lub w procentach jako względna wartość przedziału kwantyzacji w stosunku do pełnego zakresu przetwarzania).

Częstotliwość przetwarzania przetwornika analogowo-cyfrowego określa się jako maksymalną liczbę przetworzeń napięcia wejściowego w wartości zakodowane w jednostce czasu. Natomiast czas przetwarzania to czas upływający pomiędzy momentem podania na wejściu przetwornika analogowo-cyfrowego sygnału inicjującego odczyt napięcia a momentem ustalenia się na wyjściu zakodowanej wartości napięcia.

Idealna charakterystyka przetwornika analogowo-cyfrowego może być przedstawiona jako linia schodkowa przyporządkowująca poszczególnym przedziałom przetwarzanego napięcia wejściowego określony sygnał cyfrowy (słowo kodowe). Jednakże charakterystyka rzeczywistego przetwornika analogowo-cyfrowego wykazuje odstępstwa od charakterystyki idealnego przetwornika. Odstępstwa te nazywane są błędami przetwornika.

Błąd skalowania (wzmocnienia) wynika ze zmiany nachylenia charakterystyki przetwornika w stosunku do charakterystyki idealnej. Błąd przesunięcia zera (ang. *offset*) określany jest przez wartość napięcia wejściowego dla zerowej wartości słowa wyjściowego (podaje się ją w woltach lub procentach zakresu przetwornika). Zarówno błąd zera, jak i błąd wzmocnienia mogą być wyeliminowane przez odpowiednią regulację przetwornika. Nie istnieje natomiast metoda zmniejszania błędów liniowości (gdy charakterystyka

⁴⁸ Opis kodu znak-moduł znaleźć można w: tamże, s. 27.

przetwornika nie jest zbliżona do liniowej) poza użyciem innego przetwornika z lepszą liniowością lub większą rozdzielczością. Istnieje jeszcze wiele innych błędów charakterystyk przetworników analogowo-cyfrowych (błędy nieliniowości, nieliniowość całkowita, całkowity błąd przetwarzania, nieliniowość różniczkowa, współczynnik nieliniowości różniczkowej, współczynniki termiczne zera i skali, współczynnik termiczny nieliniowości różniczkowej)⁴⁹. Problem polega na tym, że błędy przetwarzania nakładają się na siebie i ich odseparowanie nie jest proste (kompensacja jednego błędu może powodować zwiększenie innego).

Istnieje wiele metod przetwarzania sygnału analogowego na jego reprezentację cyfrową. Można podzielić je na metody pośrednie i bezpośrednie. W układach działających na podstawie metod bezpośrednich wielkość przetwarzana porównywana jest od razu z wielkością odniesienia (np. przetworniki z bezpośrednim porównaniem oraz przetworniki kompensacyjne). Przetworniki z bezpośrednim porównaniem (szczególnie przetworniki typu „flash”⁵⁰) gwarantują najkrótszy czas przetwarzania, są tanie, jednakże mają małą rozdzielczość i nie są odporne na zakłócenia (dlatego stosowane są głównie do przetwarzania sygnałów wizyjnych). Przetworniki kompensacyjne cechują się natomiast szczególnie małym błędem (lecz są trzy razy wolniejsze od przetworników „flash”⁵¹) i są wykorzystywane w badaniach eksperymentalnych. Przetwornik analogowo-cyfrowy może również działać na zasadzie kombinacji dwóch metod przetwarzania (np. przetworniki całkujące). Przetworniki z podwójnym całkowaniem są bardzo dokładne i odporne na zakłócenia, jednakże niezwykle wolne.

Tak więc przetwornik analogowo-cyfrowy albo jest szybki z małą rozdzielczością i generuje sporo błędów (przetwornik typu „flash”), albo jest bardzo dokładny, ale za to wolny (przetwornik z podwójnym całkowaniem oraz przetwornik kompensacyjny, który jest trochę szybszy od poprzedniego). Oznacza to, że aby dobrać odpowiedni przetwornik analogowo-cyfrowy w systemie komputerowego wspomaganie badań doświadczalnych (który spełnia twierdzenie Kotielnikowa-Shannona i ma odpowiednie pozostałe parametry ilościowe), trzeba dysponować znaczną wiedzą o badanym obiekcie oraz o zasadzie działania i parametrach sygnału wyjściowego urządzenia pomiarowego (czujnika).

⁴⁹ Błędy charakterystyk przetworników analogowo-cyfrowych zostały przystępnie opisane w: tamże, s. 30–33.

⁵⁰ Por. R. van de Plassche, *Scalone przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2001, s. 123–126.

⁵¹ Por. tamże, s. 154–156.

2.3. Interfejsy

Sygnal cyfrowy pomiędzy wyjściem przetwornika analogowo-cyfrowego a komputerem przesyłany jest poprzez interfejs (rodzaj przetwornika cyfrowo-cyfrowego)⁵², będący kolejnym sprawcą danych z taksonomii Hackinga⁵³. Przetworniki z komputerem można łączyć tylko wtedy, gdy spełniają warunki kompatybilności. Jest to możliwe, jeśli zachodzi: zgodność mechaniczna i konstrukcyjna gniazd przyłączeniowych oraz rozmieszczenia sygnałów w gnieździe, zgodność parametrów elektrycznych poszczególnych sygnałów, zgodność stosowanych kodów i protokołów komunikacyjnych oraz zgodność metod transmisji danych.

Interfejsy stosowane w układach eksperymentalnych wspomaganych komputerowo można podzielić na dwie główne kategorie: interfejsy szeregowe oraz interfejsy równoległe. Przesył szeregowy odbywa się za pośrednictwem jednego kanału łączącego nadajnik i odbiornik informacji. Informacja podzielona na słowa i znaki przesyłana jest znak po znaku. Bity są zatem wysyłane po kolei, a każdy z nich ma przyporządkowaną jednostkę czasu. Do tego niezbędna jest synchronizacja czasu między nadajnikiem (przetwornikiem analogowo-cyfrowym) a odbiornikiem (komputerem). Transmisja szeregowa polega więc na przesyłaniu ciągu bitów, bit po bicie, w takt zegara synchronizującego transmisję.

W przypadku przesyłu równoległego przesyłanie każdego bitu odbywa się oddzielnym kanałem. Wszystkie bity z grupy wysyłane są jednocześnie w określonej jednostce czasu, zatem ten sposób transmisji jest szybszy, ale ze względu na duże koszty kabli stosowany jest do przesyłu informacji na małe odległości. Transmisja równoległa polega więc na przysyłaniu ciągów słów (najczęściej 8-bitowych), słowo po słowie, w takt sygnałów synchronizujących.

Każdy interfejs może być scharakteryzowany przez wiele parametrów. Pierwszym z nich jest rodzaj transmisji (asynchroniczna lub synchroniczna, napięciowa lub prądowa, niesymetryczna lub różnicowa). Kolejnym, bardzo ważnym parametrem jest szybkość transmisji podawana w zależności od długości linii (najczęściej im dłuższa linia, tym mniejsza szybkość transmisji). Ważnym parametrem jest także maksymalna długość linii między przetwornikiem analogowo-cyfrowym a komputerem. Innymi są: zasilanie (czy interfejs może zasilać urządzenia zewnętrzne i jaka jest dopuszczalna obciążalność

⁵² Interfejs to zespół urządzeń i środków zapewniających dopasowanie mechaniczne, elektryczne i informacyjne oraz ustalających funkcjonalne relacje pomiędzy fizycznie odrębnymi częściami systemu, służących wymianie informacji pomiędzy nimi. Wymiana danych odbywa się poprzez kanał transmisyjny, którym może być przewód, światłowód, fale radiowe itp. Por. T.W. Wojtatowicz, dz. cyt., s. 43.

⁵³ Por. I. Hacking, *The Self-Vindication...*, s. 48.

takiego zasilania) oraz protokoły transmisji (protokoły komunikacyjne), czyli zbiory reguł logicznych określających sposób nawiązania łączności, prowadzenia bloku transmisji danych i kończenia transmisji między parami urządzeń.

W układach eksperymentalnych wspomaganych komputerowo dane pomiędzy przetwornikiem analogowo-cyfrowym a komputerem mogą być przesyłane przez różne interfejsy szeregowo. Interfejs RS 232C⁵⁴ był do niedawna powszechnie stosowany w komputerach PC. Istnieją trzy inne interfejsy szeregowo, na poziomie zasad transmisji zbliżone do RS 232C. Są to interfejsy: RS-422A, RS-423A⁵⁵ oraz RS-485⁵⁶. Poza wspomnianymi wyżej interfejsami na rynku pojawiło się wiele innych konstrukcji (np. USB⁵⁷, IEEE 1394⁵⁸), z których tylko interfejs USB na dobre zadomowił się w układach eksperymentalnych. Pojawiają się także interfejsy nowe: HART i IEC-1158⁵⁹.

Przez wiele lat interfejsy równoległe konkurowały z interfejsami szeregowymi pod względem szybkości transmisji. Powstawało wiele nowych standardów, jednakże zawsze po wprowadzeniu kolejnego interfejsu szeregowego o zbliżonej prędkości do interfejsu równoległego – te ostatnie znikaly. Nie były bowiem wygodne dla użytkownika wobec dużej liczby linii transmisyjnych. Współcześnie największą szybkość transmisji danych pomiarowych osiągnąć

⁵⁴ Standard RS-232 powstał w roku 1962 jako interfejs do współpracy terminali z modemem w dużych systemach komputerowych. Później powstawały jego odmiany, oznaczone kolejnymi literami od A do F. Jednakże najpowszechniej obecnie stosowany jest w wersji C w prostych systemach pomiarowych, z małą szybkością transmisji danych (do 20 Kb/s) na małe odległości (do 15 m) i wymianą informacji jedynie między dwoma urządzeniami. Szczegółowy opis interfejsu RS-232C znaleźć można w: W. Winięcki, *Organizacja komputerowych systemów pomiarowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006, s. 60–80.

⁵⁵ Dla zwiększenia szybkości transmisji (do 100 Kb/s dla RS-423A i do 10 Mb/s dla RS-422A), zasięgu (do 1200 m) oraz ochrony przed zakłóceniami wprowadzono dwuprzewodowe interfejsy RS-422A oraz RS-423A. Standard elektryczny tych interfejsów dopuszcza dołączenie do jednej pary przewodów jednego nadajnika i aż dziesięciu odbiorników. Opis interfejsów RS-423A oraz 422A znaleźć można w: tamże, s. 80–82.

⁵⁶ Rozwinięciem standardu RS-422A jest interfejs szeregowy RS-485. Oferuje on możliwość podłączenia aż 32 odbiorników i tyle samo nadajników. Opis interfejsu RS-485 znaleźć można w: tamże, s. 82–83.

⁵⁷ Od pewnego czasu standard USB stał się podstawowym interfejsem szeregowym komputerów. Maksymalnie do komputera można podłączyć 127 urządzeń (poprzez huby lub koncentratory), działających w czterech typach transmisji oraz z wieloma szybkościami (USB 1.1 – 12 Mb/s; USB 2.0 – 480 Mb/s; USB 3.0 – 5 Gb/s). Jest to interfejs elastyczny i wygodny dla użytkownika, ale jego oprogramowanie jest skomplikowane, zaś maksymalna długość połączenia niewielka (5 m).

⁵⁸ Podobny funkcjonalnie interfejs IEEE 1394 (*FireWire*, *iLink*) umożliwia połączenie do 63 urządzeń peryferyjnych w strukturę drzewiastą. Urządzenia są równouprawnione, co pozwala na transmisję bezpośrednio pomiędzy urządzeniami dołączonymi do magistrali bez pośrednictwa komputera. Interfejs ma kilka standardów komunikacji zapewniających transfer rzędu: 100, 200, 400, 800 oraz – w najnowszych wersjach – 1600 i 3200 Mb/s. Długość kabla ograniczona jest do 4,5 m (można stworzyć specjalne połączenie nawet szesnastu takich odcinków), natomiast wersja optyczna – do ok. 1000 m. Por. T.W. Wojtatowicz, dz. cyt., s. 63.

⁵⁹ Por. tamże, s. 44–63.

można, stosując kasetowe lub modułowe systemy pomiarowe z interfejsem równoległym, gdyż w takich konstrukcjach liczba linii przesyłowych nie gra roli.

Pierwszym interfejsem równoległym, który pojawił się w komputerach, był interfejs zbudowany na bazie układu programowalnego sterownika równoległego wejścia/wyjścia Intel'a o symbolu 8255 lub układ Motoroli 6522⁶⁰. W 1994 roku opracowano interfejs IEEE 1284 jako standard zapewniający kompatybilność wsteczną z używanym od lat siedemdziesiątych XX wieku jednokierunkowym portem Centronics (LPT), stosowanym do podłączania drukarek⁶¹.

W 1965 roku firma Hewlett-Packard zaprojektowała interfejs HP-IB, który miał służyć do łączenia i kontrolowania programowalnych urządzeń. Zaletą tego interfejsu była duża prędkość transmisji (do 1 Mb/s), dzięki czemu zyskał duże znaczenie w połączeniach pomiędzy komputerami a urządzeniami zewnętrznymi (od 1975 roku jest standardem IEEE 488 w Stanach Zjednoczonych, a od 1976 roku – IEC-625 w Europie)⁶². Odmianą tego interfejsu, produkowaną przez innych niż HP producentów, jest interfejs GP-IB. Do magistrali tej może być przyłączonych maksymalnie piętnaście urządzeń, a długość kabla (składającego się z co najmniej 24 kabli) pomiędzy parą urządzeń nie powinna przekraczać 2 m.

Interfejs VXI jest rozwijany od roku 1987 i stanowi najbardziej zaawansowany technologicznie sposób sprzęgania aparatury kontrolno-pomiarowej. Przeznaczony jest do sterowania i obsługi zautomatyzowanych, modułowych systemów pomiarowych. W pełnym systemie może być zainstalowanych do 256 urządzeń, a szybkość transmisji może maksymalnie wynosić 40 Mb/s⁶³. Zasady organizacji i zarządzania podsystemem VXI przypominają w dużym stopniu zasady, na jakich oparte jest funkcjonowanie wieloprocessorowych systemów komputerowych.

Interfejs VXI jest przykładem kasetowego systemu pomiarowego. Innymi są: system pomiarowy CAMAC (o dwadzieścia lat starszy od VXI)⁶⁴ oraz modułowy system pomiarowy PXI. W systemach kasetowych urządzenia pomiarowe mają postać kaset zawierających moduły z blokami funkcjonalnymi systemu pomiarowego. Nowym standardem systemu pomiarowego z interfejsem równoległym jest system modułowy PXI z magistralą interfejsową PCI (podstawową magistralą komputera PC)⁶⁵. Jego odmianą jest system PXI

⁶⁰ Por. tamże, s. 64–66.

⁶¹ Por. tamże, s. 66.

⁶² Szczegółowy opis standardu IEC-625 znaleźć można w: W. Winiński, dz. cyt., s. 92–169.

⁶³ Szczegółowy opis standardu VXI znaleźć można w: tamże, s. 170–200.

⁶⁴ Opis systemu CAMAC znaleźć można w: W. Nawrocki, *Komputerowe systemy pomiarowe*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006, s. 223–226.

⁶⁵ PCI (ang. *Peripheral Component Interconnect*) to magistrala komunikacyjna służąca do przyłączania kart rozszerzeń do płyty głównej w komputerach klasy PC. Po raz pierwszy

Express z magistralą PCI Express⁶⁶. Zasadnicza różnica między systemem kasetowym (CAMAC, VXI) a systemem modułowym (PXI, PXIe) polega na tym, że moduły przeznaczone do określonego systemu kasetowego mogą pracować wyłącznie jako elementy tego systemu i są bezużyteczne poza nim. Natomiast moduły systemu modułowego PXI lub PXIe mogą być podłączone do gniazda magistrali (PCI, PCIe) wewnątrz komputera lub do oddzielnego, wolno stojącego przyrządu. Połączone moduły tworzą system pomiarowy PXI albo, wraz z programem graficznym, wirtualny przyrząd pomiarowy⁶⁷.

2.4. Komputer

Komputer wraz z oprogramowaniem we współczesnych eksperymentach może wspomagać, a nawet zastępować pracę eksperymentatora. Można go zatem zaliczyć do sprawców danych z taksonomii Hackinga⁶⁸. Komputer będący częścią układu eksperymentalnego może w tym systemie pełnić wiele różnorodnych funkcji: sterować przebiegiem eksperymentu (poprzez interfejs, przetworniki cyfrowo-analogowe i urządzenia wykonawcze), rejestrować i przetwarzać dane napływające z urządzenia pomiarowego (poprzez przetwornik analogowo-cyfrowy i interfejs), obsługiwać urządzenia peryferyjne (monitor, klawiaturę, mysz, drukarkę) służące do sterowania układem eksperymentalnym i przedstawiania wyników pomiarów oraz obliczeń, sterować transmisją danych poza układ eksperymentalny (np. przez Internet). Warto zauważyć, że zainstalowanie podstawowych urządzeń peryferyjnych w układzie eksperymentalnym wspomaganym komputerowo: klawiatury i monitora, oraz rejestracja danych są niezbędne w każdym systemie pomiarowym, a przetwarzanie danych pomiarowych jest zwykle bardzo pożądane.

została publicznie zaprezentowana w 1992 roku jako rozwiązanie umożliwiające komunikację pomiędzy procesorem i kartami szybszą niż stosowane dawniej ISA. Dodatkową zaletą PCI jest to, że nie ma znaczenia, czy w gnieździe jest karta sterownika dysków (np. SCSI), sieciowa czy graficzna. Każda karta pasująca do gniazda PCI funkcjonuje bez jakichkolwiek problemów, gdyż nie tylko sygnały, ale i przeznaczenie poszczególnych styków gniazda są znormalizowane. Przy częstotliwości taktowania 33 MHz i 32-bitowym słowie magistrala PCI osiąga szybkość transmisji 133 MB/s. Dla nowych procesorów 64-bitowych podwaja się przepustowość magistrali PCI do 266 MB/s.

⁶⁶ PCI Express (ang. *Peripheral Component Interconnect Express*) to magistrala komunikacyjna służąca do instalacji kart rozszerzeń w płycie głównej. Miała premierę w 2004 roku i od tego czasu umożliwia zastąpienie starych magistral PCI oraz AGP. Jej przepustowość, w zależności od wersji, waha się od 500 MB/s nawet do 32 000 MB/s (32 GB/s).

⁶⁷ Komputerowa karta pomiarowa wraz z komputerem i oprogramowaniem tworzy wirtualny przyrząd pomiarowy. Więcej o komputerowych kartach pomiarowych i przyrządach wirtualnych znaleźć można w: tamże, s. 241–255; T.W. Wojtatowicz, dz. cyt., s. 79–83.

⁶⁸ Por. I. Hacking, *The Self-Vindication...*, s. 48.

Współczesne komputery przechowują informacje w postaci ciągów bitów. Bit to cyfra 0 lub 1. Zapamiętanie bitu przez maszynę liczącą wymaga istnienia w niej urządzenia zdolnego do przyjmowania jednego z dwóch możliwych stanów (np. przełącznika elektrycznego, przekaźnika). Do gromadzenia danych w komputerze stosuje się zestaw wielu układów, z których każdy jest zdolny do zapamiętania jednego bitu. Taki magazyn bitów nosi nazwę pamięci głównej lub pamięci operacyjnej komputera. Układy przechowujące dane w komputerze zorganizowane są w jednostki, zwane komórkami lub słowami. Zazwyczaj w jednej komórce mieści się 8 bitów. Ośmiobitowe ciągi danych stały się tak powszechne, że zarezerwowano dla nich specjalny termin: bajt. Każda komórka w pamięci komputera ma przypisaną unikatową nazwę, zwaną adresem. Ważną konsekwencją organizacji pamięci głównej w małe, adresowane komórki jest to, że dostęp do każdej komórki może odbywać się niezależnie od dostępu do pozostałych. Oznacza to, iż dane zgromadzone w pamięci głównej można przetwarzać w dowolnej kolejności. Dlatego też pamięć główną nazywa się często pamięcią RAM (ang. *random access memory* – pamięć o dostępie swobodnym).

Ze względu na ograniczony rozmiar pamięci głównych (operacyjnych) i ulotność danych w nich przechowywanych (po wyłączeniu zasilania następuje utrata zawartości pamięci RAM), większość komputerów wyposaża się w dodatkowe nośniki do gromadzenia danych. Są to systemy pamięci masowej (dyski magnetyczne, napędy dysków optycznych itd.), które oferują trwalszy zapis znacznie większej ilości danych względem pamięci głównej. Jednakże są od niej znacznie wolniejsze.

Układ elektroniczny, odpowiedzialny za wykonywanie poszczególnych operacji w komputerze, nie jest bezpośrednio połączony z komórkami pamięci głównej. Jest on wydzielony w postaci części komputera, tj. jednostki centralnej (CPU – ang. *central processing unit*), zwanej najczęściej procesorem. Jednostka centralna składa się z dwóch części: jednostki arytmetyczno-logicznej, która zawiera układy odpowiedzialne za operowanie danymi, oraz jednostki sterującej, zawierającej układy koordynujące czynności wykonywane przez komputer. Jednostka centralna mieści komórki przypominające komórki pamięci, zwane rejestrami. Przeznaczone są one do tymczasowego przechowywania informacji, którymi manipuluje jednostka centralna. W wielu komputerach istnieje jeszcze jeden dodatkowy element, często umieszczany wewnątrz jednostki centralnej. Jest to pamięć podręczna, do której czas dostępu zbliżony jest do czasu dostępu do rejestrów jednostki centralnej. W pamięci podręcznej komputer stara się przechowywać kopię tego obszaru pamięci głównej, który ma w danej chwili największe znaczenie dla wykonywanych obliczeń. Magistrala umożliwia natomiast przesyłanie ciągów bitów między jednostką centralną komputera a pamięcią główną.

Jednostka centralna potrafi wykonywać tzw. rozkazy maszynowe. Można je podzielić na trzy podstawowe kategorie: 1) grupa rozkazów przesyłania danych (powodujących przenoszenie danych z jednego miejsca w inne), 2) grupa rozkazów arytmetyczno-logicznych (informujących jednostkę sterującą o konieczności zlecenia jednostce arytmetyczno-logicznej wykonania pewnych czynności, np. dodawania, porównania itd.) oraz 3) grupa rozkazów sterujących (zawiadujących wykonaniem programu, np. rozkazy skoku)⁶⁹.

Pierwsze komputery charakteryzowały się małą elastycznością. Program wykonywany przez to urządzenie wbudowany był w jednostkę sterującą i stanowił integralną część maszyny. Przełomem (w roku 1945), który najczęściej przypisywany jest Johnowi von Neumannowi⁷⁰, było to, że program podobnie jak dane można zakodować i przechowywać w pamięci głównej. Zaprojektowano jednostkę sterującą tak, aby mogła pobierać program z pamięci głównej, odkodowywać rozkazy i wykonywać je. W ten sposób łatwo można było zmieniać program za pomocą zmiany zawartości pamięci komputera. Koncepcja programu składowanego w pamięci stała się standardowym podejściem, które jest stosowane także współcześnie.

Zestaw rozkazów razem z ich kodami nazywa się językiem maszynowym⁷¹, ten zaś składa się zazwyczaj z dwóch części: pola kodu operacji (np. STORE) oraz pola argumentu (np. który rejestr zawiera dane do zapamiętania w pamięci oraz w której komórce pamięci należy je zapamiętać). Komputer wykonuje program zapamiętany w pamięci, kopiując – w miarę potrzeb – rozkazy z pamięci głównej do jednostki sterującej. Po wprowadzeniu rozkazu do

⁶⁹ Por. J.G. Brookshear, *Informatyka w ogólnym zarysie*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2003, s. 88-90.

⁷⁰ „Wielu twierdzi, że pomysł składowania programu w pamięci komputera pochodzi od J.P. Eckerta juniora, z Moore School, a John von Neumann dowiedział się o tym podczas swoich wizyt w Moore School”, tamże, s. 91.

⁷¹ Zaprojektowanie języka maszynowego wymaga podjęcia wielu decyzji. Jedną z nich jest to, czy budować złożoną maszynę, która potrafi dekodować i wykonać wiele różnych rozkazów, czy też maszynę prostą z niedużym zbiorem rozkazów. W pierwszym przypadku mamy do czynienia z komputerem o złożonym zbiorze rozkazów (CISC – ang. *complex instruction set computer*), w drugim – z komputerem o zredukowanym zbiorze rozkazów (RISC – ang. *reduced instruction set computer*). Bardziej złożoną maszynę obliczeniową łatwiej jest programować, ponieważ do realizacji danego zadania wymaga mniejszej liczby rozkazów niż maszyna prosta. Złożone maszyny obliczeniowe jest jednak trudniej zaprojektować, są droższe w budowie i eksploatacji. Ponadto większość złożonych rozkazów ma bardzo ograniczone zastosowania, a ponadto jedynie zwiększają koszt komputera. Zwolennicy architektury RISC twierdzą, że lepszym podejściem jest zaprojektowanie prostej maszyny z małym, dobrze przemyślanym zbiorem rozkazów, co jednak będzie oznaczało, że programy napisane w języku maszynowym będą dłuższe niż ich odpowiedniki w procesorach CISC, gdyż do wykonywania złożonych operacji reprezentowanych w architekturze CISC jednym rozkazem potrzeba większej liczby rozkazów dla procesora RISC. Zarówno procesory CISC, jak i RISC są dostępne komercyjnie. Procesory klasy Pentium opracowane przez firmę Intel są przykładami architektury CISC. Procesory serii PowerPC opracowane przez Apple Computer, IBM i Motorolę są przykładami architektur RISC.

jednostki sterującej jest on dekodowany i wykonywany. Kolejność pobierania rozkazów z pamięci jest zgodna z kolejnością ich zapisania w pamięci, chyba że wystąpi rozkaz skoku. Jednostka sterująca realizuje swoje zadanie, wykonując cyklicznie pewien algorytm, zwany cyklem maszynowym. Składa się on z trzech kroków: pobrania rozkazu, dekodowania rozkazu oraz wykonania rozkazu. Po zakończeniu wykonania rozkazu jednostka sterująca ponownie rozpoczyna cykl maszynowy⁷².

W celu skoordynowania czynności wykonywanych w poszczególnych fazach cyklu maszynowego należy zsynchronizować działanie wielu układów. Układy takie łączy się wtedy z układem generującym sygnał pulsujący, zwanym zegarem. Zegar ten oscyluje, stale zmieniając wartości między 0 a 1. Pozostałe układy elektroniczne komputera buduje się tak, aby ich akcje były wyzwalane za pomocą różnych faz cyklu zegara. Szybkość zegara z kolei determinuje tempo, w jakim komputer wykonuje swój cykl maszynowy.

W pamięci głównej komputera można jednocześnie zapamiętać wiele programów, o ile zostaną umieszczone w rozłącznych obszarach pamięci. Dane są przechowywane w pamięci, podobnie jak programy, w postaci ciągów zer i jedynek. Komputer nie jest w stanie odróżnić danych od programu. Jednakże składowanie zarówno danych, jak i programów w jego pamięci nie jest złą praktyką. Co więcej, jest to bardzo użyteczne, gdyż dzięki temu program może manipulować innymi programami (a nawet samym sobą), tak jakby manipulował danymi. Dzięki temu programy mogą się uczyć lub tworzyć inne programy.

Pamięć główna oraz jednostka centralna stanowią trzon komputera. Komunikację między tym trzonem a innymi urządzeniami obsługują zazwyczaj urządzenia pomocnicze, zwane kontrolerami. W komputerach osobistych kontroler jest płytą (kartą) z układami scalonymi, umieszczaną w gniazdach na płycie głównej. Każdy kontroler obsługuje komunikację z konkretnym typem urządzenia (monitora, dysku twardego, napędu optycznego). Umieszczając kontroler w jednym z gniazd płyty głównej, przyłącza się go elektronicznie do tej samej magistrali, która łączy jednostkę centralną komputera z pamięcią operacyjną.

Miejsce dołączenia komputerowej karty sterownika systemu interfejsu (karty interfejsowej) jest bardzo istotne ze względu na szybkość przetwarzania danych. Im dalej od procesora (w architekturze komputera) będzie dołączona

⁷² W celu przyspieszenia wykonywania rozkazów stosuje się kilka strategii: miniaturyzację jednostki centralnej (co skraca czasy przepływu impulsów elektrycznych między jej elementami), przetwarzanie potokowe (nałożenie na siebie kilku faz cyklu maszynowego i na przykład łączne wykonywanie pobierania danych oraz wykonywania rozkazu), przetwarzanie równoległe (wykonywanie wielu czynności w tym samym czasie przy użyciu wielu jednostek centralnych w komputerach wieloprocessorowych). Por. J.G. Brookshear, dz. cyt., s. 112-115.

karta interfejsu, tym wolniejsza będzie komunikacja z tą kartą i wolniejsza praca tej karty. Modułowa konstrukcja nowoczesnych komputerów klasy PC pozwala na podłączenie do różnych fragmentów magistrali komputera dodatkowych układów (kart, układów pamięci) oraz urządzeń peryferyjnych. Dodatkowe karty komputerowe, w postaci płytek drukowanych, dołącza się do gniazd wewnątrz komputera w przestrzeni przewidzianej do tego celu, w tzw. gniazdach rozszerzeń (ang. *slot*). Urządzenia zewnętrzne natomiast dołącza się do złączy (gniazd lub wtyków – w zależności od rodzaju interfejsu) wmontowanych w obudowę komputera. Najważniejszy układ scalony komputera (procesor) połączony jest z pozostałą częścią komputera szyną FSB (ang. *front side bus*). Do szyny FSB mogą być dołączane kolejne układy scalone, które są kontrolerami pamięci operacyjnej, kontrolerami innych magistral (np. PCI, PCIe), kontrolerami urządzeń wejścia-wyjścia (klawiatura, mysz, monitor), w skład których wchodzi sterowniki najpopularniejszych w komputerach PC interfejsów (np. starszy RS-232 i nowszy USB).

Parametry użytkowe układu eksperymentalnego wspomaganego komputerowo zależą od parametrów komputera będącego częścią tego układu. Ważna jest możliwość podłączenia szybkiego interfejsu (komunikacja z urządzeniem pomiarowym i urządzeniami wykonawczymi) oraz pojemność pamięci na dysku twardym (rejestracja wielu wyników pomiarów). Komputer jest niewątpliwie podstawowym blokiem współczesnych układów eksperymentalnych. Jednakże kluczowy element, wokół którego zbudowany jest taki układ, to interfejs systemu. Użyty rodzaj interfejsu praktycznie przesądza o strukturze układu eksperymentalnego oraz w dużym stopniu decyduje o jego możliwościach i ograniczeniach technicznych. Warto jednak podkreślić, że parametry każdego interfejsu są znane, i jeśli wiadomo, jakie ilości danych na jednostkę czasu będą napływać z przetwornika analogowo-cyfrowego, łatwo dobrać odpowiedni interfejs spełniający zadane parametry pracy.

2.5. Oprogramowanie

Istotnym elementem układu eksperymentalnego wspomaganego komputerowo jest jego oprogramowanie, które także możemy zaliczyć do sprawców danych z taksonomii prac eksperymentalnych Hackinga⁷³. Klasyczny sposób projektowania oprogramowania w takim systemie eksperymentalnym polega na samodzielnym opracowywaniu od podstaw programu sterującego, przy wykorzystaniu do tego celu języków programowania wysokiego poziomu (np. C, Pascal, Basic) wzbogaconych o zestaw poleceń służących do komunikacji

⁷³ Por. I. Hacking, *The Self-Vindication...*, s. 48.

z interfejsem umożliwiającym w prosty sposób odbiór zdigitalizowanych informacji od urządzeń pomiarowych. Stopień trudności podczas tworzenia takiego programu zależy od tego, na jakim poziomie dostępne są dla programisty instrukcje sterujące interfejsu i jak są udokumentowane. Konkretna realizacja zależy zatem od użytego rodzaju interfejsu, przetworników analogowo-cyfrowych i urządzeń pomiarowych.

Krokiem w kierunku ujednoczenia i uproszczenia procesu projektowania oraz uruchamiania systemów pomiarowych było ustalenie przez największych światowych producentów aparatury pomiarowej przemysłowego standardu, który określał metody programowania przyrządów pomiarowych. Tak powstał standard instrukcji programujących pracę przyrządów pomiarowych⁷⁴ o nazwie SCPI (ang. *Standard Commands for Programmable Instruments*). Podaje on definicje zestawu instrukcji, które niezależnie od rodzaju czy modelu przyrządu pomiarowego, pozwalają na pełne zaprogramowanie jego pracy, uzależniając sposób programowania jedynie od realizowanego zadania pomiarowego. Ze względu na to, że SCPI stanowi standard instrukcji uniwersalnych, może być stosowany w pracy nie tylko z – najczęściej używanym w zintegrowanych przyrządach pomiarowych – systemem interfejsu w standardzie IEEE-488, ale także innymi (np. RS-232C, VXI).

Kolejnym krokiem ułatwiającym projektowanie oprogramowania działającego w układach eksperymentalnych wspomaganych komputerowo było powstanie tzw. zintegrowanych środowisk programowych. Najwięksi producenci aparatury pomiarowej oferują, oprócz aparatury, firmowe języki programowania. National Instruments oferuje języki LabVIEW i LabWindows. Firma Agilent Technologies oferuje język VEE (dawniej – HP VEE), a firma Keithley język TestPoint. Można oszacować, że ponad 90% programów do układów eksperymentalnych wspomaganych komputerowo tworzonych jest w tych językach⁷⁵. Wymienione języki programowania mają bardzo wiele zalet, ale dwie wady: są bardzo kosztowne (ceny najprostszyc wersji tego oprogramowania zaczynają się od kilku tysięcy dolarów) oraz bardzo rozbudowane, co zmusza eksperymentatorów do czasochłonnej nauki danego języka, aby stworzyć choćby prosty program do odczytywania danych z urządzenia pomiarowego. Taki rozbudowany język programowania oferuje programiście wiele użytecznych funkcji i procedur w zakresie sterowania pomiarami, przetwarzania sygnałów lub ekspozycji otrzymanych wyników. Zatem, z perspektywy zaawansowanego programisty, to, że język jest tak rozbudowany, jest dużą

⁷⁴ Przyrząd pomiarowy jest urządzeniem zintegrowanym. Najczęściej składa się z kilku bloków (np. urządzenia pomiarowego, przetwornika analogowo-analogowego, przetwornika analogowo-cyfrowego, interfejsu, przetwornika cyfrowo-analogowego) funkcjonalnie połączonych w jedną całość. Por. J. Piotrowski (red.), dz. cyt., s. 19–21.

⁷⁵ Por. W. Nawrocki, *Rozproszone systemy...*, s. 310.

zaletą. Kolejną bardzo ważną zaletą takiego środowiska programistycznego jest biblioteka sterowników programowych do konkretnych typów przyrządów pomiarowych (multimetrów, oscyloskopów cyfrowych, generatorów cyfrowych, komputerowych kart pomiarowych, kart interfejsowych, częstotściomierzy i innych). Główni producenci przyrządów pomiarowych przekazują na rynek nowe urządzenie ze sterownikami, napisanymi dla najważniejszych środowisk programistycznych: LabVIEW, LabWindows, VEE oraz TestPoint. Jednakże na przykład w LabVIEW znajdują się sterowniki nie tylko do przyrządów firmy National Instruments (producenta LabVIEW), ale także do przyrządów innych firm (Agilent, Tektronix, LeCroy, Keithley, Rohde & Schwartz, Stanford Research).

Oprócz wymienionych istnieje wiele innych, mniej rozpowszechnionych języków. Ważniejsze z nich to: DasyLab firmy Dasytec, GeniDAQ firmy Advantech oraz LabVIEW Express firmy National Instruments (jest to znacznie uproszczona wersja LabVIEW, a właściwie oddzielny język do programowania systemów pomiarowych).

Programy do układów eksperymentalnych wspomaganych komputerowo można także opracować w ogólnym języku programowania, bogatym w procedury graficzne, np. Visual C++ lub Visual Basic. W przypadku prostych programów, bez rozbudowanych funkcji przetwarzania i ekspozycji danych, mogą być one nawet lepsze od powstałych w wyspecjalizowanych językach. Ich zalety to małe objętości plików i większa szybkość działania.

Dla przykładu, w dalszej części niniejszego podrozdziału krótko przedstawię najpopularniejsze środowisko programistyczne LabVIEW⁷⁶. Jego integralną częścią jest graficzny język programowania G, w ramach którego nastąpiło odejście od sekwencyjnego zapisu programu, charakterystycznego dla tradycyjnych języków programowania. Programowanie w języku G sprowadza się do blokowego przedstawienia operacji, z których składa się program, i logicznego powiązania ich między sobą. Każdy program w LabVIEW składa się z dwóch głównych części: graficznego panelu użytkownika, który pełni rolę wirtualnej płyty czołowej przyrządów tworzących system pomiarowy, oraz diagramu funkcjonalnego (schematu blokowego) z naniesionymi ikonami bloków funkcjonalnych i połączeniami między blokami funkcjonalnymi

⁷⁶ Wyczerpujące omówienie podstaw programowania w środowisku LabVIEW znaleźć można w: W. Tłaczała, *Środowisko LabVIEW w eksperymencie wspomaganim komputerowo*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002. Autor w pierwszym rozdziale swojej monografii szczegółowo omawia podstawy programowania w LabVIEW. W rozdziale drugim przedstawia zwięzły przegląd wybranych zagadnień związanych z modelowaniem i symulacją komputerową w technice pomiarów. W rozdziale trzecim opisuje metodykę projektowania urządzeń wirtualnych w środowisku LabVIEW na przykładzie ćwiczeń laboratoryjnych prowadzonych na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej.

przyrządu wirtualnego⁷⁷. „Urządzenia wirtualne są to takie urządzenia, które umożliwiają oddziaływanie na rzeczywiste urządzenie pomiarowe za pomocą myszki i klawiatury komputera, natomiast dane pomiarowe udostępniają użytkownikowi za pośrednictwem monitora”⁷⁸.

Zintegrowane środowisko LabVIEW wykorzystuje się szeroko w takich dziedzinach nauki i techniki, jak: fizyka, biologia, chemia, mechanika, a ponadto w telekomunikacji, biomedycynie oraz przemyśle półprzewodników. Przykładowe zastosowania w fizyce to: pomiary promieniowania jonizującego, pomiary wielkości elektrycznych, czasu, siły, ciśnienia, temperatury czy badanie pól elektromagnetycznych⁷⁹.

Środowisko LabVIEW umożliwia projektowanie i konstruowanie urządzeń wirtualnych stosowanych w układach eksperymentalnych wspomaganych komputerowo. Jest to zintegrowane środowisko programowania obejmujące: zbieranie danych, ich obróbkę oraz wizualizację otrzymanych rezultatów. Komputer z oprogramowaniem LabVIEW, wyposażony w karty pomiarowe z przetwornikami analogowo-cyfrowymi i cyfrowo-analogowymi, licznikami, buforami wejścia-wyjścia, może stanowić wielofunkcyjne urządzenie o ogromnych możliwościach.

Za pomocą urządzeń wirtualnych utworzonych w środowisku LabVIEW możliwa jest obsługa rzeczywistych urządzeń zewnętrznych wyposażonych w interfejsy (np. RS-232C lub inne wymienione w podrozdziale 2.3), a także systemy aparatury modułowej (np. VXI). Do ich obsługi opracowano ponad 600 sterowników urządzeń, co znacznie upraszcza sterowanie z wykorzystaniem komputerów wieloma powszechnie używanymi przyrządami pomiarowymi⁸⁰. Ponadto biblioteki LabVIEW zostały wyposażone w narzędzia do analizy statystycznej, operacji na macierzach i liczbach zespolonych, obróbki sygnałów i dopasowywania krzywych. Warto także podkreślić, że język G umożliwia graficzne przedstawianie rezultatów pomiarów i obliczeń, np. w postaci przebiegów lub różnego rodzaju wykresów.

Zalety LabVIEW spowodowały zainteresowanie tym narzędziem i wdrożenie go w pracach badawczych, choćby w takich ośrodkach naukowych, jak CERN (np. największy na świecie akcelerator LHC używa oprogramowania LabVIEW) i NASA (np. za pomocą LabVIEW testowany jest następca teleskopu Hubble’a – kosmiczny teleskop Jamesa Webba)⁸¹.

⁷⁷ Por. W. Nawrocki, *Rozproszone systemy...*, s. 309-315.

⁷⁸ W. Tłaczała, dz. cyt., s. 13.

⁷⁹ Por. P. Targowski, M. Sylwestrzak, T. Bojraszewski, *Środowisko LabVIEW – własności i przykłady zastosowań*, „Postępy Fizyki” 2009, t. 60, z. 6, s. 255-256.

⁸⁰ Por. W. Tłaczała, dz. cyt., s. 10.

⁸¹ Informacje te znaleźć można na stronie producenta LabVIEW, firmy National Instruments: www.ni.com, 13.05.2009 r. (dostęp: 22.04.2013).

2.6. Inne elementy (przetworniki cyfrowo-analogowe, urządzenia wykonawcze)

Komputer wraz ze stosownym oprogramowaniem, będący częścią układu eksperymentalnego, może także poprzez interfejs sterować przebiegiem eksperymentu. Dzieje się tak, gdy sygnały cyfrowe z komputera zostaną przetworzone na sygnały analogowe, bowiem dopiero wtedy mogą zostać użyte do sterowania urządzeniami wykonawczymi. Widać zatem, że przetworniki cyfrowo-analogowe oraz urządzenia wykonawcze da się zaliczyć do źródeł modyfikacji z taksonomii prac eksperymentalnych Hackinga, ponieważ służą do wywoływania zmian w materialnej strukturze badanego obiektu⁸².

Zasadą działania przetworników cyfrowo-analogowych jest to, aby dla każdego cyfrowego słowa kodowego wytworzyć sygnał analogowy (napięcie lub prąd) o takiej samej wartości, jaką w procesie przetwarzania analogowo-cyfrowego przypisuje się danemu słowu kodowemu. Charakterystyka rzeczywistego przetwornika cyfrowo-analogowego wykazuje wiele odstępstw od charakterystyki idealnej, podobnych do tych dla przetwornika analogowo-cyfrowego (omówionych w podrozdziale 2.2). Spośród najczęściej występujących należy wymienić: błąd przesunięcia zera (*offset*), błąd wzmocnienia i błąd nieliniowości (całkowitej i różnicowej). Na ogół wszystkie błędy występują równocześnie w każdym przetworniku, a ponadto ich wartość ulega zmianie w czasie, w wyniku zmian temperatury oraz starzenia się przetwornika. Praktycznie we wszystkich przetwornikach istnieje możliwość zewnętrznej regulacji błędów przesunięcia zera i błędów wzmocnienia. Nie istnieje natomiast możliwość regulacji błędów liniowości. W tym przypadku poprawę przetwarzania cyfrowo-analogowego można uzyskać jedynie przez zastosowanie przetwornika wysokiej jakości lub użycie przetwornika o większej rozdzielczości niż niezbędne minimum.

Najważniejszymi parametrami przetwornika cyfrowo-analogowego są: zakres przetwornika (wartość maksymalna wytwarzanego napięcia), krok kwantowania (najmniejszy skok sygnału wyjściowego), liczba kroków kwantowania sygnału wyjściowego (długość słowa kodowego), dokładność przetwornika (największa różnica między zmierzonym napięciem wyjściowym a obliczonym z teoretycznej rozdzielczości przetwornika), czas ustalania (przedział czasu od chwili zmiany sygnału cyfrowego na wejściu do momentu ustalenia się właściwego sygnału analogowego na wyjściu), stosunek sygnału do szumu, częstotliwość przetwarzania (liczba okresów przetwarzania na sekundę)⁸³.

⁸² Por. I. Hacking, *The Self-Vindication...*, s. 46–47.

⁸³ Por. W. Nawrocki, *Komputerowe systemy...*, s. 37–38.

Istnieje wiele różnych rodzajów przetworników cyfrowo-analogowych⁸⁴, które – ze względu na ich budowę – można podzielić na dwie podstawowe grupy: przetworniki z rezystancyjnym dzielnikiem napięcia lub prądu oraz przetworniki o zmiennym współczynniku wypełnienia ciągu impulsów.

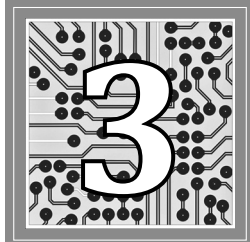
Urządzenia wykonawcze natomiast są to „wyjściowe człony układów regulacji oddziałujące bezpośrednio na strumień materiałów lub energii przepływający przez obiekt, którego wybrany parametr jest regulowany”⁸⁵. Najbardziej ogólnie można je podzielić, w zależności od rodzaju energii zasilającej, na: elektryczne, pneumatyczne i hydrauliczne. W ramach tych podziałów możemy wyróżnić urządzenia wykonujące pewną pracę (siłowniki)⁸⁶ oraz urządzenia sterujące strumieniami materiałów lub energii (nastawniki)⁸⁷. Nastawniki strumienia materiałów (np. zawory regulacyjne) muszą współpracować z napędzającymi je siłownikami, zaś inne rodzaje nastawników mogą stanowić samodzielne człony wykonawcze regulatorów.

⁸⁴ Opis pięciu podstawowych konstrukcji przetworników cyfrowo-analogowych (przetworniki z rezystancyjnym dzielnikiem napięcia lub prądu, przetworniki mnożące, przetworniki o zmiennym współczynniku wypełnienia ciągu impulsów, przetworniki nieliniowe, przetworniki wizyjne) znaleźć można w: T.W. Wojtatowicz, dz. cyt., s. 39–42.

⁸⁵ M. Ludwicki, *Urządzenia wykonawcze*, „Chemia Przemysłowa” 2008, nr 3 (382), s. 70.

⁸⁶ Siłowniki możemy podzielić na: elektryczne (elektromagnetyczne i silnikowe), pneumatyczne (tłokowe i membranowe) oraz hydrauliczne (wyłącznie tłokowe). Por. tamże, s. 70–71.

⁸⁷ Nastawniki dzieli się najczęściej według rodzaju nastawnika (zaworu). Nastawniki strumienia cieczy lub gazów (zawory regulujące) służą do zmiany strumienia cieczy, pary lub gazu w przewodach rurowych, są napędzane przez siłowniki pneumatyczne lub elektryczne. Wśród nich wyróżnia się: podstawowe urządzenia dławiące (przepustnice i zasuwki), zawory grzybkowe, zawory kulkowe oraz zawory membranowe. Dodatkowo w grupie nastawników można wymienić: nastawniki mocy prądu elektrycznego, przekaźniki elektromagnetyczne, łączniki półprzewodnikowe, sterowniki półprzewodnikowe, przetwornice częstotliwości oraz urządzenia dozujące. Por. tamże, s. 72–75.



Analiza metodologiczna eksperymentów wspomaganých komputerowo

W przypadku eksperymentu wykorzystującego współczesne techniki informatyczne mamy do czynienia z trzema wzajemnie na siebie oddziałującymi elementami: eksperymentatorem (podmiotem P) projektującym eksperyment i interpretującym jego wyniki, badanym obiektem (O), tj. przedmiotem badań eksperymentalnych (np. zjawiskiem, procesem itp.), oraz z tym, co pośredniczy między P i O, a więc z systemem automatyzacji badań doświadczalnych (abd)¹. Częścią systemu automatyzacji badań doświadczalnych może być tzw. komputerowe wspomaganie badań doświadczalnych (kwbd). Jest to „ogół metod i środków służących usprawnieniu, zgodnie z założeniami eksperymentu (...), procesów pobierania informacji o badanym obiekcie i jej przetwarzania za pomocą środków techniki komputerowej (...). Środki sprzętowe i programowe zastosowane do tego celu w określonym eksperymencie lub w serii podobnych eksperymentów tworzą system kwbd. System ten (...) jest integralną (a niekiedy główną) częścią składową systemu abd. Ten ostatni, rozumiany szeroko, może ponadto obejmować, z jednej strony – środki pobierania danych doświadczalnych (a więc: czujniki, urządzenia pomiarowe, manipulatory laboratoryjne itp.), z drugiej strony – środki udostępniania danych (służące do ich wizualizacji, archiwizowania, rozpowszechniania itp.)”².

W niniejszym rozdziale omówię specyfikę współczesnego sposobu eksperymentowania, która wynika z coraz powszechniejszego stosowania cyfrowych narzędzi informatycznych. Dzięki zastosowaniu (najczęściej analogowych) systemów abd i (cyfrowych) systemów kwbd niewątpliwie zwiększa się „odległość” pomiędzy podmiotem eksperymentu (P) a jego przedmiotem (O).

¹ Termin „automatyzacja badań doświadczalnych” zaczerpnąłem z: J.L. Kulikowski, dz. cyt., s. 7-8.

² Tamże, s. 8-9.

Warto przeanalizować, czy taka zwiększona „odległość” może mieć wpływ na wyniki eksperymentów przeprowadzanych z użyciem komputerów i innych nowych, cyfrowych części układów eksperymentalnych. Ponadto analiza wyników uzyskanych w eksperymentach z kwbd w świetle założonej (i zaprogramowanej w systemie komputerowym) teorii, w myśl której interpretujemy te dane empiryczne, jest ułatwiona i niemalże natychmiastowa. Uzyskiwanie korelacji wyników eksperymentalnych z teorią przy braku kwbd jest często bardzo czasochłonne. Systemy komputerowe niewątpliwie przyspieszają proces porównania przewidywań teoretycznych z danymi empirycznymi, a dzięki zastosowaniu metod numerycznych, w niektórych przypadkach, wręcz w ogóle umożliwiają takie porównanie. Okazuje się także, że wobec niemożliwości uzyskania analitycznych rozwiązań niektórych problemów badawczych, podmiot eksperymentujący, aby uzasadnić wyniki swoich badań, zmuszony jest do zmiany sposobu uzasadniania. Jest ono niekiedy możliwe tylko dzięki zastosowaniu metod numerycznych. Zatem zastosowanie komputerów umożliwia także numeryczne uzasadnianie pewnych hipotez, co wcześniej ani analitycznie, ani numerycznie nie było możliwe (np. z powodu małej mocy obliczeniowej komputerów w latach siedemdziesiątych XX wieku i wcześniej używanych maszyn liczących).

Warto się zatem zastanowić, czy zastosowanie komputerowego wspomaganie badań doświadczalnych wprowadza do pracy eksperymentalnej tylko niepodlegające dyskusji zmiany ilościowe, czy także mamy tu do czynienia ze zmianami jakościowymi. Czy zmienia się „odległość” pomiędzy podmiotem a przedmiotem eksperymentu dzięki zastosowaniu przetworników analogowo-cyfrowych i interfejsów (paragraf 3.1.1)? Czy interpretacja wyników eksperymentów z komputerowym wspomaganie badań doświadczalnych różni się od interpretacji wyników klasycznych badań empirycznych (paragraf 3.1.2)? Czy zastosowanie metod numerycznych wprowadza inny rodzaj uzasadniania hipotez naukowych – uzasadnianie numeryczne (paragraf 3.2.1)? Czy zatem status eksperymentatora w naukach empirycznych zmienia się w sposób jakościowy w przypadku, gdy badania naukowe wspomagane są przez komputery (paragraf 3.2.2)?

3.1. Rola elementów cyfrowych w układzie eksperymentalnym

Komputery i inne cyfrowe urządzenia (przetworniki analogowo-cyfrowe, interfejsy) są powszechnie wykorzystywane w laboratoriach do akwizycji i przetwarzania danych oraz do analizy i kontroli parametrów eksperymentu. Są one niezbędne w tych eksperymentach, w których dane napływają z dużą

szybkością, z wielu źródeł (urządzeń pomiarowych), a także wtedy gdy zachodzi konieczność bieżącej kontroli wielu parametrów (przez przetworniki cyfrowo-analogowe i urządzenia wykonawcze) i gdy w dodatku doświadczenie jest przeprowadzane przez długi czas.

Wyróżnia się dwa podstawowe sposoby współpracy komputerów z przyrządami pomiarowymi: pośredni (off-line) i bezpośredni (on-line). W przypadku pracy off-line dane eksperymentalne są zapisywane w pamięciach masowych (np. na dyskach twardych). Później, po zakończeniu eksperymentu, wprowadza się je do komputera, gdzie podlegają analizie i przetwarzaniu. W przypadku współpracy bezpośredniej on-line przyrządy pomiarowe i urządzenia wykonawcze układu eksperymentalnego, sprzęgnięte z komputerem przez interfejsy, przekazują do niego dane bezpośrednio w postaci cyfrowej. Dzięki interfejsom, przetwornikom cyfrowo-analogowym i urządzeniom wykonawczym komputer ma możliwość bieżącej kontroli i regulacji parametrów eksperymentu, dostosowując je do zaprogramowanych wartości w kontekście napływających danych eksperymentalnych i bezpośrednich ingerencji eksperymentatora.

Sposób pracy on-line jest z pewnością korzystniejszy, gdyż umożliwia automatyzację i znaczne przyspieszenie procesu pomiarowego. Wymaga jednak wyposażenia laboratorium w cyfrowe elementy układu eksperymentalnego (przetworniki a/c, interfejsy, komputer, przetworniki c/a) oraz odpowiednie oprogramowanie. Jednakże, gdy dane eksperymentalne pojawiają się zbyt szybko i komputer nie nadąża z ich przetwarzaniem w czasie rzeczywistym, stosuje się również sposób off-line, z wykorzystaniem układów gromadzenia cyfrowych danych działających z dużą prędkością (np. LHC w CERN).

3.1.1. Metodologiczne i epistemologiczne aspekty włączenia przetworników analogowo-cyfrowych do układu eksperymentalnego

W wyniku zjawisk przyrodniczych w urządzeniach pomiarowych powstają sygnały elektryczne odpowiadające wielkościom fizycznym, takim jak: temperatura, ciśnienie, napięcie, natężenie promieniowania, natężenie pola magnetycznego, potencjał elektrochemiczny itp. Te analogowe sygnały nie mogą być przekazane bezpośrednio do komputera i wymagają przetworzenia w przetwornikach analogowo-cyfrowych. Taki cyfrowy sygnał przekazywany jest do komputera poprzez interfejs. Również za pośrednictwem interfejsów (oraz przetworników cyfrowo-analogowych) komputer steruje urządzeniami wykonawczymi (np. grzejnikami, zaworami dozującymi, silnikami, regulato-

rami natężenia promieniowania itd.), które zapewniają kontrolę parametrów eksperymentu.

Większość urządzeń pomiarowych reaguje na oddziaływania fizyczne, takie jak: ciśnienie, temperatura, napięcie elektryczne, szybkość przepływu cieczy itp., które w określonym zakresie zmieniają się w sposób ciągły. Są to sygnały analogowe, które muszą zostać zmienione na sygnały cyfrowe, aby mogły zostać poddane komputerowej obróbce. Zmianę tę umożliwiają przetworniki analogowo-cyfrowe, umieszczone na styku analogowej i cyfrowej części układu eksperymentalnego (między urządzeniem pomiarowym a interfejsem i komputerem). Podobnie, jeśli sygnały cyfrowe z komputera mają być użyte do sterowania przebiegiem eksperymentu poprzez analogowe urządzenia wykonawcze, muszą być przetworzone w postać analogową za pomocą przetwornika cyfrowo-analogowego.

Włączenie nowych, cyfrowych elementów do układu eksperymentalnego zmienia niewątpliwie drogę danych eksperymentalnych od badanego obiektu (O) do eksperymentatora (P). W eksperymentach przeprowadzanych bez komputerowego wspomaganie nie było konieczne użycie przetworników analogowo-cyfrowych oraz interfejsów. Konieczne były jakieś urządzenia pomiarowe, które z powodzeniem stosuje się w pracy eksperymentalnej od dłuższego czasu, kiedy komputery cyfrowe jeszcze nie istniały. Zajmę się zatem bliższą analizą tylko cyfrowych części współczesnych układów eksperymentalnych. Udzielę odpowiedzi na pytanie: czy zastosowanie tych elementów zmienia coś w pracy eksperymentalnej i czy są to zmiany tylko ilościowe, czy także jakościowe?

Do bardzo ważnych parametrów przetworników analogowo-cyfrowych należą: rozdzielczość (najmniejsza wielkość sygnału wejściowego rozróżnialna przez przetwornik), częstotliwość (maksymalna liczba przetworzeń sygnału wejściowego w jednostce czasu) oraz czas przetwarzania (czas upływający od podania na wejściu sygnału do pojawienia się na wyjściu zakodowanej wartości). Parametry te określają dokładność i szybkość przetwarzania. Można zatem powiedzieć, że każdy przetwornik ma określoną „bezwładność” (czas przetwarzania), która powoduje opóźnienia pomiędzy chwilą wystąpienia badanego zjawiska a możliwością rejestracji i przetwarzania cyfrowego sygnału w systemie komputerowym. Jeśli zatem układ eksperymentalny składa się z wielu różnych urządzeń pomiarowych oraz wielu różnych przetworników analogowo-cyfrowych, pojawia się problem synchronizacji czasowej napływających do komputera danych. Każdy z przetworników a/c może mieć bowiem różne czasy przetwarzania i trzeba to uwzględnić przy planowaniu eksperymentu. Konsekwencją tego będzie spowolnienie pracy układu eksperymentalnego – do najdłuższego czasu przetwarzania jednego z przetwor-

ników a/c. Wszystkie pozostałe przetworniki będą musiały „czekać” na ten najwolniejszy, zanim zacznie się kolejny cykl zsynchronizowanych czasowo pomiarów ze wszystkich detektorów.

Czas przetwarzania przetworników analogowo-cyfrowych powoduje tylko spowolnienie układu eksperymentalnego, ale znacznie poważniejsze konsekwencje rodzi „ziarnistość” przetworników (częstotliwość przetwarzania). Układ eksperymentalny wspomagany komputerowo może bowiem nie „zauważyć” szybkozmiennych procesów przebiegających pomiędzy skwantowanymi chwilami odczytu danych z urządzenia pomiarowego. Dobrac odpowiednio szybki przetwornik można tylko wtedy, gdy się wie, jak szybkie będą zmiany jakiegoś parametru w badanym zjawisku, a to przecież chcemy dopiero w eksperymencie ustalić! Nie da się zatem dobrze zaprojektować układu eksperymentalnego wspomagane komputerowo bez sporej wiedzy o badanym obiekcie. Tak więc trudno mówić o wspomaganych komputerowo eksperymentach ateoretycznych.

Częstotliwość próbkowania ma także ogromne znaczenie dla wierności i dokładności danych, które przesyłane są między urządzeniem pomiarowym a komputerem. Bez wiedzy o badanym zjawisku, o tym, jakiego typu dane wejściowe dotrą do przetwornika analogowo-cyfrowego, nie sposób dobrać odpowiednio dokładnego przetwornika spełniającego twierdzenie Kotielnikowa-Shannona (częstotliwość próbkowania nie może być mniejsza niż podwójna wartość największej częstotliwości występującej w sygnale) lub twierdzenie Nyquista (sygnał ciągły może być ponownie odtworzony z sygnału dyskretnego, jeśli był próbkowany z częstotliwością co najmniej dwa razy większą od granicznej częstotliwości swojego widma). Wzmacnia to jeszcze tezę dotyczącą niemożliwości prowadzenia ateoretycznych badań wspomaganych komputerowo. Samo wykorzystanie przetworników analogowo-cyfrowych we współczesnych badaniach eksperymentalnych sprawia, że musimy posiadać jakąś wstępną wiedzę o sygnałach wejściowych takich przetworników. To z kolei zmusza nas do odwołania się do wiedzy teoretycznej dotyczącej badanego zjawiska, aby możliwe było dobranie odpowiedniego urządzenia pomiarowego oraz przetwornika analogowo-cyfrowego.

Podobne wnioski sformułować można, gdy przeanalizuje się parametr rozdzielczości przetwornika analogowo-cyfrowego. Sygnał wejściowy może zmieniać się bowiem w tak małym zakresie, że przetwornik nie będzie mógł tych zmian rozróżnić. Jeśli nie będziemy wiedzieli, jakie potencjalnie zmiany mogą zachodzić, nie będziemy mogli dobrać przetwornika z odpowiednią rozdzielczością.

Ponadto wiadomo, że przetworniki analogowo-cyfrowe generują sporo błędów podczas przetwarzania sygnału. Charakterystyka przetwornika może nie być liniowa, może pojawić się błąd wzmocnienia i błąd przesunięcia zera.

Dwa ostatnie błędy mogą być co prawda wyeliminowane przez odpowiednią regulację, ale nie istnieje metoda zmniejszania błędów liniowości. Inne błędy (błędy nieliniowości, nieliniowość całkowita, całkowity błąd przetwarzania, nieliniowość różniczkowa, współczynnik nieliniowości różniczkowej, współczynniki termiczne zera i skali, współczynnik termiczny nieliniowości różniczkowej) niejednokrotnie nakładają się na siebie i ich odseparowanie często nie jest możliwe, bowiem kompensacja jednego błędu może powodować zwiększenie innego. Oznacza to więc, że zawsze będziemy mieli do czynienia z jakimś błędem przetwarzania, którego nie będziemy w stanie wyeliminować i o którym często niewiele będziemy wiedzieć. Konsekwencją tego jest pojawienie się różnego typu artefaktów w przetwornikach analogowo-cyfrowych. Co więcej, nie istnieją żadne proste metody demaskowania artefaktów pojawiających się w przetwornikach a/c, będących bardzo ważnym elementem na styku analogowej i cyfrowej części współczesnych układów eksperymentalnych³.

Oprócz artefaktów, kolejną konsekwencją włączenia przetworników analogowo-cyfrowych do układu eksperymentalnego jest pojawienie się jakościowej zasady, która może być uznana za analogię do zasady nieoznaczoności Heisenberga dla mechaniki kwantowej. Ograniczenie naszych możliwości poznawczych spowodowane jest tym, że przetwornik a/c jest albo szybki z małą rozdzielczością i generuje sporo błędów (przetwornik typu „flash”), albo bardzo dokładny, ale za to wolny. Tak więc w układach eksperymentalnych wspomaganym komputerowo, dzięki zastosowaniu przetworników analogowo-cyfrowych, uzyskujemy w krótkiej chwili dużo niedokładnych danych albo zadowolamy się małą ilością bardzo precyzyjnych danych. Wygląda to zatem tak, jakby dokładność i szybkość pomiarów były ujemnie skorelowane.

Tak więc wprowadzenie komputerowego wspomaganie badań doświadczalnych powoduje „oddalenie” eksperymentatora od badanego obiektu oraz pojawienie się zupełnie nowych artefaktów, które nie mogły się pojawić w eksperymentach przeprowadzanych bez użycia komputerów. Wprowadzenie przetworników analogowo-cyfrowych będących częścią układu eksperymentalnego powoduje pojawienie się jakościowo nowych błędów oraz wprowadza jakościowo nowe ograniczenie poznawcze (szybkość lub dokładność pomiarów). Ponadto, używając przetworników a/c, należy zdawać sobie sprawę, że aby dobrać odpowiedni przetwornik do zestawianego przez siebie układu eksperymentalnego, musimy nie tylko znać zasadę działania urządzenia pomiarowego, ale także posiadać sporo teoretycznej wiedzy dotyczącej badanego obiektu.

³ Zagadnienie artefaktów pojawiających się w przetwornikach analogowo-cyfrowych szczegółowo przeanalizuje w podrozdziale 4.1.

3.1.2. Komputer w układzie eksperymentalnym – konsekwencje dla metodologii nauk empirycznych

Komputer, będący częścią układu eksperymentalnego, może w nim pełnić przynajmniej trzy role. Pierwszą z nich jest pobieranie danych empirycznych z urządzeń pomiarowych przez przetworniki a/c i interfejsy oraz sterowanie przebiegiem eksperymentu przez przetworniki c/a i urządzenia wykonawcze. Drugą jest gromadzenie danych empirycznych (tworzenie cyfrowych baz danych empirycznych). Trzecią stanowi porównywanie danych empirycznych z danymi teoretycznymi. Widać zatem, że systemy komputerowego wspomagania badań doświadczalnych wymagają, aby komputer połączony był bezpośrednio z przyrządem pomiarowym (składającym się z urządzenia pomiarowego, przetworników analogowo-cyfrowych i interfejsu) i służył głównie do gromadzenia i analizy danych empirycznych napływających z układu eksperymentalnego.

Chcąc porównać dane empiryczne z teorią, komputer musi wykonać wiele obliczeń. Interpretację wyników eksperymentów przeprowadzonych z komputerowym wspomaganie badań doświadczalnych prześledzić można na przykładzie urządzenia pomiarowego FT-IR (*Fourier Transform Infrared Spectrometer*)⁴. Wynika z niej fakt, że zastosowanie metod numerycznych w analizowanym przypadku umożliwia szybkie przedstawienie wyników w postaci widma IR, a także porównanie uzyskanych wyników empirycznych z założoną teorią. Zastosowanie komputera do interpretacji wyników wprowadziło zmiany ilościowe – dokładniejsze i szybsze porównanie danych empirycznych z krzywymi teoretycznymi. Stosowanie zaś metody porównywania pól powierzchni pików bez komputerowego wspomagania badań doświadczalnych było praktycznie niemożliwe, gdyż trudno wyobrazić sobie efektywne, nienumeryczne metody liczenia pól powierzchni złożonych krzywych empirycznych. Dlatego w tym przypadku mamy do czynienia ze zmianą jakościową w prowadzeniu badań doświadczalnych. Komputerowe wspomaganie badań doświadczalnych umożliwiło bowiem zastosowanie nowej metody interpretacji wyników eksperymentów (porównanie pól powierzchni pików).

Komputery umożliwiły także rozwój nowoczesnych metod numerycznych. Przedstawiciele tej dyscypliny zajmują się opracowywaniem i badaniem metod przybliżonego rozwiązywania problemów obliczeniowych w modelach matematycznych fizyki, techniki, ekonomii czy medycyny. Jednym z kla-

⁴ Szczegółową analizę tego zagadnienia znaleźć można w artykule: S. Leciejewski, *Status eksperymentatora w naukach empirycznych a współczesne techniki informatyczne*, [w:] D. Sobczyńska, P. Zeidler (red.), *Homo experimentator*, Wydawnictwo Naukowe IF UAM, Poznań 2003, s. 168–176.

sycznych zastosowań metod numerycznych jest całkowanie newtonowskich równań ruchu w ramach szczególnej teorii zaburzeń⁵. Prace matematyków prowadzone do początku XX wieku wykazały trudności dotyczące analitycznego uzasadnienia stabilności Układu Słonecznego. W drugiej połowie XX wieku zaczęto stosować nowe metody uzasadniania stabilności. Były to obliczenia numeryczne z wykorzystaniem komputerów. Do niedawna podobne zadanie przerastało znacznie możliwości obliczeniowe komputerów. Oszacowano, że w latach siedemdziesiątych XX wieku prześledzenie torów planet Układu Słonecznego w ciągu wieku z zadowalającą dokładnością obliczeniową wymagałoby rocznej pracy superkomputera (wykonującego 10^{15} operacji arytmetycznych). Ponieważ jednak szybkość komputerów podwajała się średnio co dwa lata i zaczęto projektować komputery wieloprocesorowe, w latach dziewięćdziesiątych XX wieku osiągnięto interesujące wyniki dotyczące zarówno przyszłości, jak i przeszłości Układu Słonecznego. Na początku zbadano ruch planet zewnętrznych. Wykazano, że przez około 10^9 lat od chwili obecnej orbity czterech wielkich planet zewnętrznych nie będą podlegać znaczącym, nieregularnym zmianom, lecz są przewidywalne, niemalże zgodne z obliczeniami Newtona, Laplace'a i Lagrange'a. Jednakże podczas analiz numerycznych orbit Plutona, Ziemi i Marsa stwierdzono, że są one chaotyczne, tzn. cechują się wielką wrażliwością na warunki początkowe. Z tego względu na przykład dokładny rozmiar i położenie orbity Plutona po upływie 500 mln lat są zupełnie nieprzewidywalne, podobnie jak niemożliwe jest podanie położenia i mimośrodów orbity Ziemi za 50–100 mln lat. Także nachylenie osi obrotu większości planet od ekliptyki nie jest przewidywalne w skali miliardów lat.

Niedoskonałości metod analitycznych służących do uzasadniania stabilności Układu Słonecznego skłoniły naukowców do szukania zupełnie nowych metod uzasadniania. Dzięki znacznemu wzrostowi szybkości obliczeniowej komputerów stało się możliwe powstanie nowego typu uzasadniania – uzasadnianie numeryczne. Dzięki dużej mocy obliczeniowej możliwe jest stosowanie złożonych i czasochłonnych metod numerycznych, które nie mogły być stosowane wcześniej, gdyż obliczenia trwałyby dziesiątki, a nawet setki lat, byłyby więc praktycznie niekonkluzywne. Tak więc w przypadku procedur uzasadniania numerycznego mamy do czynienia z komputerem jako urządzeniem pośredniczącym pomiędzy eksperymentatorem a badanym zjawiskiem. Zastosowanie metod numerycznych przy analizie danych empirycznych często w ogóle umożliwia uzasadnienie jakiejś prawidłowości czy hipotezy (np. stabilności Układu Słonecznego), jednakże może także wprowadzać nowe jakoś-

⁵ Szczegółową analizę metod numerycznych w naukach empirycznych znaleźć można w: tamże, s. 176–183.

ciowo błędy (artefakty powstające w przetwornikach analogowo-cyfrowych, błędy zaokrążeń w obliczeniach numerycznych itd.).

Komputer będący częścią układu eksperymentalnego nie może działać bez stosownego oprogramowania, za pomocą którego pobiera dane z przyrządów pomiarowych, gromadzi je i steruje przebiegiem eksperymentu, po czym otrzymane dane empiryczne poddaje wstępnej obróbce. Komputery stają się coraz szybsze, a oprogramowanie coraz bardziej złożone. Warto zobaczyć, jak ogromny postęp dokonał się w dziedzinie obliczeń komputerowych. Obliczenie liczby π z dokładnością do miliona znaków zajmuje na współczesnym komputerze domowym mniej niż minutę. Obliczenie liczby π w roku 1949 na pierwszym komputerze ENIAC (waga 30 ton, 17 468 lamp elektronowych, moc 174 kW) z dokładnością do 2037 cyfr trwało około 70 godzin. W roku 1962 obliczenie pierwszych 100 000 cyfr w rozwinięciu π na potężnym (wówczas) komputerze IBM 7090 trwało prawie 9 godzin. Obecnie przy użyciu komputerów dużej mocy bez większego trudu można wygenerować nawet miliard cyfr w rozwinięciu liczby π ⁶.

Niezwykle czuła zależność od warunków początkowych charakteryzuje zjawisko chaosu deterministycznego. Model matematyczny jakiegoś procesu, w którym najmniejsze zaburzenie w danych początkowych prowadzi do zupełnie różnych wyników, czyni komputer praktycznie nieprzydatnym. Jest on maszyną skończoną, nie wykonuje więc obliczeń z nieskończoną dokładnością. Zatem każda liczba, którą operuje, zostaje zaokrąglona. Błąd przy zaokrągleniu jest najczęściej rzędu 10^{-16} , co w większości sytuacji jest do przyjęcia. Jednakże podczas komputerowego modelowania zjawisk chaosu deterministycznego każdy błąd, nawet najmniejszy, zmienia diametralnie wyniki. W przypadku najmniejszych błędów trzeba wykonać więcej iteracji, zanim różnica stanie się widoczna, lecz zawsze pojawi się ona wcześniej czy później⁷.

Zależność uzyskanych wyników modelowania chaosu deterministycznego jest w istocie tak wielka, że wyniki zależą od tego, na jakim komputerze wykonuje się obliczenia, a także od wyboru oprogramowania i sposobu zaprogramowania iteracji. „Żeby to zilustrować próbowaliśmy obliczyć x_{100} używając tego samego komputera (z procesorem Pentium 4) i stosując to samo oprogramowanie (Mathematica), lecz przedstawiając wzór iteracyjny na dwa następujące sposoby: $x_{t+1} = 3,9 x_t (1-x_t)$ oraz $x_{t+1} = 3,9 x_t - 3,9 x_t^2$. Z matematycznego punktu widzenia oba wzory są dokładnie takie same, więc i wyniki obu obliczeń powinny być takie same. A jednak dwa wytworzone ciągi wykazują różnicę rzędu 10^{-17} już po pierwszych dwóch iteracjach (dla $x_0 = 0,5$). Różnica rośnie wykładniczo i po siedemdziesięciu pięciu krokach te

⁶ Por. I. Białynicki-Birula, I. Białynicka-Birula, *Modelowanie rzeczywistości. Jak w komputerze przegląda się świat*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2007, s. 23.

⁷ Por. tamże, s. 78.

dwa ciągi nie wykazują żadnego podobieństwa (...)”⁸. Wynika stąd zatem, że nie można wierzyć żadnym obliczeniom numerycznym wartości x_{100} dla tego typu iteracji. Skomasowany błąd jest tak duży, że otrzymane wyniki w ogóle nie są podobne do poprawnej wartości. Możemy zaprogramować komputer, aby obliczał ściśle wartości każdej liczby. Jednakże po stu krokach iteracji potrzebowalibyśmy około 2^{100} bajtów pamięci, a to znacznie więcej niż pamięć dostępna we wszystkich komputerach na Ziemi⁹.

Niektóre problemy, które możemy zapisać w postaci algorytmu, np. tzw. problem komiwojażera (w jaki sposób obrać najkrótszą drogę, po której tylko raz odwiedzi się zadane miejscowości), są praktycznie nierozwiązywalne. Każdy ze znanych algorytmów do rozwiązywania tego problemu cechuje wykładniczy wzrost czasu wraz ze wzrostem liczby miejscowości. Takie algorytmy są w praktyce bezużyteczne, gdyż już przy liczbie miejscowości między 20 a 30 na rozwiązanie problemu potrzebowalibyśmy czasu porównywalnego z wiekiem Wszechświata. „Problem komiwojażera należy do całej rodziny problemów zwanych przez informatyków NP-zupełnymi. Problem NP-zupełny to taki, dla którego wykładniczy algorytm można łatwo znaleźć, ale nie ma algorytmu rozwiązującego ten problem w krótszym czasie”¹⁰. Okazuje się, że można znaleźć szybki (niewykładniczy) algorytm, który nie zawsze znajduje najkrótszą drogę, lecz droga, którą wskaże, nigdy nie jest więcej niż dwa razy dłuższa od najkrótszej. Takie przybliżone rozwiązanie jest jedynym konkluzywnym rozwiązaniem, gdyż – jak wiemy – dokładny algorytm wymaga miliardów lat czasu, aby uzyskać zadowalające rozwiązanie¹¹.

W 1936 roku Alan Turing odkrył, że niektórych problemów komputer nie może rozwiązać w ogóle. Jego praca wykazała, gdzie dokładnie leżą granice możliwości komputera i jakich problemów żaden komputer nigdy nie będzie w stanie rozwiązać¹². „Turing bowiem udowodnił w 1936 roku, że problem określenia, czy maszyna Turinga wykonująca dany program w końcu się

⁸ Tamże, s. 78–79.

⁹ Por. tamże, s. 79.

¹⁰ Tamże, s. 110.

¹¹ Dziedziny nauki, w których można natknąć się na problemy NP-zupełne, to: kombinatoryka, badania operacyjne, ekonomia, teoria grafów, teoria gier i logika matematyczna. Można je również odnaleźć przy rozwiązywaniu problemów inżynierskich: w telekomunikacji, przy projektowaniu obwodów elektronicznych, planowaniu linii montażowych w fabrykach oraz programowaniu robotów przemysłowych. Dla przykładu, przy produkcji układów scalonych trzeba wywiercić kilkaset dziur w ustalonych miejscach i robi się to zazwyczaj za pomocą skomputeryzowanej wiertarki. Chcielibyśmy ułożyć optymalną drogę, która przebywa wiertło podczas pracy, a jest to klasyczny problem komiwojażera. Więcej o fundamentalnych ograniczeniach cyfrowych maszyn liczących (o problemach niewykonalnych, nieobliczalnych i wysoce nieobliczalnych) znaleźć można w: D. Harel, *Komputery – spółka z o.o. Czego komputery naprawdę nie umieją robić*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002, s. 39–107.

¹² Por. I. Białynicka-Birula, I. Białynicka-Birula, *Modelowanie rzeczywistości...*, s. 169.

zatrzyma, jest nierozstrzygalny”¹³. Gdybyśmy byli w stanie przechowywać liczby z nieskończoną dokładnością i manipulować nimi w skończonym czasie, moglibyśmy rozwiązać każdy problem¹⁴. Dotychczas jednak nieskończona dokładność należy do dziedziny czystej teorii, a w badaniach eksperymentalnych zawsze mamy do czynienia ze skończoną dokładnością pomiarów.

Podsumowując dotychczasowe rozważania, można zauważyć, że zastosowanie komputerów w badaniach eksperymentalnych wprowadza nowe jakościowo metody interpretacji wyników eksperymentów (ze względu na zastosowanie metod numerycznych, np. całkowanie numeryczne, szybka transformata Fouriera itd.) oraz nowe jakościowo sposoby uzasadniania numerycznego. Jednakże uzyskany wynik w dużym stopniu zależy od sposobu zaprogramowania iteracji. Komputer, jako maszyna skończona, wykonuje wszystkie obliczenia numeryczne z błędem zaokrąglenia i dlatego model formalny badanego zjawiska znacząco wpływa na uzyskany wynik obliczeń.

Oprogramowanie komputerowe „jest bardzo zawodne, proporcjonalnie bardziej awaryjne niż inne systemy techniczne wytwarzane przez człowieka”¹⁵. Problemy występujące w oprogramowaniu¹⁶ można podzielić na kilka kategorii, przy czym najczęściej analizuje się oddzielnie techniczną jakość oprogramowania oraz satysfakcję użytkownika. O ile na satysfakcję użytkownika ma wpływ wiele różnorodnych czynników i jej ocena jest niemalże zawsze subiektywna, o tyle problemy dotyczące technicznej jakości oprogramowania są mierzalne. Miary te określają liczbę błędów w oprogramowaniu (ang. *bugs*), czas poprawnego działania programu lub średni czas pomiędzy wystąpieniem błędnego działania oprogramowania (MTTF – ang. *mean time to failure*). MTTF może się wydawać podobna do miar inżynierskich określających prawdopodobieństwo uszkodzenia urządzenia spowodowane zużyciem się materiałów, z których dane urządzenie zostało zbudowane. W przypadku oprogramowania efekt zużycia nie występuje, więc taka miara błędnego oprogramowania powinna nie mieć sensu. Jednakże błędy w oprogramowaniu pojawiają się bardzo często, zaś parametr MTTF w oprogramowaniu, w kontekście innych dziedzin inżynierskich, ma bardzo niskie wartości

¹³ Tamże, s. 173.

¹⁴ Por. tamże, s. 174.

¹⁵ P. Gawrysiak, dz. cyt., s. 251.

¹⁶ Błędy w oprogramowaniu mogą prowadzić do katastrofalnych skutków. Na przykład „w czerwcu 1996 roku, na niecałą minutę po pierwszym starcie, francuska rakieta Ariane 5 uległa samozniszczeniu, co spowodowało pośrednie i bezpośrednie straty wielkości wielu bilionów dolarów oraz wielomiesięczne opóźnienie programu kosmicznego Ariane. (...) Stwierdzono, że stało się to w wyniku błędów w specyfikacji i projekcie oprogramowania systemu informacji inercyjnych. Błąd, jak się okazało, znajdował się w wierszu kodu wykonującym próbę załadowania 64-bitowej liczby do komórki 16-bitowej, co spowodowało przepełnienie”, D. Harel, *Komputery...*, s. 35.

(miesiące, a nawet dni ciągłej pracy). Większość komercyjnego oprogramowania nie pozwala na ciągłą pracę przez dłuższy czas (ponad kilkanaście dni), czego niestety doświadcza wielu użytkowników popularnych systemów operacyjnych i pakietów biurowych. Ogromne skomplikowanie oprogramowania oznacza, że problemu tego praktycznie nie da się uniknąć, a większość sprzedawanych programów obarczona jest poważnymi defektami. Jednakże w przypadku oprogramowania klasyczny model kupna–sprzedaży nie ma zastosowania. Oprogramowanie nie jest bowiem sprzedawane, ale podlega jedynie licencjonowaniu, które przypomina wypożyczenie książki z biblioteki. Nabywca licencji otrzymuje wyłącznie prawo do uruchamiania programu, co obwarowane jest licznymi ograniczeniami dochodzenia odszkodowań w przypadku wystąpienia błędów. Większość licencji oprogramowania komercyjnego zawiera fragmenty wyłączające odpowiedzialność sprzedawcy i twórcy nawet w przypadku niespełniania przez program funkcji, dla których został stworzony. Ponadto, jeśli kod źródłowy programu jest niedostępny – a tak dzieje się najczęściej w przypadku oprogramowania komercyjnego – osoba korzystająca z programu nie ma wglądu w to, w jaki sposób program działa. Taki brak transparentności powoduje, że użytkownik zwykle nie wie, co jest przyczyną błędów pojawiających się w oprogramowaniu. Zasygnalizowane problemy nie doczekały się jeszcze zadowalającego rozwiązania. Podejściem, z którym można wiązać pewne nadzieje, jest upowszechnienie się tzw. wolnego oprogramowania, wprowadzającego transparentność działania aplikacji poprzez udostępnianie kodu źródłowego. Niestety, większość oprogramowania obsługującego komputery w układach eksperymentalnych nie jest oprogramowaniem tego typu¹⁷.

Najczęściej bowiem komercyjne programy komputerowe są nieodzowną częścią komputerowego systemu pomiarowego. Najwięksi producenci aparatury pomiarowej oferują także, oprócz aparatury, firmowe programy (np. *National Instruments* oferuje *LabView*). Te programy mają trzy podstawowe wady: są bardzo kosztowne (wersje podstawowe kosztują kilka tysięcy dolarów) oraz bardzo rozbudowane (co zmusza programistów do czasochłonnej nauki języka, w celu stworzenia choćby prostego, ale kompletnego programu). Ponadto nie jest to oprogramowanie wolne (FOSS – *Free and Open Source Software*¹⁸), co oznacza, że: nie mamy możliwości analizy sposobu działania programu i jego modyfikacji według własnych potrzeb (*freedom 1* według Richarda Stallmana¹⁹), nie mamy prawa do kopiowania i redystrybucji pro-

¹⁷ Por. P. Gawrysiak, dz. cyt., s. 252–256.

¹⁸ Omówieniu fenomenu Open Source poświęcony jest obszerny fragment monografii: P. Gawrysiak, dz. cyt., s. 285–329.

¹⁹ Richard Stallman, jeden z twórców ruchu wolnego oprogramowania, definiując to pojęcie, przedstawia cztery warunki konieczne niezbędne do tego, by program można było nazwać

gramu, tak aby inni mogli go wykorzystać (*freedom 2*), nie mamy możliwości poprawiania programu i upubliczniania poprawek tak, aby korzyść mogła odnieść cała społeczność użytkowników programu (*freedom 3*).

Jakie są tego metodologiczne konsekwencje w kontekście eksperymentów wspomaganych komputerowo? Po pierwsze (a jest to konsekwencja *freedom 1*), nie jesteśmy w stanie precyzyjnie określić, czy oprogramowanie działa poprawnie. Możemy co prawda kalibrować urządzenie pomiarowe w połączeniu z określonym oprogramowaniem, ale to w gruncie rzeczy przeprowadza się dla kilku znanych „punktów” pomiarowych. Wtedy z kilku standardowych pomiarów musimy wnioskować o poprawnym działaniu programu w całym zakresie jego stosowalności, to zaś obarczone jest klasycznym błędem wnioskowań indukcyjnych.

Dругa metodologiczna konsekwencja (wynikająca z *freedom 2*) jest następująca: inne laboratoria mogą sprawdzić uzyskane przez nas wyniki tylko wtedy, gdy zakupią to samo oprogramowanie i zaopatrzą się w te same interfejsy oraz sterowniki. Zatem intersubiektywna sprawdzalność uzyskanych danych uzależniona jest od posiadanych środków finansowych, a tym samym w praktyce nierealizowalna (nikt nie będzie ponosił dużych kosztów, aby sprawdzić poprawność cudzych wyników!).

Trzecia konsekwencja dotycząca komputera (wraz z oprogramowaniem) w układzie eksperymentalnym wynika z *freedom 3*. Postęp (w twórczym modyfikowaniu programów służących do zbierania i opracowywania danych naukowych) w nauce uzależniony jest od firm komercyjnych sprzedających określone oprogramowanie. Mają w nim mniejszy udział naukowcy z danej dziedziny, gdyż nie mogą poprawiać programu działającego niezgodnie z ich oczekiwaniami (własne modyfikacje zamkniętego, komercyjnego oprogramowania są niezgodne z prawem).

Istnieją jeszcze dwie, bardziej ogólne, konsekwencje metodologiczne włączenia komputera do układu eksperymentalnego. Warto zauważyć, że teza o intersubiektywnej sprawdzalności w naukach empirycznych musi być znacznie osłabiona ze względu na fakt, iż niektóre skomputeryzowane laboratoria naukowe są unikatowe (np. CERN) i nikt poza nimi nie jest w stanie ponieść tak wysokich kosztów, aby sprawdzić wyniki tam uzyskiwane. Intersubiektywna sprawdzalność w badaniach eksperymentalnych wspomaganych kompute-

wolnym. Dotyczą one możliwych sposobów wykorzystywania oprogramowania przez jego posiadaczy. *Freedom 0* odnosi się do prawa do uruchamiania i wykorzystywania programu jako narzędzia w dowolnym celu. *Freedom 1* dotyczy prawa do analizy sposobu działania programu i jego modyfikacji do własnych potrzeb. *Freedom 2* to prawo do kopiowania i redystrybucji programu tak, aby inni mogli go wykorzystać. *Freedom 3* postuluje prawo do poprawiania programu i do upubliczniania poprawek w takim celu, aby korzyść z nich odnieść mogła cała społeczność użytkowników programu. Por. tamże, s. 285-301.

rowo zamieniona została na procedury autokalibracji unikatowego sprzętu badawczego (np. LHC w CERN)²⁰.

Warto także zauważyć, że gdy używamy komputera wraz z oprogramowaniem do analizy danych napływających z przyrządu pomiarowego, niemalże każda taka skomputeryzowana obserwacja będzie obserwacją pośrednią w sensie Giovanniego Boniola²¹. Koncepcja ta nie odnosi się do obserwacji przedmiotu teoretycznego dokonanej za pomocą odpowiednich przyrządów, ale do stwierdzenia właściwości przedmiotu teoretycznego, która została wywnioskowana z wyników obserwacji bezpośredniej w sensie Dudleya Shapere'a²². Na przykład bezpośrednio obserwowalną wielkością jest długość fal w widmie uzyskanym dzięki zastosowaniu metody spektroskopii w podczerwieni. Wartości takich wielkości, jak np. częstotliwość drgań odpowiednich wiązań w cząsteczce, długości określonych wiązań lub kąty między wiązaniami, to przykłady wielkości pośrednio obserwowalnych.

Włączenie komputera wraz z oprogramowaniem do układu eksperymentalnego sprawia, że każda obserwacja staje się obserwacją pośrednią (o ile informacja napływająca z przyrządów pomiarowych jest przetwarzana przez oprogramowanie, a nie tylko archiwizowana w zasadniczo niezmienionej postaci). Widać zatem, że zastosowanie komputera w badaniach eksperymentalnych zmienia sposób współczesnego eksperymentowania i ma doniosłe konsekwencje metodologiczne. Dotyczą one ograniczeń poznawczych, wynikających z zastosowania elementów cyfrowych w układzie eksperymentalnym. Jednakże nie mamy do czynienia tylko z ograniczeniami w przypadku komputerowego wspomaganie badań doświadczalnych. W następnym paragrafie zostaną przedstawione komputerowe metody poszerzania możliwości poznawczych podmiotu eksperymentującego. Zastosowanie komputera umożliwia bowiem wykonywanie wielu prac badawczych, które bez wspomaganie komputerowego nie byłyby możliwe.

²⁰ Są to czasami procedury, które nie wychwytyją podstawowych błędów funkcjonowania wspomaganie komputerowo aparatury badawczej, co mieliśmy okazję zaobserwować w CERN w 2011 i 2012 roku. Kilka miesięcy trwały pomiary prędkości neutronów dające wynik większy niż prędkość światła. Okazało się, że uzyskany wynik był zdeterminowany przez nieprecyzyjnie zamontowane okablowanie detektora (niedociągnięty element transmisji danych empirycznych). Błąd ten dostrzeżono po około pół roku, zaś konsekwencje jego niedostrzeżenia byłyby bardzo znaczące – konieczność zmodyfikowania lub odrzucenia ogólnej teorii względności.

²¹ Por. G. Boniolo, *On Scientific Representation. From Kant to a New Philosophy of Science*, Palgrave Macmillan, New York 2007, s. 79.

²² Obserwacja bezpośrednia – w sensie Shapere'a – to taka, w której receptor (zmysłowy bądź instrument) odbiera informacje od przedmiotu obserwowanego, a następuje to bezpośrednio, tzn. bez zakłóceń. Można by dyskutować, czy w kontekście zastosowania przetworników analogowo-cyfrowych i artefaktów generowanych przez nie możemy mieć w ogóle do czynienia z niezakłóconym odbiorem informacji w systemach komputerowego wspomaganie danych doświadczalnych.

3.2. Status eksperymentatora w badaniach eksperymentalnych wspomaganych komputerowo

Można zauważyć, że zastosowanie komputera w badaniach eksperymentalnych prowadzi na ogół do znacznego zwiększenia możliwości pomiarowych. Komputer pozwala na prowadzenie pomiarów w sposób nieprzerwany przez dowolnie długi czas, analizę praktycznie dowolnej liczby danych doświadczalnych napływających z dużą szybkością i jednocześnie kontrolę wielu urządzeń laboratoryjnych. Dane empiryczne wprowadzone do pamięci komputera można poddać dowolnemu przetwarzaniu, m.in. cyfrowej redukcji szumu, filtracji czy uśrednianiu. Ułatwiony jest proces znajdowania widma sygnału (szybka transformata Fouriera), dopasowania rezultatów pomiarowych do przewidywań teoretycznych, analizy statystycznej. Analizę danych doświadczalnych można przeprowadzać w trakcie pomiaru i na bieżąco wpływać na warunki doświadczenia.

Czy zatem zastosowanie współczesnych technik informatycznych w badaniach z zakresu nauk empirycznych zmienia status poznawczy eksperymentatora? Niewątpliwe i bezdyskusyjne są zmiany ilościowe w eksperymentach z komputerowym wspomaganiami badań doświadczalnych. Eksperymentator posługujący się komputerem otrzymuje bowiem szybkie i precyzyjne narzędzie służące do rejestracji pomiarów oraz przeprowadzania obliczeń.

Użycie komputerów w badaniach eksperymentalnych wprowadziło ponadto pojawienie się nowych jakości, tj. pozwoliło na stosowanie nowych metod interpretacji wyników eksperymentów, co byłoby niewykonalne bez komputera. Obserwator wykorzystujący w swej pracy komputer otrzymuje narzędzie, dzięki któremu efektywnie porównuje wyniki eksperymentów z założoną teorią, czego w wielu wypadkach nie dawało się realizować bez stosowania komputerów. Ponadto dzięki dużej mocy obliczeniowej współczesnych komputerów możliwe jest stosowanie złożonych i czasochłonnych metod numerycznych, które nie mogły być stosowane w przeszłości.

Praca badawcza z zastosowaniem komputerowego wspomagania badań doświadczalnych rodzi także jakościowo nowe problemy w pracy badawczej. Dotyczą one pojawiania się artefaktów w sprzęgach, powstających w rezultacie skwantowania danych pobieranych przez komputer z urządzenia pomiarowego, co wprowadza niepewność odnośnie do stanu układu badanego pomiędzy kolejnymi pomiarami. Pojawiają się także błędy wynikające ze stosowania metod numerycznych, np. dotyczące cyfrowego całkowania i zaokrągleń w obliczeniach komputerowych.

Można zatem powiedzieć, że dzięki zastosowaniu komputerowego wspomaganie badań doświadczalnych sytuacja eksperymentatora uległa zmianie.

Użycie współczesnych technik informatycznych w naukach empirycznych otworzyło dla obserwatora nowe jakościowo sposoby badań naukowych (nowe sposoby porównywania danych empirycznych z założoną teorią oraz uzasadnianie numeryczne). Wprowadziło także nowe klasy błędów (błędy metod numerycznych, artefakty powstające w przetwornikach a/c), które musi on uwzględniać w swojej pracy naukowej. Innymi słowy, zastosowanie komputera w badaniach empirycznych poszerza możliwości poznawcze podmiotu eksperymentującego. Analizie tego zagadnienia będzie poświęcony następny paragraf.

3.2.1. Komputerowe metody poszerzania możliwości poznawczych podmiotu eksperymentującego

Rozwój komputerów i metod obliczeniowych dał współczesnym naukowcom potężne narzędzie badawcze, jakim jest symulacja komputerowa. W ogólności symulacja komputerowa to program komputerowy opracowany w celu modelowania zachowań rzeczywistego układu. Definicję symulacji można ująć także inaczej: „Powiemy, że symulacja komputerowa jest metodą wnioskowania o zachowaniu obiektów rzeczywistych na podstawie interpretacji wyników programów komputerowych «naśladowujących» rzeczywistość”²³. Symulacje, które często określa się mianem eksperymentu komputerowego, dają zatem podmiotowi eksperymentującemu narzędzie poszerzające jego możliwości poznawcze. Te wirtualne eksperymenty umożliwiają określanie właściwości badanych obiektów oraz sprawdzanie słuszności stawianych hipotez i przyjmowanych założeń. Doświadczenia komputerowe nie są przy tym ograniczone przez obowiązujące w świecie rzeczywistym prawa, których konsekwencje muszą uwzględniać klasyczne przyrządy pomiarowe, a ich skutki nie są szkodliwe dla otoczenia.

Symulacja jest niezastąpionym narzędziem badawczym, gdy: niemożliwe jest badanie empiryczne ze względu na ograniczenia metod pomiarowych (np. badanie reakcji we wnętrzach gwiazd), nie istnieje model matematyczny umożliwiający analityczne rozwiązanie badanego problemu, realne badania są zbyt kosztowne lub niebezpieczne (np. badania skutków wybuchów jądrowych), badany układ jeszcze nie istnieje, ale przewidujemy jego istnienie w przyszłości i chcemy poznać jego zachowanie lub właściwości (np. poznanie skutków działania nowych leków, określenie właściwości maszyn i urządzeń). Obiektami symulacji mogą być układy fizyczne, chemiczne i biologiczne, urządzenia mechaniczne i elektryczne, układy elektroniczne i cyfro-

²³ S. Romanowski, D. Światła-Wójcik, *Symulacje komputerowe w fizyce i chemii. Wybrane zagadnienia*, Wydawnictwo Akademii Humanistyczno-Ekonomicznej w Łodzi, Łódź 2009, s. 7.

we, obiekty architektoniczne bądź astronomiczne, ekosystemy czy grupy społeczne. Przykładowo, w matematyce symulacja wykorzystywana jest do dowodzenia twierdzeń, sprawdzania poprawności istniejących dowodów, a także do obliczania całek. Dzięki komputerom w 1976 roku udało się udowodnić zagadnienie czterech barw, sformułowane 120 lat wcześniej (każdą mapę narysowaną na kartce papieru można pokolorować za pomocą czterech barw w taki sposób, że państwa mające wspólną granicę otrzymają różne kolory). Dowód twierdzenia jest jednak tak skomplikowany, że bez pomocy komputera nie można go sprawdzić²⁴.

Obiekty materialne i procesy będące celem naszego poznania są skomplikowanymi układami rzeczywistymi. Uwzględnienie wszystkich cech badanych układów w symulacji komputerowej jest niemożliwe. Rozwiązania wielu problemów otrzymuje się, konstruując pewien uproszczony model układu rzeczywistego. Układ modelowy musi jednak zawierać te elementy układu rzeczywistego, które są dla nas istotne. Wyodrębnienie takich znaczących elementów jest najważniejszym i zarazem najtrudniejszym etapem wstępnym symulacji. Układ modelowy (model) powstaje jako rezultat wyróżnienia i formalizacji istotnych cech układu rzeczywistego oraz ustalenia relacji pomiędzy tymi cechami w czasie i przestrzeni. Trafność tak skonstruowanych modeli oceniamy poprzez porównanie wyników symulacji komputerowej z wynikami doświadczeń i obserwacji. Tak skalibrowany (skonfirmowany) model symulacyjny jest ważnym narzędziem badawczym takich właściwości obiektów materialnych, których pomiar jest trudny lub niemożliwy. W tym sensie eksperyment komputerowy staje się uzupełnieniem technik doświadczalnych²⁵. Eksperyment komputerowy jest również narzędziem tworzenia i testowania teorii, sprawdzania hipotez i wyciągania wniosków (tym zagadnieniem zajmę się bardziej szczegółowo w następnym paragrafie).

Konstrukcja modelu symulacyjnego powstaje drogą kolejnych przybliżeń. Najpierw opracowuje się model wstępny (przybliżenie zerowe), następnie wykonuje się symulację i dokonuje oceny modelu przez porównanie wyników symulacji z wynikami eksperymentu. Jeśli zgodność nie jest zadowalająca, wprowadza się poprawki do modelu, ponownie wykonuje się symulację i dokonuje oceny. Czynności te powtarza się aż do momentu uzyskania dobrej zgodności z wynikami doświadczalnymi.

²⁴ Por. tamże, s. 11–13.

²⁵ „Symulacje komputerowe mogą wypełnić lukę między teorią a eksperymentem. Pewne wielkości albo sposoby zachowania się układów bywają niemożliwe lub trudne do ilościowego pomiaru eksperymentalnego. Takie wielkości dają się jednak obliczyć w procesie symulacji komputerowej”, D.W. Heermann, *Podstawy symulacji komputerowych w fizyce*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1997, s. 19.

Modele symulacyjne dzielą się na deterministyczne (ciągłe) i stochastyczne (dyskretne). W symulacji deterministycznej wykorzystuje się matematyczny opis obiektów w postaci układu równań różniczkowych, rozwiązywanych iteracyjnie dla kolejnych odstępów czasu²⁶. Przykładami symulacji ciągłych są symulacje prognozy pogody, wytrzymałości materiałów konstrukcyjnych czy lotu samolotu.

Symulacja stochastyczna polega na modelowaniu zachowania obiektu z uwzględnieniem czynników losowych dobranych tak, aby prawdopodobieństwa zachowania układu modelowego i rzeczywistego były zbliżone. Wykonanie symulacji stochastycznej jest sterowane przez generatory liczb losowych²⁷. Przykładem symulacji stochastycznej jest prognozowanie przepustowości ulic²⁸.

Dla układów, w których zachodzą procesy o różnych skalach czasowych, znacznie szybsze i wymagające mniejszej mocy obliczeniowej są symulacje dynamiki stochastycznej, zwane symulacjami dynamiki Brownowskiej. Taka symulacja jest hybrydą łączącą w sobie elementy symulacji deterministycznych i stochastycznych. Jeśli na przykład interesuje nas zachowanie dużej cząsteczki białka w roztworze wodnym, to dużo efektywniejszym sposobem opisu tego układu jest podejście polegające na odmiennym modelowaniu ruchu małych cząsteczek wody i powolnych zmian konformacyjnych dużej większej cząsteczki białka. Podstawową ideą metody symulacji Brownowskiej jest eliminacja stopni swobody szybkozmiennego podukładu (np. cząsteczek wody) z równań ruchu całego układu. Wpływ rozpuszczalnika uwzględniany jest poprzez wprowadzenie do równań ruchu wolnego podukładu (np. białka) pewnego członu stochastycznego, zwanego siłą stochastyczną, oraz członu opisującego mikroskopowe tarcie.

Dowolny model symulacyjny opisujemy za pomocą języka naturalnego, schematu graficznego i formuł matematycznych. Powstaje w ten sposób algorytm (zbiór reguł postępowania prowadzących do rozwiązania konkretnego problemu), tzn. przepis, według którego będzie działał program komputerowy. Programy symulacyjne są najczęściej pisane w językach programowania wysokiego poziomu (obiektywnych i strukturalnych), np. C, C++, Simula, Fortran, Pascal. Zintegrowane środowiska programistyczne, np. Microsoft Visual Studio, umożliwiają łatwe tworzenie, modyfikowanie, testowanie i konserwację oprogramowania.

²⁶ Por. S. Romanowski, D. Świątła-Wójcik, dz. cyt., s. 124–148.

²⁷ Pot. tamże, s. 23–42.

²⁸ Przykładowe zastosowania symulacji stochastycznej w fizyce i chemii znaleźć można w: tamże, s. 43–79.

Tak napisany program (kod źródłowy) jest zrozumiały dla programisty, ale nie dla procesora maszyny cyfrowej, ten bowiem wykonuje program zapisany w kodzie maszynowym. Przetworzenie kodu źródłowego na kod maszynowy odbywa się w procesie kompilacji. Kompilator jest częścią środowiska programistycznego, którego zadaniem jest przetłumaczenie języka wysokiego poziomu na ciąg instrukcji procesora. Postać kodu maszynowego zależy więc od architektury procesora, dla którego dany program jest przeznaczony.

Wyniki symulacji są najczęściej prezentowane w postaci zestawień tabelarycznych bądź graficznie w formie wykresów, diagramów, map potencjału itd. Tak więc najczęściej wyniki pracy programów służących do różnorodnych symulacji komputerowych przedstawiane są w postaci wizualizacji graficznej²⁹.

Symulacje komputerowe są złożonymi zadaniami numerycznymi, w ramach których istnieje jednoznaczny opis powiązania pomiędzy danymi wejściowymi (zmiennymi niezależnymi) a danymi wyjściowymi (wynikami). Pełen opis sposobu przekształcania danych wejściowych w wyniki nazywa się algorytmem numerycznym. Zadaniem metod obliczeniowych jest wykorzystanie właściwości określonego zadania numerycznego tak, aby opracowany algorytm był szybki i dokładny. Podstawowymi narzędziami konstrukcji algorytmów komputerowych jest iteracja i rekurencja.

Iteracja oznacza wielokrotne stosowanie określonej operacji matematycznej w celu uzyskania dokładniejszego wyniku. Jest ona podstawą metody kolejnych przybliżeń rozwiązywania zadań numerycznych³⁰. Rekurencja natomiast jest sposobem definiowania procedur w algorytmach, który polega na umieszczeniu w treści procedury odwołań do niej samej. Procedury rekurencyjne są zazwyczaj programową realizacją wzorów rekurencyjnych, pozwalających obliczyć wyrazy ciągu na podstawie jednego lub kilku wyrazów poprzedzających³¹.

Wyniki obliczeń numerycznych w symulacjach komputerowych cechuje większa lub mniejsza dokładność. Na dokładność symulacji komputerowych wpływa wiele rodzajów błędów. Niektórych błędów nie da się uniknąć, inne dają się zredukować lub wyeliminować, np. poprzez zmianę algorytmu lub modelu matematycznego. Do podstawowych źródeł błędów należą: błędy danych wejściowych³², błędy zaokrągleń i odcięcia, uproszczenia modelu

²⁹ Por. tamże, s. 21–22.

³⁰ Por. J.G. Brookshear, dz. cyt., s. 198–209.

³¹ Por. tamże, s. 209–220.

³² Błędy danych wejściowych wynikają z zaokrągleń wprowadzanych do obliczeń liczb oraz błędu pomiarowego. Błąd pomiarowy może być grubo (pomyłki eksperymentatora, niesprawne przyrządy, niewłaściwe warunki pomiaru), systematyczny (niepoprawna kalibracja przyrządu, nieidentyczne warunki pomiaru) lub przypadkowy. Błędy grube i systematyczne można zredukować lub nawet wyeliminować. Błąd przypadkowy, zwany także statystycznym lub losowym, to niemożliwa do uniknięcia niepewność pomiarowa.

matematycznego³³, nieprawidłowa konstrukcja algorytmu oraz błędy programowe³⁴. Analiza błędu jest istotna przy planowaniu obliczeń, wyborze algorytmu, podejmowaniu decyzji w trakcie obliczeń (np. wybór długości kroku w całkowaniu numerycznym), a także przy weryfikacji wyników symulacji komputerowych.

Dzięki zastosowaniu komputerów w badaniach naukowych potrafimy uzyskiwać wyniki, które mogą być analitycznie nieobliczalne. Istnieje wiele metod numerycznych, stosowanych m.in. w fizyce i chemii. Należą do nich metody interpolacji i aproksymacji, różniczkowania i całkowania, znajdowania miejsc zerowych i ekstremów funkcji jednej zmiennej, rozwiązania układów równań liniowych oraz rozwiązywania równań różniczkowych zwyczajnych.

W fizyce i chemii doświadczalnej często mamy do czynienia z sytuacjami, w których na podstawie dyskretnych punktów pomiarowych musimy określić zależność funkcyjną pomiędzy dwiema wielkościami fizycznymi. Z interpolacją mamy do czynienia, jeśli chcemy wyznaczyć wartość funkcji pomiędzy punktami określonymi doświadczalnie (jedną z podstawowych metod interpolacji jest interpolacja wielomianowa Lagrange'a). Interpolacja jest szczególnym przypadkiem aproksymacji (dopasowania). Celem metod aproksymacyjnych jest wyznaczenie funkcji, która dobrze opisuje punkty otrzymane w doświadczeniu, ale niekoniecznie przez nie przechodzi. Aproksymację stosujemy także wtedy, gdy chcemy zastąpić trudną do obliczeń funkcję postacią funkcyjną mniej złożoną. W takim wypadku mówimy o przybliżeniu. Warto dodać, że metody aproksymacyjne podają sposoby wyznaczania przybliżeń zapewniających pożądaną dokładność dopasowania.

W zagadnieniach fizycznych i chemicznych częstym problemem jest wyznaczenie pierwiastków równań nieliniowych. Do rozwiązywania takich równań

³³ Błędy zaokrągleń, odcięcia i uproszczenia modelu matematycznego wynikają w dużej mierze z podstawowych cech budowy maszyn cyfrowych. W pamięci komputera może być bowiem przechowywana tylko skończona liczba cyfr znaczących, odpowiadająca liczbowi w reprezentacji stałopozycyjnej lub w reprezentacji zmiennopozycyjnej. Reprezentacja stałopozycyjna oznacza, że operuje się na ustalonej liczbie cyfr ułamkowych, zaś reprezentacja zmiennopozycyjna oznacza, że operuje się na ustalonej liczbie cyfr istotnych. W ten sposób można wyrazić tylko skończony zbiór liczb, czego konsekwencją jest zaokrąglanie lub ucinanie liczb, co zawsze wiąże się z utratą informacji i może prowadzić do niestabilności numerycznej algorytmu. Symulowane układy są z konieczności reprezentowane przez dyskretne, skończone modele matematyczne, które dodatkowo generują błędy odcięcia i dyskretyzacji, np. odcięcie szeregu nieskończonego, zastąpienie pochodnej ilorazem różnicowym, aproksymacja funkcji nieliniowej funkcją liniową itp.

³⁴ Spośród błędów programowych najłatwiejsze do wykrycia są błędy składni sygnalizowane w czasie kompilacji i błędy wykonania powodujące zawieszanie programów komputerowych. Najtrudniejsze do wykrycia są błędy logiczne, które nie są sygnalizowane ani przez komputer w czasie kompilacji, ani w czasie wykonywania programu. Najskuteczniejszym sposobem detekcji błędów logicznych jest dokładne testowanie programu na różnych zestawach danych wejściowych.

sprowadzają się również zadania wyznaczania ekstremum funkcji (minimum lub maksimum), gdyż warunkiem koniecznym istnienia ekstremum w danym punkcie jest zerowanie się pierwszej pochodnej w tym punkcie. Przykładami problemów, w których szukamy rozwiązania równań nieliniowych, są: określenie położenia równowagi ciała, znalezienie minimum potencjału w polu czy wyznaczenie dyskretnych poziomów energetycznych w układach związanych. Do najczęściej stosowanych metod numerycznego rozwiązywania równań nieliniowych należą metody: bisekcji, Newtona i siecznych³⁵.

Różniczkowanie numeryczne daje możliwość obliczenia pochodnej funkcji określonej w formie tabelarycznej, czyli dyskretnej. Operacją odwrotną jest całkowanie numeryczne. Algorytmy takiego całkowania wykorzystują geometryczną interpretację całki oznaczonej, zgodnie z którą całka funkcji jednej zmiennej jest równa polu powierzchni pod krzywą zakreślona przez funkcję podcałkową. Algorytmy całkujące opierają się na podziale przedziału całkowania na n pasków o jednakowej szerokości h , zwanej krokiem całkowania. Jeśli przy dostatecznie małym kroku całkowania funkcję podcałkową pomiędzy sąsiednimi punktami przybliżyć do funkcji liniowej, to wtedy pole pod krzywą można przedstawić jako sumę pól trapezów o jednakowych wysokościach h i podstawach równych wartościom funkcji podcałkowej w punktach podziału. Jest to tzw. metoda trapezów całkowania numerycznego. Większą dokładność całkowania pozwala uzyskać stosowanie metody Simpsona. Można powiedzieć, że w tym wypadku całka przybliżona jest sumą pól ograniczonych parabolami. W przypadku całek wielokrotnych wygodnie jest stosować metodę Monte Carlo. W metodzie tej jednak dla zwiększenia dokładności wyniku o jeden rząd należy stukrotnie zwiększyć liczbę prób losowych.

Wiele problemów obliczeniowych w fizyce i chemii sprowadza się do rozwiązania równania różniczkowego lub układu takich równań. Przykładem tego typu symulacji są symulacje metodą dynamiki molekularnej, rozwiązywanie równań opisujących kinetykę reakcji w reaktorach chemicznych, rozwiązanie równania Schrödingera w modelowaniu molekularnym, modelowanie układów elektronicznych. Są to tylko niektóre przykłady zastosowania równań różniczkowych w nauce i technice.

Metody rozwiązywania równań różniczkowych dzielą się na dwie podstawowe grupy, w zależności od tego, jakiego typu równań dotyczą. W równaniach różniczkowych zwyczajnych niewiadomą jest funkcja jednej zmiennej. Równanie różniczkowe może zawierać samą funkcję oraz jej pochodne zarówno pierwszego, jak i wyższych rzędów. Przykładem równań różniczkowych zwyczajnych są w fizyce równania dynamiki Newtona, a w chemii równania

³⁵ Opis tych metod znaleźć można w: S. Romanowski, D. Świątła-Wójcik, dz. cyt., s. 135–139.

kinetyki chemicznej. W pierwszym przypadku interesuje nas wyznaczenie trajektorii ruchu ciała, a w drugim – określenie zależności stężenia produktów i substratów reakcji chemicznej od czasu. W zagadnieniach fizycznych i chemicznych zmienna niezależna oznacza najczęściej czas, a samo równanie różniczkowe wyraża prawo fizyczne lub chemiczne opisujące zachowanie układu.

Najprostszą, ale zarazem najmniej dokładną metodą numerycznego rozwiązywania równań różniczkowych zwyczajnych jest metoda Eulera. Metoda ta wywodzi się z przybliżenia pochodnej ilorazem różnicowym. Jest ona obarczona sporym błędem i z tego względu algorytm Eulera jest wykorzystywany najczęściej do uzyskania zerowego przybliżenia w bardziej zaawansowanych metodach iteracyjnych, np. w metodzie predyktor–korektor. Metoda ta składa się z dwóch etapów. Pierwszy to prognozowanie wartości dla kolejnego kroku czasowego na podstawie wartości obliczonych w dwóch poprzednich krokach czasowych. W drugim wartość przybliżoną wykorzystuje się do obliczenia poprawki korygującej pierwsze przybliżenie. Dokładność metody można zwiększyć jedynie poprzez zwiększenie liczby punktów początkowych. Jednakże ze względu na konieczność znajomości co najmniej dwóch punktów początkowych, metoda ta nie może być stosowana do rozwiązywania zagadnień dynamicznych, w których sprecyzowany jest tylko punkt określony warunkiem początkowym. W takim wypadku użyteczna staje się metoda Rungego–Kutty, umożliwiająca uruchomienie procedury iteracyjnej na podstawie znajomości tylko jednego punktu.

Komputery pozwalają rozwiązywać również równania różniczkowe cząstkowe, w których szukana funkcja zależy od wielu zmiennych, np. od trzech zmiennych przestrzennych i od czasu. Równania takie opisują zachowanie układów ciągłych. Do tej grupy należą między innymi równania hydrodynamiki płynów opisujące dynamikę wód gruntowych czy dynamikę ruchu mas powietrza. Metodą numeryczną rozwiązywania zagadnień określonych za pomocą równań różniczkowych z warunkami brzegowymi jest metoda elementu skończonego MES. Jest ona skuteczna, gdy modelowany obszar przestrzenny ma skomplikowany kształt lub gdy zachowanie funkcji opisujących obszar jest odmienne w różnych jego częściach. Problemy takie występują przy badaniu naprężeń i wytrzymałości elementów konstrukcyjnych albo dynamiki i statyki obiektów, symulacji przepływu ciepła oraz określaniu rozkładu temperatur. Dlatego metoda MES jest najczęściej stosowana w specjalistycznych programach do obliczeń inżynierskich. Nazwa metody pochodzi od idei rozwiązywania problemów polowych przez przybliżenie obszaru siatką figur geometrycznych o prostym kształcie, zwanych elementami skończonymi.

Warto wspomnieć, że procedury całkujące i różniczkujące, interpolacja i aproksymacja oraz wiele innych algorytmów numerycznych wchodzi w skład bibliotek numerycznych, z których korzystają zintegrowane środowiska do obliczeń numerycznych, symbolicznych i inżynierskich. Specjalistyczne pakiety są oprogramowaniem licencjonowanym i najczęściej bardzo kosztownym³⁶.

Danuta Sobczyńska w monografii poświęconej badaniom eksperymentalnym szczegółowo charakteryzuje eksperymenty myślowe³⁷ i eksperymenty matematyczne³⁸. Przekonuje także, że eksperyment matematyczny jest odmianą eksperymentu myślowego. Obiektem badań w ramach eksperymentu matematycznego jest model matematyczny, na którym badacz dokonuje operacji środkami myślowymi właściwymi matematyce. Obecnie eksperyment matematyczny stał się eksperymentem oprzyrządowanym. Tym współczesnym oprzyrządowaniem są oczywiście systemy komputerowe, za pomocą których możemy dokonywać eksperymentów matematycznych, nazywanych najczęściej symulacjami komputerowymi. Warto zauważyć, że symulacje komputerowe są powtórzeniem klasycznej drogi hipotetyczno-dedukcyjnej (hipoteza – dedukcja – eksperyment). Obiekty matematyczne bada się komputerowo w interesujących badacza warunkach i znajduje się dla nich równanie (model). Tak otrzymany model porównuje się z hipotezą wyjściową, dokonuje ewentualnych modyfikacji i ponownie poddaje procesowi symulacji komputerowej. Ten cykl badań powtarza się aż do uzyskania zadowalającego rozwiązania lub decyzji o niekonkluzywnym zakończeniu eksperymentu³⁹.

Ponadto symulacje komputerowe mogą stanowić specyficzny pomost pomiędzy pracą teoretyczną a eksperymentalną. Jak zauważa Deborah Dowling, symulacje mogą być próbą eksperymentowania na teoriach⁴⁰. Ujęcie teoretyczne zaimplementowane jest do programu komputerowego służącego do przeprowadzania symulacji, dzięki czemu jest praktycznie użyteczne jako swiste wirtualne laboratorium. Badacz może oddziaływać na oprogramowanie

³⁶ Istnieje wiele programów, które służą do obliczeń inżynierskich i naukowych, np.: *Matlab* (pakiet zorientowany na obliczenia numeryczne na macierzach wartości zespolonych), *Mathematica* (pakiet zorientowany na obliczenia symboliczne), *Mathcad* (komercyjny program algebry komputerowej o możliwościach zbliżonych do *Mathematica*), *Origin* (wielofunkcyjny pakiet do analizy i wizualizacji wyników badań naukowych; bardziej zaawansowanym użytkownikom program pozwala tworzyć własne procedury analizy danych), *Statistica* (pakiet oprogramowania do statystycznej analizy danych; umożliwia wizualizację wyników analizy oraz generowanie raportów analizy statystycznej).

³⁷ Por. D. Sobczyńska, *Sztuka badań...*, s. 92–107.

³⁸ Por. tamże, s. 108–115.

³⁹ Por. tamże.

⁴⁰ D. Dowling, *Experimenting on Theories*, „Science in Context” 1999, vol. 12, no. 2, s. 261–273.

w sposób przypominający pracę eksperymentalną (może zmieniać warunki fizyczne dla wirtualnych obiektów, ich wirtualne położenia, prędkości itd.).

Autorka *Experimenting on Theories* dokonuje także ciekawego porównania pracy teoretycznej, pracy eksperymentalnej i symulacji komputerowej. Dla każdej z tych kategorii podaje opis obiektów, z którymi uczony pracuje, oraz charakterystykę rodzaju aktywności uczonego. Dla pracy teoretycznej, według Dowling, obiektami są reprezentacje, symbole i modele, zaś aktywność to operowanie równaniami i rozwijanie idei teoretycznych. Praca eksperymentalna, jak twierdzi, to praca z przedmiotami istniejącymi w świecie przy użyciu urządzeń, które służą do manipulacji przedmiotami, oraz obserwacja zachodzących zdarzeń. Natomiast w przypadku symulacji komputerowej obiekty podobne są do tych, jakich używa się podczas pracy teoretycznej, a rodzaj aktywności uczonego zbliżony jest do pracy eksperymentalnej. Pokazuje to zatem, że symulacje komputerowe łączą w sobie po jednym z dwóch aspektów pracy teoretycznej i eksperymentalnej. W ich ramach bowiem na obiektach teoretycznych (reprezentacjach, symbolach, modelach) wykonuje się operacje typowo eksperymentalne (manipulacje tymi przedmiotami oraz obserwację zachodzących zdarzeń).

Warto podkreślić, że symulacje komputerowe nie dotyczą wyłącznie reprezentowania graficznego, umożliwiającego wirtualny ogląd obiektów teoretycznych, które w inny sposób pozostają niewidzialne (linie sił pól fizycznych, pojedyncze promienie świetlne, rozkłady gęstości chmury elektronowej itp.). Jest to ważny aspekt pracy naukowej wspomaganej symulacjami (zwłaszcza w chemii), ale z pewnością nie jedyny⁴¹. Najczęściej bowiem symulacje komputerowe to po prostu wyniki działania programu komputerowego opracowanego w celu modelowania zachowań rzeczywistego układu, które nie muszą być przedstawiane w formie graficznej.

Widać więc, że symulacje komputerowe mieszczą się głównie w drugiej grupie zastosowań komputera w naukach empirycznych (wymienionych we wstępie do rozdziału 2), kiedy jest on wykorzystywany do: formułowania prostych praw fenomenologicznych (to zagadnienie zostanie omówione w następnym paragrafie), numerycznego uzasadniania przeprowadzania kolejnych eksperymentów, cyfrowego modelowania przebiegu zjawisk czy procesów, projektowania i optymalizacji nowych, wspomaganych komputerowo, zestawów eksperymentalnych oraz wizualizacji wyników symulacyjnych analiz numerycznych.

⁴¹ Wizualizacje komputerowe jako elementy ułatwiające myślenie, komunikowanie się i wspólne rozwiązywanie problemów zostały szczegółowo przedstawione w obszernej monografii: H. Rheingold, *Narzędzia ułatwiające myślenie. Historia i przyszłość metod poszerzania możliwości umysłu*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2003.

3.2.2. Czy możliwe są badania bez podmiotu eksperymentującego?

Piotr Giza w swojej monografii poświęconej filozoficznemu i metodologicznemu aspektom komputerowych systemów odkryć naukowych⁴² udziela odpowiedzi na pytanie, czy możliwa jest automatyzacja odkrycia naukowego. Nie stawia jednak *explicite* pytania zawartego w tytule bieżącego paragrafu. Podobnego pytania nie stawia się także w przywoływanej literaturze poświęconej komputerowemu wspomaganemu planowaniu eksperymentów⁴³. W niniejszym rozdziale, bazując na wnioskach Gizy oraz ustaleniach Zbigniewa Polańskiego, udzielę odpowiedzi na postawione przez siebie, nowe w stosunku do stawianych przez przywołanych autorów, pytanie zawarte w tytule niniejszego paragrafu: czy możliwe są badania bez podmiotu eksperymentującego⁴⁴.

Podmiot eksperymentujący projektuje, przeprowadza eksperyment oraz interpretuje jego wyniki. Warto się zatem zastanowić, czy możliwe jest wyeliminowanie podmiotu z trzech powyższych procedur, gdy eksperyment wspomagany jest technikami komputerowymi? Czy współcześnie możliwy jest przypadek graniczny, tj. „zniknięcie” podmiotu eksperymentującego? Do odpowiedzi na te pytania powrócę po przeanalizowaniu kilku przykładów, pozwolą one bowiem odnieść się do tytułowego pytania.

W latach siedemdziesiątych XX wieku grupa badaczy sztucznej inteligencji⁴⁵ w Stanach Zjednoczonych zajęła się projektowaniem i uruchamianiem systemów komputerowych, które miały modelować procesy odkryć nauko-

⁴² P. Giza, *Filozoficzne i metodologiczne... Z wyjątkiem opisywanego przez Gizę programu FAHRENHEIT*, treści przywoływanej monografii nie są związane z tematyką mojej książki. Są jednak związane z szeroko rozumianą pracą eksperymentalną, której analizie poświęcone jest niniejsze opracowanie.

⁴³ Zob. Z. Polański, *Badania empiryczne...*, s. 141–150.

⁴⁴ Tytuł niniejszego paragrafu nawiązuje do tytułu jednego z rozdziałów książki: K. Popper, *Wiedza obiektywna. Ewolucyjna teoria epistemologiczna*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012. Należy ona, obok *Logiki odkrycia naukowego*, do najbardziej znanych dzieł tego filozofa. Książka ta poświęcona jest ważnym dla teorii Poppera wątkom, tj. idei trzeciego świata, teorii i sytuacji problemowych, epistemologii bez podmiotu poznającego oraz zasadom epistemologii ewolucjonistycznej. W rozdziale „Epistemologia bez podmiotu poznającego” Popper między innymi broni tezy, według której wiedza w sensie obiektywnym jest niezależna od wiedzy w sensie subiektywnym, gdyż jest wiedzą bez podmiotu poznającego. Por. K. Popper, *Wiedza obiektywna...*, s. 138–158. Rozważania zawarte w bieżącym paragrafie nie mają wiele wspólnego z argumentacją Poppera, gdyż są szeroko związane z pracą eksperymentalną, o której filozof ten wspomina tylko na marginesie. Dla mnie właśnie filozofia eksperymentu jest wiodącą dziedziną badawczą, której poświęcony jest nie tylko ten paragraf, ale cała książka.

⁴⁵ „Wyrażenie *artificial intelligence* wymyślił John McCarthy w 1956, jako temat konferencji, która miała nadać, i w rzeczy samej nadała, nowy impet badaniom i projektom prowadzonym w USA”, W. Marciszewski, *Sztuczna inteligencja*, Społeczny Instytut Wydawniczy Znaki, Kraków 1998, s. 9.

wych w takich dziedzinach, jak matematyka, fizyka, chemia czy biologia. Wyłoniły się trzy główne tradycje badawcze zajmujące się komputerowym modelowaniem odkryć naukowych. Są to: grupa skupiona wokół Herberta Simona⁴⁶, badacze wywodzący się z tzw. tradycji Turinga oraz przedstawiciele programu badawczego HHNT (skrót pochodzi od nazwisk czterech badaczy: Johna Hollanda, Keitha Holyoaka, Richarda Nisbetta, Paula Thagarda).

Naukowcy w swojej pracy wykonują wiele różnych czynności badawczych: odkrywają i opisują problemy, znajdują dla nich reprezentacje, projektują i konstruują aparaturę potrzebną do przeprowadzania doświadczeń, planują procedury eksperymentalne, wykonują eksperymenty, uzyskują dane empiryczne, formułują prawa i teorie na podstawie tych danych oraz wyprowadzają różnorakie konsekwencje ze swoich teorii. Simon twierdzi, że wszystkie – wyżej wymienione – dziedziny działalności naukowej są formą rozwiązywania problemów.

W badaniach dotyczących wyprowadzania praw ze zbioru danych grupa Simona ma największe osiągnięcia. Seria coraz doskonalszych, wzbogacanych o kolejne możliwości, programów, od BACON 1 do BACON 5 oraz system FAHRENHEIT, została wdrożona właśnie w tym celu. Programy te symulują odkrycie wielu znanych praw, głównie z fizyki z XVII, XVIII i XIX wieku, np. prawa Keplera, prawa swobodnego spadku Galileusza, prawa załamania Snelliusa, prawa bilansu cieplnego Blacka oraz prawa Ohma. Inne programy, jak GLAUBER, formułują prawa o charakterze jakościowym, na podstawie jakościowych danych opisujących substancje wchodzące w reakcje chemiczne.

Z perspektywy problemów poruszanych w niniejszej pracy, najbardziej obiecujący jest system FAHRENHEIT, gdyż może być bezpośrednio połączony z układem eksperymentalnym wspomaganym komputerowo⁴⁷. W tym przypadku mamy do czynienia z dwoma komputerami. Zadaniem pierwszego jest zbieranie danych i sterowanie przebiegiem eksperymentu, a na drugim, który komunikuje się z pierwszym, zainstalowany jest system FAHRENHEIT pełniący rolę podmiotu eksperymentującego. Jest on w stanie odkryć skomplikowane prawa z wieloma zmiennymi oraz podać zakres ich stosowalności. Wymaga to selektywnego procesu przeprowadzania eksperymentów i odpowiednich procedur gromadzenia i przetwarzania danych empirycznych. Program potrafi również analizować błędy pomiarowe i powtarzalność wyników eksperymentów, a także znajdować maksima w zbiorze danych pomiarowych.

System FAHRENHEIT nie tylko poszukuje praw empirycznych na podstawie danych, ale stara się też ustalić zakres stosowalności tych praw. Napotykając koniec zakresu stosowalności dotychczas ustalonego prawa,

⁴⁶ Krótkiej charakterystyki osiągnięć grupy Herberta Simona dokonam na podstawie: P. Giza, *Filozoficzne i metodologiczne...*, s. 24–48, 54–107.

⁴⁷ Por. rys. 1.3, w: tamże, s. 37.

uruchamia algorytm rekurencyjny, służący do analizowania danych w coraz mniejszych przedziałach, w celu precyzyjnego określenia obszaru stosowności prawa. „Działając w ten sposób, system był na przykład w stanie odkryć prawo Blacka (równowagi termicznej zmieszanych ciał o różnych temperaturach początkowych) w przypadku przejść fazowych (topnienie czy krzepnięcie)”⁴⁸.

FAHRENHEIT zastosowany został również do badań w laboratorium elektrochemicznym, gdzie przeprowadzał kilkugodzinne eksperymenty, gromadził i analizował dane empiryczne, a na końcu formułował na ich podstawie proste zależności. Wyniki, jakie otrzymał system, były zbieżne z rezultatami badań prowadzonych równolegle przez eksperymentującego chemika. Według autorów programu „wyniki są zachęcające: kilka dni pracy laborantów analizujących dane i wykonujących proste eksperymenty odpowiadało około 50 minutom pracy systemu, co więcej, FAHRENHEIT posiada zdecydowaną wyższość nad standardowymi programami statystycznymi wspomagającymi eksperymentatora w analizie danych, choć koszty i nakład pracy wymagane do jego instalacji na stacji roboczej Sun i sprzężenia jej z komputerem PC sterującym aparaturą eksperymentalną były oczywiście ogromne”⁴⁹.

System FAHRENHEIT wpisuje się w formę działalności naukowej, o której Simon wspomina raczej marginalnie, a którą jest wynajdywanie nowych instrumentów (poszukiwanie instrumentów, które wykorzystywałyby nowe zjawiska oraz poszukiwanie nowych zjawisk, za pomocą coraz doskonalszych instrumentów pomiarowych – tutaj można by zastosować system FAHRENHEIT).

Planowanie eksperymentów jest kolejną dziedziną, którą według Simona udało się zbadać z użyciem symulacji komputerowych. Udało się bowiem odtworzyć za pomocą programu komputerowego KEKADA serie eksperymentów, jakie na początku lat trzydziestych XX wieku przeprowadził niemiecki biolog Hans Krebs. Według Simona proces planowania i przeprowadzania serii eksperymentów da się sprowadzić do procedur przeszukiwania heurystycznego, bardzo podobnych do procedur stosowanych w innych dziedzinach związanych z rozwiązywaniem problemów.

Poszukiwanie teorii wyjaśniających jest z pewnością kolejnym ważnym aspektem pracy eksperymentalnej. Simon dostrzega, że wiele odkryć dokonanych przez programy BACON polega jedynie na formułowaniu uogólnień empirycznych. Nie wyjaśniają one, dlaczego dane przyjmują takie, a nie inne wartości. Na przykład „odkryte” przez system BACON trzecie prawo Keplera jedynie opisuje relacje pomiędzy okresem obiegu planety wokół Słońca a pro-

⁴⁸ Tamże, s. 76.

⁴⁹ Tamże, s. 36.

mieniem jego orbity, podczas gdy dynamika Newtona tę relację wyjaśnia, poprzez odwołanie się do prawa powszechnego ciężenia oraz zasad dynamiki.

Warto na zakończenie tej części paragrafu stwierdzić, że „rekonstrukcja odkryć naukowych dokonana przez grupę Simona jest niepełna: brak jej istotnych elementów, takich jak poszukiwanie i formułowanie problemów oraz reprezentacji (szczególnie o charakterze modeli teoretycznych) czy analiza odkryć teoretycznych. Wydaje się, że stanowi to przyczynę, dla której grupa nie może się poszczycić całkowicie nowymi odkryciami dokonanymi przez systemy”⁵⁰.

Drugim nurtem badań z zakresu sztucznej inteligencji nad odkryciem naukowym jest tzw. tradycja Turinga. Autorzy systemów powstałych w tej tradycji interesowali się rozwiązywaniem praktycznych problemów związanych z zastosowaniem systemów eksperckich w medycynie, technice czy przemyśle. Chodziło im o formułowanie drogą indukcji praw produkcji dla systemu eksperckiego na podstawie jednostkowych przypadków jednoznacznie ocenionych przez ekspertów. Pierwszymi systemami tego typu były: Meta-DENDRAL, którego zadaniem było utworzenie praw produkcji dla systemu DENDRAL (stosowanego do analizy spektrogramów skomplikowanych związków organicznych, wspomagającego ekspertów w dziedzinie chemii organicznej) oraz INDUCE. GOLEM natomiast może poszczycić się odkryciem nowego prawa w dziedzinie badania struktury białek (przewidywania drugorzędowej struktury białek na podstawie znajomości ich struktury pierwszorzędowej) o zgodności z danymi na poziomie 81%.

Warto jednak zadać ważne pytanie: czy wymienione systemy rzeczywiście dokonują odkryć nowych praw naukowych? Wydaje się, że nie, i to z kilku powodów. Odkryte przez system GOLEM uogólnienia indukcyjne nie mogą pretendować do roli praw nauki, gdyż są jedynie uogólnieniami empirycznymi o niskim poziomie ogólności. Ponadto uogólnienia te nie są trafne w 100% (a jedynie w 81%). Nie są to także prawa przyczynowe, ponieważ nie wyjaśniają regularności empirycznych poprzez odwołanie się do ogólniejszych formuł czy mechanizmów przyczynowych, ale jedynie stanowią skrótowy opis pewnych korelacji statystycznych. Tak więc systemy w tradycji Turinga, podobnie jak te stworzone przez grupę Simona, nie dokonują żadnych nowych odkryć praw naukowych. Dokonują one wprawdzie nowych odkryć, ale są to raczej uogólnienia empiryczne i korelacje statystyczne, nie zaś doniosłe poznawczo prawa nauki o szerokim zakresie stosowalności.

Program badawczy HHNT proponuje skomplikowany, pojęciowy model funkcjonowania systemu kognitywnego, który jest systemem samouczącym się oraz zdolnym do adaptacji względem zmian zachodzących w jego środo-

⁵⁰ Tamże, s. 327–328.

wisku. Implementacją tego modelu jest system komputerowy PI, który odkrył falową teorię dźwięku. „Podsumowując moją ocenę osiągnięć badaczy z grupy HHNT, chciałbym stwierdzić, że propozycje ich są jak na razie conceptualne, pozbawione spektakularnych praktycznych wyników. Jednak sama analiza procesu tworzenia i modyfikacji wiedzy w oparciu o procedury indukcyjne jest niezwykle interesująca, uwzględnia bowiem jego nieliniowość oraz systemowość wiedzy daleko wykraczającą poza logiczne związki między poszczególnymi twierdzeniami”⁵¹.

Giza w swojej książce o filozoficznych i metodologicznych aspektach komputerowych systemów odkryć naukowych stwierdza, że wszystkie trzy programy badawcze zakończyły się fiaskiem, tzn. nie udało się jak dotąd w całości zrealizować programu racjonalnej rekonstrukcji odkryć naukowych⁵². Współczesne systemy odkryć empirycznych umożliwiają jednak zautomatyzowanie i przyspieszenie prostych prac laboratoryjnych. „Są one w stanie wychwycić istotne prawidłowości numeryczne z chaosu danych obciążonych błędem pomiaru. Dzięki zastosowaniu sprzężonych z komputerem manipulatorów i sensorów systemy takie są już w stanie same sterować wykonywaniem prostych eksperymentów. (...) Rzecz jasna powstaje pytanie, czy systemy komputerowe są w stanie odkryć w nauce coś nowego, coś, o czym wcześniej badacze nie wiedzieli. Sceptycy twierdzą, że, jak dotąd, systemy, nawet te najdoskonalsze, dokonywały jedynie ponownego odkrycia znanych praw, i to w warunkach jak najbardziej sprzyjających, sztucznie stworzonych przez ich twórców, chyba że za «odkrycie» uznamy sformułowanie uogólnienia empirycznego, w dodatku prawdziwego jedynie w pewnym procencie przypadków”⁵³.

Nie istnieją zatem na tyle doskonałe systemy, które mogłyby zastąpić eksperymentatora we wszystkich przejawach jego twórczej działalności prowadzącej do odkryć naukowych (obserwacji przyrody, dostrzegania ważnych zjawisk i problemów, konstruowania aparatury eksperymentalnej, dokonywania eksperymentów, tworzenia teorii). Istnieją wszakże różnorodne systemy wspomagające pracę eksperymentalną (np. wspomniane FAHRENHEIT, Meta-DENDRAL, GOLEM itd.) i takie, których ambicją nie jest zastępowanie eksperymentatora, ale służące jedynie do komputerowego wspomaganie planowania eksperymentu⁵⁴. Należą do nich programy CADEX/DOE (CADEX – *Computer Aided Design and Analysis of Experiments*, DOE – *Design of Experiments*) oferujące metody komputerowego wspomaganie eksperymentu. Powstała

⁵¹ Tamże, s. 339.

⁵² Por. tamże, s. 164.

⁵³ Tamże, s. 195.

⁵⁴ Opis systemów służących do komputerowego wspomaganie planowania eksperymentu zacerpnąłem z: Z. Polański, *Badania empiryczne...*, s. 141–150.

również całkowicie nowa, druga generacja (2GD) planów eksperymentów na bazie tzw. inteligentnych systemów obliczeniowych (komputerowych sieci neuronowych, algorytmów ewolucyjnych itd.), gdzie komputer występuje w roli eksperta pomagającego zaplanować dany eksperyment.

Programy CADEX/DOE to na przykład: STATISTICA - moduł: *Planowanie doświadczeń* (firmy StatSoft), DESIGN-EXPERT (Stat-Ease), STATGRAPHICS PLUS - Experimental Design (Manugistics), CADEX: ESDET (Cermet), MATLAB - Statistics Toolbox (MathWorks), JMP - The Statistical Discovery Software (SAS Institute) oraz rozległy system SAS z procedurami GLM i RSREG. Badacz, który chce posłużyć się takim systemem, musi ustalić wielkości wejściowe i ich zakresy oraz wielkość wyjściową. Następnie wykonuje dwie czynności wspomagane komputerowo związane z teorią eksperymentu (omówioną na początku rozdziału 2): wybiera plan eksperymentu dostosowany do celu i warunków zamierzonego eksperymentu, a po przeprowadzeniu pomiarów zgodnie z tym planem przeprowadza statystyczną analizę danych empirycznych, obejmującą m.in. aproksymację funkcji i testy statystyczne weryfikujące adekwatność funkcji względem wyników pomiarów, analizę statystyczną istotności oraz optymalizację (wyznaczenie ekstremów funkcji).

Podstawowe znaczenie ma wybór planu eksperymentu. Każdy program komputerowy typu CADEX/DOE posiada rozległą bazę planów eksperymentów. Umożliwia generowanie różnych planów zgodnie z zasadami teorii eksperymentu. Stanowi to z pewnością bardzo duże ułatwienie, jednakże sama prezentacja wielu możliwości nie wystarcza, gdyż to właśnie eksperymentator musi podjąć decyzję dotyczącą wyboru danego planu eksperymentu (np. w programie STATISTICA i DESIGN-EXPERT). Jak dotąd wszystkie programy komputerowe CADEX/DOE oferują bardzo szeroką ofertę różnych rodzajów planów eksperymentów, jednakże wybór konkretnego planu oraz ustalenie jego szczegółowej charakterystyki zawsze pozostaje w gestii eksperymentatora. Zatem użycie tego oprogramowania stawia badacza w kłopotliwej sytuacji, bowiem uświadamia mu bardzo szeroki wachlarz możliwości teorii eksperymentu, który często koliduje z jego kompetencjami. Tak właśnie zrodziła się potrzeba korzystania z pomocy ekspertów w zakresie planowania eksperymentów w postaci komputerowych systemów eksperckich (np. DAX-Expert).

Z komputerowym systemem eksperckim, podobnie jak z człowiekiem - ekspertem, prowadzić można dialog. System zadaje wiele pytań (w trybie tekstowo-graficznym), a eksperymentator udziela odpowiedzi. System zazwyczaj prezentuje różne warianty odpowiedzi, co eliminuje możliwość udzielania odpowiedzi niejednoznacznych. Gdy dowie się już wystarczająco dużo o obiekcie badań i celu eksperymentu, prezentuje ekspertyzę w postaci planu eksperymentu i skojarzonych z nim metod analizy danych empirycznych. Ponadto niezaprzeczalną zaletą tego typu oprogramowania

CADEX/DOE jest wspomaganie komputerowe obliczeń związanych z analizą danych empirycznych.

Podsumowując treść niniejszego paragrafu, można jednoznacznie stwierdzić, że współcześnie nie jest możliwa automatyzacja odkrycia naukowego. Konsekwencją tego jest fakt, że niemożliwe są całkowicie zautomatyzowane badania, które w ogóle nie angażowałyby podmiotu eksperymentującego. Eksperymentator może jednak korzystać z oprogramowania wspomagającego planowanie eksperymentów oraz późniejszą ich realizację (za pomocą przyrządów pomiarowych i urządzeń wykonawczych sterowanych cyfrowo) oraz analizę danych empirycznych (aproksymację numeryczną i neuronową, optymalizację i analizę istotności)⁵⁵. Naukowcy bowiem „potrzebują pomocy ze strony systemów komputerowych, a nie automatycznych (i autonomicznych) systemów odkryć. Ich kariery obracają się właśnie wokół odkryć, których byli w stanie samodzielnie dokonać”⁵⁶.

Tak więc współcześnie niemożliwe są badania bez podmiotu eksperymentującego. Eksperymentator wszakże ustala, co chce badać i w jaki sposób. Projektuje aparaturę badawczą i decyduje o parametrach eksperymentu. Może posługiwać się programami komputerowymi wspomagającymi projektowanie eksperymentu typu CADEX/DOE czy DAX-Expert, ale nie mogą one wyeliminować eksperymentatora. Natomiast systemy komputerowe mogą w sposób automatyczny przeprowadzać eksperymenty (np. FAHRENHEIT), o ile zostały podłączone do aparatury badawczej i stworzono odpowiednie oprogramowanie służące do akwizycji danych empirycznych. Można by zatem sformułować tezę, że komputer sam przeprowadza eksperymenty. Nie jest to jednak teza zasadna, gdyż to właśnie eksperymentator musiał przygotować aparaturę badawczą i odpowiednie oprogramowanie, bez których zestaw eksperymentalny nie mógłby w ogóle funkcjonować. To samo zastrzeżenie można odnieść do samodzielnej komputerowej interpretacji wyników. Potrzebne jest określone oprogramowanie (np. typu LabVIEW, opisane w podrozdziale 2.5), które zostało opracowane oraz skonfigurowane przez badacza i które – co starałem się wykazać na podstawie przywołanych w niniejszym paragrafie przykładów – nie jest w stanie samodzielnie odkryć całkowicie nowych praw ogólnych o charakterze przyczynowym, opisujących określone dziedziny zjawisk⁵⁷. „Wszystkie współczesne systemy działają bowiem, jak na razie, na poziomie praw fenomenologicznych, opisujących

⁵⁵ Por. tamże, s. 150–183.

⁵⁶ P. Giza, *Filozoficzne i metodologiczne...*, s. 196.

⁵⁷ „Badacze z kręgu tradycji Turinga mogą się wprawdzie pochwalić systemami, które na drodze indukcyjnej odkrywają całkowicie nowe prawa, lecz są to raczej regularności empiryczne o bardzo wąskim zakresie zastosowań, niż prawa ogólne o charakterze przyczynowym, opisujące określone dziedziny zjawisk”, P. Giza, *Filozoficzne i metodologiczne...*, s. 164.

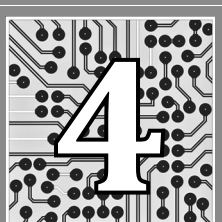
wielkości empiryczne i zależności przyczynowe, a nie na poziomie ogólnych abstrakcyjnych teorii”⁵⁸.

Niemożliwe są badania bez podmiotu eksperymentującego, gdyż nie można całkowicie wyeliminować badacza z procedur projektowania, przeprowadzania i interpretacji wyników eksperymentu⁵⁹ – choć z pewnością systemy komputerowego wspomagania badań doświadczalnych są bardzo pomocne przy optymalizacji i realizacji tego rodzaju procedur badawczych.

⁵⁸ Tamże, s. 190.

⁵⁹ Na przykład w największym, najnowocześniejszym i najbardziej skomputeryzowanym laboratorium fizycznym na świecie, tj. w CERN, przy interpretacji danych empirycznych pracują niezależnie dwa zespoły badawcze (grupy badawcze detektorów ATLAS i CMS, o których napiszę więcej w podrozdziale 4.2). W ramach każdego z nich powoływane są mniejsze grupy badaczy, z których każda używa innego oprogramowania służącego do analizy i interpretacji danych empirycznych (np. PYTHIA6, MadGraph, AcerMC, PYTHIA8, HERWIG, SHERPA, JIMMY, TAUOLA, PHOTOS, CT10, POWHEG, MC@NLO, gg2WW, gg2ZZ, CTEQ6L1, ALPGEN, MRSTMCal). Por. *Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC*, „Physics Letters B” 2012, no. 716, s. 2–3. Komputerowe systemy odkryć naukowych to zazwyczaj jeden program, który analizuje specjalnie spreparowane dane. Współczesna praktyka eksperymentalna jest jednak zupełnie inna. Stanowią ją liczne grupy badaczy, którzy konkurują między sobą, używając różnych programów do analizy tych samych danych empirycznych. Programy komputerowe mogą zatem służyć do wspomaganie interpretacji danych eksperymentu (tak są projektowane i tak używane przyczyniają się do uzyskiwania poznawczo ważnych wyników, jak choćby te opisane w podrozdziale 4.2), ale nie mogą robić tego samodzielnie bez udziału podmiotu eksperymentującego.

ROZDZIAŁ



Badania eksperymentalne wspomagane komputerowo a filozoficzna refleksja nad naukami empirycznymi (status komputera w badaniach eksperymentalnych)

Ważną zaletą komputerów jest fakt, że są to urządzenia deterministyczne. Oznacza to, że jeśli komputer jest w danym stanie i zachowuje się w pewien sposób, to będzie się zachowywał tak samo za każdym razem, gdy znajdzie się w tym stanie. Ta własność pozbawia je zdolności do zachowań przypadkowych, a więc i do produkowania przypadkowych danych. Jednakże użycie, nawet tak prostych, deterministycznych urządzeń pociąga za sobą określone konsekwencje natury filozoficznej. Instrumentarium używane podczas badań eksperymentalnych wspomaganych komputerowo implikuje konieczność przeformułowania wielu tez wysuwanych przez zwolenników nowego eksperymentalizmu (zob. podrozdział 4.1). Współczesne badania eksperymentalne, a zwłaszcza duże projekty, są niemożliwe do realizacji bez użycia rozbudowanych systemów komputerowych (zob. podrozdział 4.2). Wyznaczają one nowy styl pracy naukowej (zob. podrozdział 4.3), którego cechy wskazują na rewolucyjną zmianę w stosunku do badań prowadzonych bez użycia wspomagania komputerowego eksperymentów (zob. podrozdział 4.4). Komputer jest urządzeniem rewolucyjnym w tym sensie, że umożliwił naukom empirycznym przejście z laboratoryjnego do komputerowego stylu badań naukowych, a jego użycie diametralnie zmieniło charakter eksperymentów, co postaram się wykazać w niniejszym rozdziale.

4.1. Nowy eksperymentalizm a eksperymenty wspomagane komputerowo

Przedstawiciele nowego eksperymentalizmu niewątpliwie dokonali istotnego dowartościowania roli eksperymentu w badaniach naukowych. Wspólnie przeciwstawili się lekceważącemu traktowaniu realiów praktyki eksper-

mentalnej w analizach z zakresu filozofii i historii nauki. Oponują także przeciwko wąskiemu traktowaniu roli eksperymentu jako służącego jedynie do potwierdzania lub obalania teorii. Nowi eksperymentalisci są bowiem zdania, że współczesna działalność eksperymentalna stała się w dużej mierze autonomiczna, zaś jej odrębność przejawia się w dychotomii kultur teoretycznych i eksperymentalnych, bliskiej łączności pracy eksperymentalnej z techniką i technologią (bliższej niekiedy niż z samą teorią) oraz w znacznej ateoretyczności praktyki eksperymentalnej.

Ważnym wkładem nowego eksperymentalizmu do filozofii nauki jest przeanalizowanie nowej roli, jaką może odgrywać eksperyment. Jest nią kreowanie nowych zjawisk, które nie występują lub nie mogą w ogóle występować w przyrodzie w stanie czystym. Fizycy tego rodzaju zjawiska zaczęli nazywać efektami (efekt Comptona, fotoelektryczny, piezoelektryczny, piroelektryczny itp.). Zdaniem przedstawicieli nowego eksperymentalizmu eksperymentować nie znaczy tylko testować teorie, ale przede wszystkim – wytwarzać, produkować, doskonalić i stabilizować zjawiska. Przyznają oni także zasadniczą rolę w badaniu naukowym manipulowaniu, działaniu, ingerencji (*intervening*).

Galison próbuje udzielić odpowiedzi na pytanie, co przesądza o tym, że badacz decyduje się zakończyć eksperyment¹? Twierdzi, że wpływ na to ma dotychczasowe doświadczenie zawodowe naukowca, stopień jakości technicznej aparatury badawczej, szybkość obliczeń prowadzonych po zakończeniu eksperymentu. Ważny jest także aspekt socjologiczny: pochopna decyzja o zakończeniu badań i szybka publikacja nie do końca uzasadnionych wyników wystawiają dobrą reputację badacza na ryzyko jej utraty, a z kolei zbyt długie zwlekanie z publikacją wyników może sprawić, iż odkrywcą zostanie ktoś inny. Eksperymentator, kończąc swoją pracę, nigdy nie jest jednak pewien, czy zbadał dane zjawisko w czystej, wolnej od zakłóceń postaci.

Ponadto, aby podjąć decyzję o zakończeniu eksperymentu, są mu potrzebne pewne założenia teoretyczne. Umożliwiają one wybranie jakiegoś fragmentu świata jako interesującego poznawczo; wpływają na procedury pomiaru i sposoby interpretacji uzyskanych wyników. Galison relacje pomiędzy teorią a eksperymentem widzi inaczej niż przedstawiciele tradycji empiryzmu logicznego oraz Kuhn i jego kontynuatorzy. Odcina się bowiem od ścisłego oddzielenia teorii od eksperymentu, co postulował Carnap, oraz od falsyfikacjonizmu Poppera, w ramach którego procedury eksperymentalne nie generowały wartościowych poznawczo problemów. Ostrzega także przed absolutyzowaniem psychologii percepcji oraz dominacją socjologicznego punktu widzenia w filozofii nauki. Polemizuje także z koncepcją niewspółmierności odnoszoną do badań empirycznych. Galison twierdzi bowiem, że przełomy w dziedzinie teorii i eksperymentu nie muszą iść z sobą w parze. Okres,

¹ Por. P. Galison, *How Experiments End*, The University of Chicago Press, Chicago 1987, s. 13–19.

w którym teoretyk zrywa z daną tradycją naukową, nie musi od razu oznaczać zerwania z metodami, procedurami oraz instrumentarium badawczym nauki używanymi w tym czasie.

W większości działów fizyki XX wieku podział na teoretyków i eksperymentatorów stał się ważną częścią struktury intelektualnej, instytucjonalnej i edukacyjnej. Galison mówi wręcz o ukształtowaniu się wśród fizyków dwóch kultur: eksperymentalnej i teoretycznej. Nie oznacza to bynajmniej, że współpraca między nimi jest niemożliwa, ale wskazuje na konieczność analizy współczesnej pracy eksperymentalnej, która była zaniedbywana przez teoretycystycznie nastawionych filozofów nauki. W tradycji metodologicznej bowiem czynnik teoretyczny został opracowany bardzo obszernie, czynnik zaś eksperymentalny, uwzględniający analizy racjonalności badań i ich strategii, wymaga dopiero wszechstronnego zbadania. Zadanie to podjęli nowi eksperymentaliści w latach osiemdziesiątych XX wieku, jednakże – w moim mniemaniu – z pewnością go nie dokończyli, gdyż pominieli w swoich analizach bardzo ważny element niemalże wszystkich współcześnie działających układów eksperymentalnych, jakim jest komputer.

Hacking twierdzi, że już w XVII wieku pojawia się tzw. nauka laboratoryjna. „Charakteryzuje się ona konstruowaniem aparatury przeznaczonej do izolowania i oczyszczania istniejących zjawisk oraz do tworzenia nowych”². Współcześnie tego rodzaju aparatura, służąca do precyzyjnego izolowania i oczyszczania istniejących zjawisk oraz do wytwarzania nowych, wspomagana jest przez systemy komputerowe, co w następnym podrozdziale opiszę szczegółowo na przykładzie Wielkiego Zderzacza Hadronów działającego w CERN. Także Hacking zauważa, że jednym z czynników jednoczących, które scalają nauki, są pewne narzędzia, do których zalicza szybkie obliczenia komputerowe (jest zaskakujące, że do narzędzi nie zalicza komputera, ale szybkie obliczenia na nim wykonywane)³. Jego analiza tego zagadnienia nie może być niestety wyczerpująca, gdyż zajmuje tylko jeden akapit artykułu *Niejedności nauk*. Twierdzi w nim, że dzięki szybkim obliczeniom numerycznym możemy formułować nowe teorie i przetwarzać duże ilości danych empirycznych. Przykładami tego rodzaju obliczeń komputerowych, według niego, są zliczenia danych płynących z teleskopu posiadającego wiele małych zwierciadeł oraz wirtualne projekty akustyczne architektury teatru⁴.

Powyższe uwagi poczynione przez Hackinga wskazują, że nie bierze on pod uwagę specyfiki eksperymentów wspomaganych komputerowo, gdyż – po pierwsze – redukuje rolę komputera w badaniach empirycznych tylko

² I. Hacking, *Niejedności nauk*, „Studia Philosophica Wratislaviensia” 2008, vol. III, fasc. 1, s. 172.

³ Por. tamże, s. 175.

⁴ Por. tamże.

do szybkich obliczeń komputerowych (we wprowadzeniu do rozdziału 2 wymieniałem jeszcze dziewięć innych funkcji, które komputer może pełnić w naukach empirycznych, a są to tylko najważniejsze jego role w badaniach naukowych). Po drugie, twierdzi, że dzięki tym obliczeniom można formułować nowe teorie, co jest aktualnie niewykonalne, a o czym przekonywałem, na podstawie dostępnej literatury przedmiotu, w paragrafie 3.2.2. Po trzecie, przykłady, które podaje, są mało przekonujące. Astronomię wraz z kosmologią (wykorzystującą teleskopy) oraz inżynierię budowlaną (używającą symulacji komputerowych przy projektowaniu budynków) trudno zaliczyć do nauk laboratoryjnych. Hacking sam twierdzi, że „kosmologia i nauki kognitywne są dwiema prężnymi gałęziami nauk przyrodniczych, które (z odmiennych powodów) nie mogą używać stylu laboratoryjnego, nie mogą zakłócać biegu natury, by stworzyć nowe zjawiska”⁵.

Hacking przekonuje również, że świat i nasza wiedza naukowa o nim wzajemnie się determinują⁶. „Ogólnie laboratorium stabilizuje się poprzez wzajemne dostosowywanie się idei (które zawierają teorie z różnych poziomów), osprzętu (który podlega rewizji tak samo jak teorie) i cechowanie [marks] (zawierające dane i ich analizę)”⁷. Nauki laboratoryjne, w jego opinii, są więc stabilne w swoim rozwoju. Pisząc o tej stabilności, autor *Representing and Intervening* polemizuje z tezą o rewolucyjnym charakterze budowania nauki. Twierdzi, że wielkie rewolucyjne odkrycia w fizyce XX wieku (szczególna i ogólna teoria względności oraz mechanika kwantowa) odbywały się z niemal całkowitym pominięciem prac eksperymentalnych oraz problemu wzajemnych relacji między teoretyczną a eksperymentalną fizyką. Głównym źródłem przypisywania niestabilności fizyce, argumentuje ten filozof, jest pominięcie roli, jaką odgrywały i odgrywają w niej nauki eksperymentalne.

Hacking twierdzi, że nauki laboratoryjne, od chwili swego ukonstytuowania się, zmierzają do wytworzenia samouwierzytelniającej się struktury, która podtrzymuje swoją stabilność. Zachodzi to wtedy, gdy dopuszcza się możliwość modyfikacji wszystkich elementów biorących udział w eksperymencie. W takim wypadku mamy do czynienia z permanentnymi zmianami i pojawieniem się wzajemnych zależności między wiedzą teoretyczną, aparaturą i praktyką badawczą (składającymi się na elementy prac laboratoryjnych, omówione szerzej w podrozdziale 1.3). Uzyskanych podczas prac eksperymentalnych wyników nie można, zdaniem tego autora, oddzielić ani od użytej przez eksperymentatorów aparatury, ani od przyjętych przez nich wcześniej (choć mogących się zmieniać) założeń teoretycznych. W rozwiniętych naukach laboratoryjnych bowiem teoria i instrumentarium

⁵ Tamże, s. 173.

⁶ Por. I. Hacking, *The Self-Vindication...*, s. 33–43.

⁷ I. Hacking, *Niejedności...*, s. 179.

wzajemnie się do siebie dopasowują, wzajemnie się uwierzytelniają. „Idee, rzeczy i znaki stanowią swego rodzaju symbiozę ludzi, naukowej organizacji i natury”⁸. W ten sposób dochodzi do osobliwego zestrojenia naszych teorii, aparatów i obserwacji. W opinii Hackinga zatem teorie nie są sprawdzane przez porównywanie ich z pasywnym światem, lecz ze światem, który się zmienia, gdyż niektóre zjawiska nie istnieją przed eksperymentem, lecz są w jego trakcie kreowane⁹.

Znamienne jest jednak to, że okres, w którym narodził się styl laboratoryjny, symbolizuje – zdaniem tego filozofa – fakt zbudowania pompy próżniowej przez Roberta Boyle’a w XVII wieku¹⁰. Oznacza to, że ukonstytuowanie się tego stylu powiązane jest z początkami nowożytnej chemii, a nie z fizyką, do której Hacking często się odwołuje. Jak bowiem wiadomo, zarówno pierwotna koncepcja nauk eksperymentalnych tego autora zaprezentowana w *Representing and Intervening*, jak i jej uszczegółowienie przedstawione w artykule *The Self-Vindication of the Laboratory Sciences*, w którym opisuje nauki laboratoryjne, zostały wypracowane na podstawie analizy praktyki eksperymentalnej fizyki. Można jednak uzasadnić tezę, że „to chemia, a nie fizyka, jest paradygmatycznym przykładem nauki laboratoryjnej”¹¹.

Wysuwana przez Hackinga teza o stabilności nauk laboratoryjnych może zostać uznana za uzasadnioną, jednakże nie w odniesieniu do fizyki, ale w odniesieniu do chemii laboratoryjnej. W zestawieniu ze zmieniającymi się i konkurującymi ze sobą, często niewspółmiernymi, koncepcjami teoretycznymi z zakresu fizyki trudno mówić o jej stabilności. Konkurencyjność koncepcji teoretycznych z danej dziedziny fizyki i ich mocny wpływ na praktykę eksperymentalną tej nauki jest trudny do podważenia¹². W fizyce bowiem teorie fundamentalne odgrywają znacznie większą rolę niż na przykład w chemii, a badania laboratoryjne są bardzo często podporządkowane dążeniu do potwierdzenia ogólnej teorii. Ponadto w fizyce rola badań teoretycznych jest tak duża, że posiadają one znaczną autonomię względem badań eksperymentalnych. Warto prześledzić to na przykładzie.

Współcześnie największe laboratorium fizyczne CERN oraz najbardziej złożone i skomputeryzowane urządzenie badawcze, jakim jest Wielki Zderzacz Hadronów, zostało skonstruowane głównie po to, aby przetestować pewną koncepcję teoretyczną wyjaśniającą pochodzenie mas hadronów. W eksperymencie tym chodziło o potwierdzenie istnienia tzw. pola Higgsa poprzez

⁸ M. Sikora, *Problem interpretacji...*, s. 117.

⁹ Por. tamże, s. 119–120.

¹⁰ Por. R. Kazibut, *Proces doskonalenia się instrumentarium badawczego nauk laboratoryjnych*, „Nauka” 2012, nr 2, s. 119–122.

¹¹ P. Zeidler, *Chemia w świetle filozofii. Studia z filozofii, metodologii i semiotyki chemii*, Wydawnictwo Naukowe IF UAM, Poznań 2011, s. 17.

¹² Por. tamże.

odnalezienie cząstki pośredniczącej w oddziaływaniach z tym polem, tj. tzw. bozonu Higgsa (szczegóły tego eksperymentu omówię w następnym podrozdziale). Idea takiej nowej cząstki pojawiła się w artykule Petera Higgsa opublikowanym już w 1964 roku¹³, w którym autor zaproponował teoretyczne wyjaśnienie pochodzenia masy cząstek elementarnych. Zaproponował w nim istnienie w próżni pewnego pola skalarnego. Na początku istnienia Wszechświata było ono jednak nieaktywne, tj. nie miało wpływu na, zachodzące w nim, procesy ewolucyjne. Dopiero gdy Wszechświat się rozszerzył i tym samym zaczął się ochładzać, pole to zaczęło działać i nadało masę nieważkiej dotychczas materii¹⁴.

Mechanizm Higgsa odegrał kluczową rolę w opracowaniu teorii oddziaływania elektrosłabego przez Stevena Weinberga w 1967 roku¹⁵. Bez tego mechanizmu unifikacja oddziaływania elektromagnetycznego i jądrowego słabego byłaby niemożliwa. Z teorii oddziaływań elektrosłabych wynikało wiele przewidywań, dających się zweryfikować eksperymentalnie. Były to chociażby dwa nowe rodzaje cząstek, wuony i zetony, odpowiedzialne za przenoszenie oddziaływań słabych. Odkryto je w roku 1983, w akceleratorze SPS (ang. *Super Proton Synchrotron*) działającym w CERN od 1976 roku. Jednym z głównych celów badawczych tego akceleratora było pośrednie potwierdzenie teorii elektrosłabej przez odkrycie nowych cząstek. Eksperyment ten był zatem podporządkowany potwierdzeniu ogólnej teorii.

Trudno zatem uznać fizykę za naukę laboratoryjną w sensie Hackinga, gdyż jest ona nadal rozumiana głównie jako nauka wytwarzająca wiedzę o świecie, a nie jako praktyka laboratoryjna względnie niezależna od ustaleń teoretycznych. Można co prawda oddzielić od siebie fizykę teoretyczną oraz laboratoryjną i analizować tę ostatnią w kontekście ustaleń zaproponowanych przez Hackinga w *The Self-Vindication of the Laboratory Sciences*. Powyższe przykłady przekonują jednak, że w fizyce mamy do czynienia z istotnym wpływem rozważań teoretycznych (np. postulowane pole Higgsa) na przeprowadzane eksperymenty (np. SPS i LHC – ang. *Large Hadron Collider* w CERN). Konsekwencją tego jest fakt, że fizyka laboratoryjna jest znacznie mniej stabilna niż na przykład chemia laboratoryjna, na którą teorie wpływają w znacznie mniejszym stopniu i – tym samym – znacznie łatwiej w jej ramach może się pojawić samouwierzytelniająca się struktura¹⁶.

¹³ Por. P.W. Higgs, *Broken symmetries and the masses of gauge bosons*, „Physical Review Letters” 1964, vol. 13, no. 16, s. 508–509.

¹⁴ Por. I. Sample, *Peter Higgs. Poszukiwania boskiej cząstki*, Prószyński Media Sp. z o.o., Warszawa 2012, s. 10–11.

¹⁵ Por. S. Weinberg, *A Model of Leptons*, „Physical Review Letters” 1967, vol. 19, no. 21, s. 1264–1266.

¹⁶ Por. P. Zeidler, *Chemia w świetle filozofii...*, s. 230–232.

Również Sobczyńska zauważa, omówione wyżej, dwa ważne ograniczenia filozofii nauki proponowanej przez nowy eksperymentalizm¹⁷. Jednym z nich jest to, że przedstawiciele nowego eksperymentalizmu najczęściej analizują treści i procedury badawcze współczesnej fizyki (głównie – fizyki wysokich energii). Autorka ta stwierdza, że inne nauki eksperymentalne, np. chemia, posiadają swoje specyficzne problemy dotyczące pracy laboratoryjnej, których do tej pory nowi eksperymentalisci nie analizowali¹⁸. Drugim ograniczeniem tego kierunku jest fakt, że „poruszając się swobodnie wśród wyspecjalizowanej aparatury stosowanej w fizyce wysokich energii, nie poświęcają prawie wcale uwagi komputerom obsługującym procedury poznawcze nauk przyrodniczych (...)”¹⁹. To, że nowy eksperymentalizm, jako kierunek metodologiczny zaproponowany, aby dokonać adekwatnego opisu pracy laboratoryjnej, pomija rolę komputera w badaniach eksperymentalnych, jest – moim zdaniem – największym przeoczeniem filozofów nauki będących jego twórcami²⁰.

Już w czasie powstawania nowego eksperymentalizmu (w latach osiemdziesiątych XX wieku) bardzo ważną rolę w badaniach doświadczalnych odgrywały komputery. Jego twórcy faktu tego jednakże nie dostrzegają, a – co warto podkreślić – już wtedy rola komputerów w badaniach eksperymentalnych była bardzo znacząca²¹. Dla zilustrowania tej tezy przedstawię trzy przykłady zastosowania komputerów w pracy badawczej, które były bądź znane twórcom nowego eksperymentalizmu (gdyż sami o nich piszą), bądź znane powszechnie wtedy, gdy powstawał nowy eksperymentalizm.

W eksperymencie PEGGY II to właśnie komputer odpowiedzialny był za zapisywanie kierunku polaryzacji dla każdego impulsu (o czym infor-

¹⁷ Por. D. Sobczyńska, *Aparatura chemiczna a postulaty nowej epistemologii badań naukowych*, [w:] E. Piotrowska, J. Wiśniewski (red.), *Z filozofii przyrodznawstwa i matematyki*, Wydawnictwo Fundacji Humaniora, Poznań 2002, s. 170–171.

¹⁸ Prace D. Sobczyńskiej i P. Zeidlera poświęcone są ukazaniu specyfiki metodologicznej, teoretycznej i doświadczalnej praktyki badawczej chemii, a tym samym stanowią uzupełnienie i poszerzenie rozważań nowych eksperymentalistów. Por. P. Zeidler, *Chemia w świetle filozofii...*

¹⁹ D. Sobczyńska, *Aparatura chemiczna...*, s. 170.

²⁰ Niniejsza monografia – w zamierzeniu autora – jest uzupełnieniem tego ograniczenia nowego eksperymentalizmu, o czym wspominałem we Wstępie.

²¹ „Warto (...) pamiętać, że wielka rewolucja informatyczna ma swoje źródło i początek w badaniach naukowych i wielkich programach badawczych typu podbój kosmosu czy budowa wielkich akceleratorów i zderzaczy. To wielkie programy podboju kosmosu przyczyniły się do szybkich postępów elektroniki opartej na półprzewodnikach, obwodach scalonych i doprowadziły do niezawodności sprzętu elektronicznego. Z kolei wielkie zderzacze cząstek elementarnych przyczyniły się do niebywałego rozwoju komputerowo wspomaganey techniki pomiarowej i analizy danych. Powszechnie dziś używane strony www powstały w CERN-ie wraz z wielkim zderzaczem elektronów LEP, poprzednikiem uruchamianego obecnie wielkiego zderzacza hadronów LHC”, H. Szydłowski, *Pomiary wspomagane komputerowo*, „Postępy Fizyki” 2009, t. 60, z. 6, s. 242.

muje sam Hacking²²), zatem – co warto podkreślić – bez komputera całe urządzenie byłoby bezwartościowe. Jednakże tego aspektu funkcjonalności urządzenia PEGGY II ów filozof w ogóle nie zauważa i nie poddaje metodologicznej analizie. Tymczasem już w 1978 roku (powstanie PEGGY II²³) ważną częścią aparatury eksperymentalnej analizowanej (w 1984 roku) przez Hackinga był komputer, jednakże autor fakt ten pomija.

W CERN od początku lat siedemdziesiątych XX wieku powszechnie używane były komputery. Ich rola przy odkryciu w 1983 roku przewidzianych teoretycznie bozonów pośredniczących w oddziaływaniach słabych (akcelerator Super Proton Synchrotron, który przekształcono w zderzacz proton-antyproton) była kluczowa. Bez komputerów całe urządzenie nie mogło funkcjonować. Trudno sądzić, by Hacking nie słyszał o najbardziej skomputeryzowanym laboratorium na świecie (tj. o CERN) i nie wiedział o roli komputerów w przeprowadzanych tam, wówczas od ponad dekady, eksperymentach, zwłaszcza że sam podaje liczne przykłady z fizyki wysokich energii, musiał więc z pewnością znać najważniejsze laboratorium zajmujące się tym działem fizyki.

AGC (ang. *Apollo Guidance Computer*)²⁴ to uniwersalny komputer (jeden z pierwszych zbudowanych nie z lamp elektronowych czy tranzystorów, ale z układów scalonych), który bezpośrednio steruje innymi maszynami – w tym przypadku silnikami pojazdu kosmicznego. Prace nad nim trwały w latach sześćdziesiątych XX wieku, a pierwszy działający egzemplarz powstał w roku 1969. Jest to tzw. system czasu rzeczywistego, co znaczy, że natychmiast, w ściśle określonym czasie reaguje on na informacje pochodzące z czujników zamontowanych w pojeździe kosmicznym (dalmierzy radarowych, systemu nawigacji inercyjnej itp.)²⁵. Komputer ten sterował misjami Apollo 11–13. Nie można było nie wiedzieć o misji Apollo 13 (z 1970 roku) i o roli komputerów w amerykańskim programie kosmicznym NASA. Jednakże na podstawie analizy prac przedstawicieli nowego eksperymentalizmu można wywnioskować, że o tej roli nie słyszeli, celowo ją pominęli lub nie uświadamiali sobie pełni jej znaczenia.

Należy stwierdzić, że nieuwzględnienie roli komputera wraz ze stosowanym oprogramowaniem (oraz przetworników analogowo-cyfrowych) w badaniach eksperymentalnych jest poważnym przeoczeniem przedstawicieli nowego eksperymentalizmu. Hacking postuluje, aby filozofię nauki zaczynać od analizy rzeczywistej praktyki badawczej, a nie tylko skupiać się na analizie

²² Por. I. Hacking, *Experimentation...*, s. 164.

²³ Por. tamże, s. 162.

²⁴ Szczegółowy opis działania komputera AGC znaleźć można w: P. Gawrysiak, dz. cyt., s. 153–162.

²⁵ Rola komputera AGC jest podobna do roli komputera będącego częścią układu eksperymentalnego opisanego w rozdziale 2.

jej wytworów. Niestety, sam nie zauważa faktu, że rzeczywista praktyka badawcza ostatnich dwudziestu lat XX wieku oraz początku wieku XXI została zdominowana przez systemy komputerowego wspomagania badań doświadczalnych. Ze względu na to ważne przeoczenie nowy eksperymentalizm nie jest koncepcją metodologiczną adekwatnie rekonstruuującą współczesną praktykę eksperymentalną, która to w istotnej mierze jest wspomagana komputerowo. Na poparcie tej tezy podam kilka przykładów wyników uzyskanych przez przedstawicieli nowego eksperymentalizmu, których nie można bezproblemalnie odnieść do współczesnych eksperymentów wspomaganých komputerowo przeprowadzanych za pomocą nawet tak prostych układów eksperymentalnych jak te, które zostały opisane w rozdziale 2.

Nowi eksperymentalisci zakładają dualizm kultur: teoretycznej i eksperymentalnej. Dostrzegają wprawdzie przykłady owocnej między nimi współpracy, nie dostrzegają jednak form pośrednich pomiędzy tymi podstawowymi kategoriami poznawczymi. Sobczyńska wymienia ich kilka: eksperymentowanie na teoriach (tj. symulacje komputerowe, omówione szerzej w paragrafie 3.2.1), eksperyment obserwacyjny lub eksperyment myślowy²⁶. Autorka uzasadnia potrzebę poszerzenia i uzupełnienia rozważań metodologicznych nieograniczających się tylko do dwóch obszarów filozoficznych badań – analiz teorii i eksperymentu. Czarnocka uzasadnia ponadto, że zacierają się wyraźne różnice pomiędzy wiedzą doświadczalną a wiedzą teoretyczną, zaś ich ważną częścią wspólną są modele matematyczne²⁷. Dla przedstawicieli nowego eksperymentalizmu istnieją jednak tylko te „dwie podstawowe opcje w filozofii nauki, skupione bądź wokół zagadnienia teorii, bądź wokół zagadnienia eksperymentu”²⁸. Tym samym tak ważne dla współczesnej nauki kwestie związane z symulacjami komputerowymi (eksperymentami przeprowadzanymi na modelach matematycznych) nie mogą być analizowane z perspektywy tego kierunku metodologicznego.

Oprócz argumentu z interweniowania nowi eksperymentalisci podają kilka innych dotyczących realizmu w odniesieniu do przedmiotów praktyki eksperymentalnej. Są to m.in.: argument z niepewności teorii, argument z rozszerzania w dzisiejszej nauce pojęcia obserwowalności oraz argumenty z demaskowania artefaktów. Wśród tych ostatnich Hacking w odniesieniu do mikroskopów wymienia trzy podstawowe sposoby odróżniania artefaktów od obrazów rzeczywistych: na podstawie sieci, metodę ślepej próby oraz koincydencji.

Nowi eksperymentalisci twierdzą, że teorie naukowe bywają hipotetyczne i wybiórcze oraz że uwzględniają zazwyczaj wybrany aspekt złożonych

²⁶ Por. D. Sobczyńska, *Aparatura chemiczna...*, s. 178–179.

²⁷ Por. M. Czarnocka, *Doświadczenie w nauce...*, s. 175.

²⁸ Tamże, s. 178.

zjawisk. Czy jednak nie można tego samego powiedzieć o eksperymentach? Zestawiając nawet tak prosty układ eksperymentalny, jak ten omówiony w rozdziale 2, dokonujemy wyboru konkretnych urządzeń pomiarowych, określonych przetworników analogowo-cyfrowych, interfejsów. Uruchamiamy komputer z określonym oprogramowaniem i używamy go nie tylko do rejestracji danych empirycznych, ale także do sterowania przebiegiem eksperymentu przez przetworniki cyfrowo-analogowe i urządzenia wykonawcze. Każde z tych urządzeń charakteryzuje się konkretnymi parametrami umożliwiającymi pracę w określonym, skończonym zakresie. Stąd prosty wniosek, że każdy układ eksperymentalny wspomagany komputerowo jest wybiórczy w tym sensie, iż może badać tylko wybrany aspekt złożonych zjawisk. Innymi słowy, nie tylko teorie naukowe, ale także badania eksperymentalne są niepewne (co wykażą też późniejsze analizy dotyczące trudności demaskowania artefaktów w układach eksperymentalnych wspomaganych komputerowo) i wybiórcze.

Fizycy za obserwowalne uznają obiekty nie tylko widoczne gołym okiem, ale również te, które widzimy dzięki całemu szeregowi technik pośrednich. Według Hackinga współczesna technologia rozszerza na różne sposoby drogi poznania poprzez obserwację, rozszerza granice ludzkiej świadomości i wiedzy. Teza ta nie budzi zastrzeżeń, jednakże dziwi, że nowi eksperymentalisci nie wspominają o najważniejszym urządzeniu badawczym skutecznie poszerzającym możliwości poznawcze podmiotu eksperymentującego (o czym była mowa w paragrafie 3.2.1). Współcześnie bowiem to właśnie komputery przyczyniają się do rozszerzenia pojęcia obserwowalności. Podobnie jak teleskopy i mikroskopy, komputery odsłaniają przed naukowcami nowe horyzonty, umożliwiające np. modelowanie różnych zjawisk, od zderzeń galaktyk poczynając, a na reakcjach chemicznych kończąc. To właśnie dzięki komputerom wspomagającym badania eksperymentalne można widzieć znacznie więcej, zaś w wielu wypadkach zastosowanie komputerowego wspomagania umożliwia w ogóle współczesne badania eksperymentalne. Bardziej szczegółowo omówię to zagadnienie w podrozdziale 4.2.

Hacking i Franklin analizują kwestie powstawania artefaktów w aparaturze badawczej. Jak wiadomo, każde urządzenie eksperymentalne wytwarza szumy będące wynikiem pracy aparatury eksperymentalnej bez badanego obiektu. Zdaniem nowych eksperymentalistów nie ma potrzeby wyolbrzymiania negatywnego znaczenia artefaktów, gdyż istnieją sposoby demaskowania takich niepożądanых efektów. Cała analiza tego zagadnienia przeprowadzona przez Hackinga opiera się tylko i wyłącznie na jednym przykładzie – różnego rodzaju mikroskopów. Nie jest to wszakże jedyne narzędzie badawcze, zatem warto zobaczyć, czy postulowane przez tego filozofa metody demaskowania artefaktów można zastosować także do powszechnie stosowanych współcześnie układów eksperymentalnych wspomaganych komputerowo.

Skalowane siateczki, które pomniejsza się mikrofotograficznie, a następnie powiększa pod mikroskopem, są niewątpliwie metodą specyficzną dla urządzeń służących do powiększania obrazu w odpowiedniej skali. Jeśli jednak dokonujemy pomiarów temperatury, ciśnienia, poziomu, prędkości i przepływu cieczy, drgań i wstrząsów, hałasu, składu chemicznego, wilgotności powietrza i ciał stałych (szczegółowo omówione w rozdziale 2.1), to z pewnością zastosowanie metody demaskowania artefaktów na podstawie sieci wydaje się problematyczne, a nawet niemożliwe. Ponadto w pomiarze i ewentualnej generacji artefaktów nie uczestniczy tylko analogowe urządzenie pomiarowe, ale cały przyrząd pomiarowy (składający się z urządzenia pomiarowego, przetwornika analogowo-cyfrowego oraz interfejsu), w ramach którego sygnał analogowy z urządzenia pomiarowego przetwarzany jest na jego cyfrowy odpowiednik. Proste pomniejszanie i powiększanie skalowanej siatki nie wystarczy, aby sprawdzić, czy taki skomplikowany analogowo-cyfrowy przyrząd pomiarowy nie generuje artefaktów.

Z podobnym problemem zetkniemy się, analizując metodę ślepej próby. Polega ona na tym, że sprawdzamy działanie przyrządu pomiarowego bez badanej próbki. Gdy otrzymamy wówczas dowolny niezerowy wynik, możemy uznać, że układ eksperymentalny generuje jakieś artefakty. Być może sprawdza się to w mikroskopii i klasycznej spektroskopii, ale w układach eksperymentalnych wspomaganych komputerowo zastosowanie tej metody jest problematyczne. Częścią takiego współczesnego układu eksperymentalnego jest bowiem zawsze przetwornik analogowo-cyfrowy, którego działanie obarczone jest przynajmniej kilkunastoma błędami (co zostało szczegółowo opisane w podrozdziale 2.2). Błędy te niestety najczęściej nakładają się na siebie i ich odseparowanie nie jest proste, gdyż kompensacja jednego błędu może prowadzić do zwiększenia innego. Ponadto każdy taki przetwornik charakteryzuje się minimalnym napięciem przetwarzania, co wpływa na ograniczone możliwości testowania przyrządu pomiarowego bez badanego obiektu. W wypadku takiego testu zawsze na wyjściu przetwornika analogowo-cyfrowego otrzymamy zakodowaną cyfrowo informację o braku sygnału wejściowego, a taki może istnieć, choć jest poniżej minimalnego napięcia przetwarzania. Artefakt może powstawać w urządzeniu pomiarowym (podłączonym do wejścia przetwornika analogowo-cyfrowego) i być tak mały, że jeśli testować będziemy ślepa próbę, zawsze da zero. Jednakże nałożony na sygnał próbki może w efekcie wносить wkład do błędnych wyników pomiarów. Nic o tym artefakcie nie będziemy wiedzieć, a co za tym idzie – nie będziemy mogli go wyeliminować. Widać więc, że trudno jest stosować metodę ślepej próby, gdy używamy współczesnych skomputeryzowanych układów eksperymentalnych.

Większe nadzieje na demaskację artefaktów aparaturowych można mieć na podstawie metody koincydencji. Hacking twierdzi, że jeśli jakiś preparat

oglądamy przy użyciu różnych mikroskopów, a obraz wygląda tak samo, może to stanowić potwierdzenie jego rzetelności (argument obserwacyjny). Wzmocnieniem tego argumentu, w opinii autora *Representing and Intervening*, jest fakt, iż różne typy mikroskopów działają na podstawie zupełnie różnych praw fizycznych i byłoby dziwne, gdyby różne teorie dotyczące funkcjonowania różnych typów mikroskopów były w ten sam sposób fałszywe, aby prowadzić do tego samego artefaktu.

Dyskutowany argument może odwoływać się także do koincydencji pomiędzy wynikami obserwacji a przewidywaniami teorii. Giza nazywa go argumentem obserwacyjno-teoretycznym i dodaje, że jego waga jest tym większa, im bardziej prawa opisujące budowę i działanie przyrządów obserwacyjnych są niezależne od ogólnych teorii na temat obserwowanych obiektów²⁹. Argument z koincydencji obserwacyjno-teoretycznej ma mniejszą moc niż argument obserwacyjny, ze względu na niepewność przewidywań teorii, które są mniej potwierdzone niż proste zasady opisujące proces obserwacji³⁰.

Autor *Filozoficznych i metodologicznych aspektów komputerowych systemów odkryć naukowych* proponuje trzeci argument, odwołujący się do koincydencji pomiędzy wynikami badań w dziedzinie fizyki teoretycznej cząstek elementarnych a wynikami uzyskanymi niezależnie przez systemy odkryć maszynowych – program GELL-MANN (argument o koincydencji interteoretycznej)³¹. „Jeśli dwa niezależne od siebie rozumowania przeprowadzone na różnych poziomach teorii prowadzą do identycznego rezultatu dotyczącego mikrostruktury oraz własności elementów tworzących ją (...), to owa koincydencja stanowi znacznie mocniejszy argument na rzecz realności kwarków niż te dwa rozumowania wzięte oddzielnie”³².

Argument z koincydencji sformułowany przez Hackinga wymagał, aby jakieś obiekty zostały zaobserwowane przez wiele przyrządów, których zasady działania są różne i niezależne od siebie oraz niezależne od teorii opisujących obserwowane obiekty. Argument z koincydencji teoretyczno-obserwacyjnej opiera się na niezależności obserwacji mikroskopowej i teorii odnoszących się do cech i zachowania obiektów obserwowanych. Trzeci argument, zaproponowany przez Gizę, nie odwołuje się w ogóle do obserwacji, ale wymaga istnienia przynajmniej dwóch niezależnych od siebie toków rozumowania prowadzących do tej samej hipotezy (np. bazującego na ogólnej teorii fizycznej i kryteriach stosowanych przez maszynowych odkrywców – jak: prostota, unikatowość modelu, zgodność z danymi)³³.

²⁹ Por. P. Giza, *Filozoficzne i metodologiczne aspekty...*, s. 169–171.

³⁰ Por. tamże, s. 172.

³¹ Por. tamże, s. 172–173.

³² Tamże, s. 191.

³³ Por. tamże, s. 190–191.

Argument Hackinga z koincydencji odnosi się do technik mikroskopowych. Nie jest zatem uniwersalny. Współcześnie bowiem, w większości nauk empirycznych, obiekty widzimy nie tylko za pomocą mikroskopu, ale głównie za pomocą systemów komputerowych. Warto zatem spróbować tak przeformułować argument z koincydencji, aby mógł odnosić się także do współczesnej pracy naukowej, tj. patrzenia za pomocą komputera.

W kontekście układów eksperymentalnych wspomaganych komputerowo należałoby szukać koincydencji pomiędzy badaniami empirycznymi prowadzonymi bez użycia komputera a takimi, w ramach których komputer jest częścią układu eksperymentalnego. To odnosiłoby się do procesu uzyskiwania danych empirycznych, tj. do pierwszych dwóch funkcji komputera w naukach empirycznych (wymienionych we wprowadzeniu do rozdziału 2). Druga koincydencja musiałaby się odnosić do analizy oraz obróbki otrzymanych danych empirycznych, tj. do pozostałych zadań komputera (wymienionych we wprowadzeniu do rozdziału 2). Jeśli udałoby się przeprowadzić dany eksperyment analogowo i dokonać analitycznej obróbki danych, a jednocześnie otrzymaliby się takie same wyniki jak w przypadku eksperymentu wspomaganego komputerowo z numeryczną analizą danych empirycznych, niewątpliwie wzmacniałoby to wagę uzyskanych wyników. Mielibyśmy tu zatem dwa kolejne argumenty z koincydencji: analogowo-cyfrowej i analityczno-numerycznej. Obawiam się jednak, że w znacznej większości przypadków tego typu badania porównawcze nie są możliwe do przeprowadzenia. Trudno bowiem wyobrazić sobie współczesne nieskomputeryzowane badania prowadzone w ramach fizyki cząstek elementarnych (analogiczne do tych prowadzonych w CERN) czy na przykład analityczne obliczenia dynamiki obserwowalnego Wszechświata obejmujące wyznaczenie jedynie trajektorii 150 miliardów galaktyk. Już samo analityczne uzasadnienie stabilności Układu Słonecznego nie jest możliwe³⁴, a co dopiero modelowanie dynamiki Wszechświata.

Widać zatem, że teoretycznie możliwe argumenty z koincydencji analogowo-cyfrowej i analityczno-numerycznej w praktyce są niestety niestosowalne. Problemu demaskowania artefaktów w układach eksperymentalnych wspomaganych cyfrowo nie da się zatem rozwiązać przez metody zaproponowane

³⁴ W artykule *Status eksperymentatora...* szczegółowo rozważałem problem analitycznego i numerycznego całkowania newtonowskich równań ruchu w ramach szczególnej teorii zaburzeń. Prace matematyków wskazały na trudności dotyczące analitycznego uzasadnienia stabilności Układu Słonecznego. Niekonkluzywność metod analitycznych służących do uzasadniania tej stabilności skłoniła naukowców do szukania innych rozwiązań tego zagadnienia. Dzięki wzrostowi szybkości obliczeniowej komputerów stało się możliwe powstanie nowego typu uzasadniania – uzasadniania numerycznego, dzięki któremu udało się wykazać, że orbity czterech wielkich planet Układu Słonecznego są stabilne, a orbity Plutona, Ziemi i Marsa są chaotyczne, tzn. cechują się dużą wrażliwością na warunki początkowe. Por. S. Leciejewski, *Status eksperymentatora...*, s. 176–183.

przez Hackinga (na podstawie sieci, na podstawie koincydencji, metoda ślepej próby) ani nawet przez zaproponowane wyżej ich modyfikacje. Nie można więc, jak chcieliby przedstawiciele nowego eksperymentalizmu, nad problemem negatywnego znaczenia artefaktów we współczesnej nauce przejść obojętnie, twierdząc, że istnieją niezawodne metody ich demaskowania³⁵.

4.2. Komputer jako narzędzie umożliwiające współczesne badania eksperymentalne

Do połowy XX wieku w fizyce, astronomii i chemii można było korzystać w pełni z wysoce rozwiniętych formalnych metod matematycznych (równań różniczkowych i całkowych, metod wariacyjnych, analizy fourierowskiej itp.). Większość najważniejszych wyników teoretycznych w naukach ścisłych (teoria względności, mechanika kwantowa) otrzymano czysto analitycznymi metodami bez pomocy komputera. Jednakże w drugiej połowie XX wieku sytuacja zaczęła się zmieniać, gdyż rola komputerów w naukach empirycznych była coraz bardziej znacząca. To bowiem, co dla ludzi jest żmudną, monotonną i czasochłonną pracą, komputery najczęściej wykonują szybko i bezbłędnie.

„W tej i nie tylko w tej dziedzinie nadal obowiązuje stara zasada głosząca, że to, co jest trudne dla człowieka, jest łatwe dla komputera – i odwrotnie. Systemy komputerowe, jak GELL-MANN, są w stanie analizować ogromne ilości informacji, wykonując skomplikowane obliczenia czy operacje na strukturach symbolicznych w ciągu sekund, podczas gdy ludzie potrzebowaliby miesięcy, a nawet lat na wykonanie tych samych zadań i prawdopodobnie po prostu by zrezygnowali”³⁶. To, że pojawiły się programy typu GELL-MANN (przywołane w podrozdziale 4.1) umożliwiające przeprowadzanie rozumowań prowadzących do sformułowania modelu struktury kwarkowej na poziomie praw fenomenologicznych, jest oczywistą konsekwencją istnienia komputerów

³⁵ Szczegółową analizę błędów doświadczalnych znaleźć można w: M. Czarnocka, *Doświadczenie w nauce...*, s. 133–155. Autorka podaje typologię błędów powszechną w metodycie nauki, dzieląc błędy na: grube, systematyczne i przypadkowe. Twierdzi, że oparte na twierdzeniach statystyki matematycznej metody statystyczne wykrywania błędów grubych nie są dostatecznie wypracowane. Przekonuje, że statystyczne metody analizy wariacyjnej wykrywania błędów systematycznych są obecnie słabo rozbudowane i w związku z tym rzadko stosowane. Uzasadnia, że całkowita niemożność uchwycenia przyczyn błędów przypadkowych oraz niemożliwość ich eliminacji świadczy o istnieniu nieprzekraczalnej granicy poznawczej. Tak więc argumentacja Czarnockiej pozwala wzmocnić tezę, że w nauce nie istnieją niezawodne metody demaskowania artefaktów. Niezależnie od tego, czy metod ich demaskowania (na podstawie sieci, na podstawie koincydencji, metoda ślepej próby) użyć do demaskowania błędów grubych, systematycznych czy przypadkowych, nie uzyskamy jednoznacznych wyników. Wiele artefaktów pozostanie nam nieznanymi.

³⁶ P. Giza, *Filozoficzne i metodologiczne aspekty...*, s. 190.

o odpowiednich parametrach, na których uruchamiane są systemy odkryć naukowych. Naukowcy – jak wspomniano wyżej – nie byłiby w stanie przeprowadzać tego typu rozumowań bazujących jedynie na prawach fenomenologicznych opisujących wielkości empiryczne i zależności przyczynowe.

Już znacznie wcześniej, bo w latach czterdziestych i pięćdziesiątych XX wieku fizycy zajmujący się fizyką jądrową musieli się zmagać z dużą ilością żmudnych obliczeń. Było to potrzebne podczas projektowania bomby jądrowej i termojądrowej. Naukowcy ci wnikali w świat, którego nikt nie znał z bezpośredniego doświadczenia. Jedynym sposobem wglądu były symulacje komputerowe wykorzystujące dostępną wiedzę teoretyczną. Szybko jednak okazało się, że stopień złożoności obliczeniowej w przypadku bomby wodorowej jest tak wielki, iż nie mógł sobie z nim poradzić nawet ENIAC. To właśnie brak odpowiednich mocy obliczeniowych spowodował, że pierwszy próbny wybuch termojądrowy nastąpił dopiero w 1952 roku. Pierwszy realistyczny sposób konstrukcji bomby wodorowej zaproponował Stanisław Ulam, jeden z pionierów metod komputerowych symulacji matematycznych³⁷. To on zdołał na podstawie uproszczonych obliczeń wykazać, że początkowy projekt nie doprowadzi do eksplozji. Wyniki Ulama doprowadziły do modyfikacji koncepcji z 1951 roku. Do tego też czasu laboratorium w Los Alamos pozyskało nowy, potężniejszy komputer MANIAC³⁸, który umożliwił potwierdzenie założeń Ulama i którego odpowiednia moc obliczeniowa pozwoliła na szybkie powstanie i przetestowanie bomby termojądrowej.

Współcześnie jednak komputera nie wykorzystuje się tylko i wyłącznie do przeprowadzania szybkich obliczeń arytmetycznych związanych z symulacjami komputerowymi (opisanymi szerzej w paragrafie 3.2.1). Bardzo często pełni on także inne role w naukach empirycznych – jest przecież powszechnie wykorzystywany do akwizycji danych empirycznych z przyrządów pomiarowych oraz precyzyjnego sterowania przebiegiem eksperymentów (taki układ eksperymentalny został szczegółowo opisany w rozdziale 2). Komputer może także być urządzeniem gromadzącym dane empiryczne i porównującym te dane z ustaleniami teoretycznymi. Czy zatem takie współczesne cyfrowe archiwizowanie i przetwarzanie danych jest lepsze od starszej wersji analogowej? Rozpatrzmy to na prostym przykładzie.

Typowym urządzeniem analogowym jest mikrofon, który w sposób mechaniczny odwzorowuje, czyli przetwarza, na analogony falę dźwiękową.

³⁷ Por. I. Białynicki-Birula, I. Białynicka-Birula, *Modelowanie rzeczywistości...*, s. 17.

³⁸ MANIAC był komputerem opartym na architekturze von Neumanna, zbudowanym w Los Alamos Scientific Laboratory na przełomie lat czterdziestych i pięćdziesiątych, zaś uruchomionym w marcu 1952 roku. Komputer ten posiadał pamięć operacyjną 600 słów, a taktowany był zegarem 11 kHz. Zbudowano go z 2400 lamp elektronowych. Był to najpotężniejszy komputer tamtych czasów, a głównym sposobem jego wykorzystania była pomoc przy projektowaniu bomby wodorowej.

Odształcenia membrany – na zasadzie analogowej – są odzwierciedlane, pod względem ich wielkości i częstotliwości, przez odpowiednie cechy prądu. Dalej następuje przetwarzanie analogowych sygnałów ciągłych na dyskretne – cyfrowe. Polega to na tym, że wynik pomiaru danej wielkości fizycznej, np. częstotliwości fali dźwiękowej, zostaje zapisany w postaci sekwencji cyfr. Wielka doniosłość wynalazku, jakim jest cyfrowy kod binarny, polega na tym, że daje on maksymalne możliwości dokładnego fizycznego zapisu za pomocą alfabetu składającego się tylko z dwóch symboli (0, 1), które są przekładalne na określoną postać fizyczną (np. 1 – impuls elektryczny, 0 – jego brak). Ten rodzaj kodu jest na tyle uniwersalny, że można w nim wyrażać różne wielkości fizyczne, symbole językowe (np. w kodzie ASCII) itd. Jest on ponadto bardzo odporny na zakłócenia. Jeśli na przykład spadnie napięcie prądu, zmienia się diametralnie sens sygnału analogowego (reprezentuje on już wtedy zupełnie inną liczbę), nie zmienia się zaś sens sygnału cyfrowego (nadal jest to 1, gdyż liczy się tylko to, że sygnał jest, a jego parametry są umowne). To właśnie stanowi dużą przewagę urządzeń cyfrowych nad analogowymi pod względem dokładności i niezawodności przetwarzania.

Co jednak zrobić, gdy dana wielkość fizyczna określona jest przez liczbę niewymierną (np. π)? Jakaś wielkość analogowa mogłaby ją odwzorować w sposób adekwatny, co sprawia, że zapis analogowy nie zgubi niczego z pierwotnej wielkości. Tymczasem zapis cyfrowy wymaga ucięcia danej liczby ileś miejsc po przecinku i ignorowania całej nieskończonej reszty, co jawnie pomniejsza dokładność zapisu cyfrowego. Warto jednak zauważyć, że te ubytki w większości przypadków są praktycznie nieznaczące, podczas gdy deformacje sygnałów analogowych miewają znaczący rząd wielkości, który wpływa na odbiór sygnałów (aby się o tym przekonać, wystarczy tego samego nagrania posłuchać z płyty cyfrowej CD i analogowej płyty winylowej). Tak więc metodzie analogowej trzeba by przypisać przewagę w dokładności w jakimś idealnym świecie, gdzie percepcja jest doskonała i nie ma przypadkowych zakłóceń, natomiast metoda cyfrowa ma niewątpliwą przewagę w świecie realnym. Jest ona – jak wiadomo – powszechnie stosowana w większości badań eksperymentalnych prowadzonych w XXI wieku.

Najłatwiej rolę komputera, jako urządzenia umożliwiającego współczesne badania eksperymentalne, prześledzić można na przykładzie największego laboratorium z zakresu fizyki cząstek elementarnych, jakim jest CERN, oraz najnowszych prac badawczych tam prowadzonych. W dniu 4 lipca 2012 roku na seminarium w CERN w Genewie przedstawiono wyniki poszukiwań bozonu Higgsa w eksperymentach przeprowadzanych na akceleratorze LHC³⁹.

³⁹ LHC jest akceleratorem, w którym zderzają się przeciwbieżne wiązki cząstek (przyspieszeniu poddawane są hadrony – protony i jony). Każda wiązka protonów biegnąca wokół LHC będzie docelowo miała energię 7 TeV, więc podczas zderzenia uzyska się łączną energię

Zaprezentowane wyniki oparte są na danych zebranych w latach 2011–2012 (do 18 czerwca 2012 roku). W eksperymentach CMS (ang. *Compact Muon Solenoid*)⁴⁰ i ATLAS (ang. *A Toroidal LHC Apparatus*)⁴¹ w analizie przypadków zderzeń proton–proton, w których pojawiają się dwa fotony lub cztery leptony, zaobserwowano znaczący sygnał, który można interpretować jako produkcję i rozpad cząstki o masie około 125 GeV (CMS) lub około 126 GeV (ATLAS). Wyznaczone do tej pory własności tej cząstki wskazują, że może to być poszukiwany w wielu eksperymentach bozon Higgsa⁴².

W eksperymencie CMS zaobserwowano nadwyżkę przypadków kreacji cząstek o masie około 125 GeV. Dane CMS wykluczają istnienie bozonu Higgsa z modelu standardowego cząstek elementarnych w zakresach mas 110–122,5 GeV i 127–600 GeV. Mniejsze masy zostały już wykluczone przez zderzacz

14 TeV. Wiązki jonów ołowiu będą miały energię zderzenia 1150 TeV. Celem eksperymentów prowadzonych na LHC jest między innymi odpowiedź na pytanie, dlaczego niektóre cząstki są bardzo ciężkie, a inne nie mają masy w ogóle. Być może da ją tzw. mechanizm Higgsa (cała przestrzeń wypełniona jest tzw. polem Higgsa, przez oddziaływanie z którym cząstki uzyskują masy; cząstki, które silnie oddziałują z tym polem, są ciężkie; mechanizm pola Higgsa postuluje istnienie przynajmniej jednej nowej cząstki, zwanej bozonem Higgsa). Wykrycie bozonu Higgsa jest jednym z ważniejszych oczekiwań eksperymentów z LHC. Innym celem jest odkrycie najlżejszych cząstek supersymetrycznych (byłoby to potwierdzeniem supersymetrii – teorii unifikującej wszystkie cztery oddziaływania), będących przypuszczalnie składnikami ciemnej materii. LHC ma pomóc także w badaniu nierównej ilości materii i antimaterii we Wszechświecie oraz plazmy kwarkowo-gluonowej (stanu materii uzyskiwanej w LHC, gdy Wszechświat liczył sobie 10^{-25} s, a jego temperatura wynosiła 10^{17} °C). Por. D. Lincoln, *Kwantowa granica. LHC – Wielki Zderzacz Hadronów*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2010, s. 50–105.

⁴⁰ Pierwszy koncepcyjny projekt eksperymentu CMS powstał w roku 1992. Budowa gigantycznego detektora (średnica 15 m, długość prawie 29 m, waga 14 000 t) pochłonęła szesnaście lat starań jednej z największych grup badawczych w historii świata: 3275 fizyków (w tym 1535 studentów) oraz 790 inżynierów i techników ze 179 instytucji i laboratoriów badawczych, z 41 krajów na całym świecie. CMS jest detektorem przeznaczonym do celów ogólnych. Jego cele są takie same jak eksperymentu ATLAS (opisanego w następnym przypisie), ale ma on inne rozwiązania techniczne i budowę. Zbudowany został wokół ogromnego nadprzewodzącego solenoidu. Ma kształt cylindrycznej cewki z nadprzewodzącego kabla, która wytwarza pole magnetyczne o natężeniu 4 T (około 100 000 razy większe od pola magnetycznego Ziemi).

⁴¹ ATLAS jest detektorem przeznaczonym do ogólnych celów, zbudowanym w ten sposób, aby badać zarówno bozony Higgsa, supersymetrię, jak i zagadnienia związane z dodatkowymi wymiarami. Główną częścią tego detektora jest ogromny układ magnesów w kształcie obwarzanka. Zawiera on siedem nadprzewodzących cewek magnetycznych, każda o długości 25 m, ułożonych na kształt cylindra wokół rury wiązki znajdującej się w środku detektora. ATLAS jest największym detektorem rejestrującym zderzenia, jaki kiedykolwiek został zbudowany (ma 45 m długości, 25 m wysokości i 25 m szerokości, a waży 7 000 t).

⁴² Wyniki te opublikowano w serii trzech obszernych artykułów: *Combined search for the Standard Model Higgs boson using up to 4.9 fb^{-1} of pp collision data at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector at the LHC*, „Physics Letters B” 2012, no. 710, s. 49–66; *Observation of a new particle...; Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC*, „Physics Letters B” 2012, no. 716, s. 30–61.

LEP (ang. *Large Electron-Positron Collider*) działający uprzednio w CERN⁴³. Po uwzględnieniu statystycznych i systematycznych błędów⁴⁴, wyniki uzyskane w różnych kanałach poszukiwań są zgodne z oczekiwaniami dla bozonu Higgsa w ramach modelu standardowego⁴⁵. Dopiero zebranie większej ilości danych pozwoli ustalić, czy ta nowa cząstka ma wszystkie własności standardowego bozonu Higgsa, czy też niektóre z jej własności nie pasują do standardowego modelu cząstek elementarnych, co oznaczałoby konieczność jego rozszerzenia⁴⁶.

Obserwacja nowej cząstki o masie około 125 GeV jest w granicach obecnej dokładności statystycznej zgodna z hipotezą, że cząstka ta jest bozonem Higgsa w ramach modelu standardowego. Dopiero zebranie większej ilości danych pozwoli zmierzyć własności tej cząstki, a w następnej kolejności również jej spin oraz parzystość. To pozwoliłoby ustalić, czy cząstka, którą widzimy, jest faktycznie bozonem Higgsa z modelu standardowego, czy też przejawem jakiegoś nieznanego zjawiska będącego poza tym modelem⁴⁷.

Do końca roku 2012 w eksperymencie CMS spodziewane jest ponad trzykrotne powiększenie zebranej próbki danych i dokładniejsze zbadanie natury obserwowanej nowej cząstki. Jeśli jest ona rzeczywiście bozonem Higgsa z modelu standardowego, jej własności i wynikające z nich konsekwencje dla tegoż modelu będą poddane szczegółowym badaniom⁴⁸. Jeśli zaś nie jest standardowym bozonem Higgsa, CMS będzie badał wynikające z tego konsekwencje, co może oznaczać istnienie kolejnych nowych cząstek możliwych do zaobserwowania w LHC. Niezależnie od tego kontynuowane będą poszukiwania nowych cząstek lub sił, które mogą być zaobserwowane w danych zebranych podczas pracy akceleratora LHC z większą energią i intensywnością wiązki.

Warto zapytać, czy tego typu przełomowe odkrycia empiryczne w fizyce cząstek elementarnych mogłyby mieć miejsce bez systemów komputerowego wspomaganie badań eksperymentalnych? Odpowiedź na to pytanie wydaje się oczywista: bez wspomaganie komputerowego większości współczesnych eksperymentów nie można przeprowadzić. Jednakże pojawia się kolejne pytanie, dlaczego jest to niemożliwe. Dzieje się tak, ponieważ w tego typu

⁴³ Por. S. Dittmaier, M. Schumacher, *The Higgs boson in the Standard Model – From LEP to LHC: Expectations, Searches, and Discovery of a Candidate*, „Progress in Particle and Nuclear Physics” 2013, no. 70, s. 1–54.

⁴⁴ Por. M. Czarnocka, *Doświadczenie w nauce...*, s. 139–149.

⁴⁵ Por. M. Nowina Konopka, *Bozon Higgsa zarejestrowany w eksperymentach ATLAS i CMS*, „Postępy Fizyki” 2012, t. 63, z. 3, s. 98–99.

⁴⁶ Por. B. Grządkowski, *Cząstka Higgsa istnieje?*, „Postępy Fizyki” 2012, t. 63, z. 3, s. 103–104.

⁴⁷ Por. R.D. Harrington, *Observation of an excess of events in the Higgs boson search in ATLAS*, „Nuclear Physics B” 2013, no. 234, s. 15–20.

⁴⁸ Tego typu badania prowadzone są cały czas, czego efektem jest np. artykuł: P.C. Bhat, *Observation of a Higgs-like Boson in CMS at the LHC*, „Nuclear Physics B” 2013, no. 234, s. 7–14.

eksperymentach mamy do czynienia ze zbyt dużą ilością danych napływających jednocześnie ze zbyt wielu urządzeń pomiarowych. Najłatwiej prześledzić to na eksplorowanym już przykładzie LHC.

W LHC zainstalowanych jest sześć detektorów: ALICE⁴⁹, ATLAS, CMS, LHCb⁵⁰, LHCf⁵¹ oraz TOTEM⁵². ALICE, ATLAS, CMS i LHCb zainstalowane są w czterech wielkich podziemnych grotach zbudowanych wokół czterech punktów zderzeń wiązek. TOTEM został zainstalowany w pobliżu punktu zderzeń CMS, a LHCf w pobliżu detektora ATLAS. Zasadniczym celem dużych detektorów w LHC jest identyfikacja cząstek produkowanych w zderzeniach, pomiar ich położenia w przestrzeni, ładunku, prędkości, masy i energii. Aby to osiągnąć, detektory mają wiele warstw lub poddetektorów, w których każdy spełnia swoją szczególną rolę w rekonstrukcji zderzenia.

Istnieją dwa ważne rodzaje poddetektorów: detektory śladowe oraz kalorymetry. Detektory śladowe pokazują tor cząstki naładowanej. W większości nowoczesnych detektorów tego typu tory cząstek nie są bezpośrednio widoczne. Zamiast śladów wytwarzane są elektryczne sygnały, które rejestruje się jako dane komputerowe. Następnie program komputerowy rekonstruuje kształt zarejestrowanego toru. Drugim rodzajem poddetektorów są kalorymetry. Są to urządzenia, które wyznaczają energię cząstek, zatrzymując je, a następnie mierząc wyzwoloną energię⁵³.

W LHC około 150 milionów czujników dostarcza dane eksperymentalne z częstością 40 milionów razy na sekundę. Po przefiltrowaniu (kasuje się przypadki standardowe, które są już znane) uzyskuje się około 100 interesujących zderzeń na sekundę. Szybkość przesyłania danych ze wszystkich eksper-

⁴⁹ ALICE jest detektorem przeznaczonym do badania zderzeń jonów ołowiu. Bada własności plazmy kwarkowo-gluonowej. Detektor ten ma 26 m długości, 16 m wysokości i 16 m szerokości, a waży 10 000 t.

⁵⁰ LHCb to detektor badający niewielką asymetrię pomiędzy materią a antymaterią, występującą w oddziaływaniach cząstek zawierających kwark b (piękny). Zamiast otaczać cały punkt zderzeń jednym detektorem, w eksperymencie LHCb zastosowano wiele poddetektorów, które wykrywają głównie cząstki lecące do przodu. Pierwszy poddetektor zbudowany jest wokół punktu zderzenia, następne umieszczone są jeden za drugim na przestrzeni około 20 m (detektor ma w sumie 21 m długości, 10 m wysokości i 13 m szerokości, a waży 5 600 t).

⁵¹ W eksperymencie LHCf badane są cząstki produkowane pod małymi kątami w stosunku do wiązki w zderzeniach proton-proton. Ma on sprawdzić modele stosowane do oceny pierwotnej energii ultrawysokoenergetycznych promieni kosmicznych. Są to dwa detektory o długości 30 cm, 10 cm wysokości i 10 cm szerokości. Każdy z nich waży 40 kg.

⁵² W eksperymencie TOTEM mierzone są efektywne rozmiary protonu. Stosuje się w nim detektory umieszczone w komorach połączonych z rurami wiązki w LHC. Osiem takich detektorów zostało umieszczonych parami w czterech miejscach, w pobliżu punktów zderzeń w detektorze CMS. Detektor ten w sumie ma 440 m długości, 5 m wysokości i 5 m szerokości, a waży 20 t.

⁵³ Ze szczegółami technicznymi dotyczącymi konstrukcji zderzacza LHC zapoznać się można w obszernym artykule: J. Kulka, *Techniczne aspekty zderzacza LHC*, „Postępy Fizyki” 2009, t. 60, z. 3, s. 109–118.

mentów wynosi około 700 MB/s (tj. około 15 000 000 GB na rok). Te ogromne ilości danych są dostępne dla tysięcy naukowców na całym świecie i przez nich analizowane. Zadaniem Sieci Komputerowej LHC (*LHC Computing Grid*) jest zbieranie i archiwizacja danych oraz dostarczanie infrastruktury i oprogramowania do ich analizy dla tych fizyków, którzy będą wykorzystywać dane z LHC.

Warto dodać, że ilości danych empirycznych dostarczane z poszczególnych detektorów na sekundę są ogromne. Na przykład detektor ATLAS dostarcza 320 MB/s danych, CMS – 300 MB/s danych, LHCb – 50 MB/s danych, a ALICE 100 MB/s danych podczas zderzeń proton–proton i 1,25 GB/s danych podczas zderzeń ciężkich jonów. Tak wielkich ilości danych nie byłby w stanie odebrać i zmagazynować żaden inny system oprócz systemu komputerowego. Zatem bez wspomaganie komputerowego nie jest możliwe pobieranie danych empirycznych we współczesnych eksperymentach naukowych. Bez niego nie sposób także precyzyjnie sterować przebiegiem tego typu eksperymentów, co ponownie zilustruję na przykładzie LHC.

Cząstki krążą w akceleratorze wewnątrz rury próżniowej i są sterowane za pomocą urządzeń elektromagnetycznych: magnesy dipolowe utrzymują cząstki na ich orbitach, magnesy kwadrupolowe ogniskują wiązkę, a przyspieszające wnęki są rezonatorami elektromagnetycznymi, które przyspieszają cząstki i utrzymują stałą wartość energii, kompensując jej straty. Chodzi między innymi o to, aby system sterowania wiązką w LHC był na tyle precyzyjny i szybki, by możliwe było uzyskanie nominalnej liczby około 10 000 okrążeń na sekundę i 600 milionów zderzeń na sekundę.

Protony krążą w LHC wokół pierścienia w ściśle określonych pęczkach. Protony te mogą być przyspieszane jedynie wówczas, gdy pole elektromagnetyczne ma odpowiednią orientację w czasie przechodzenia cząstek przez przyspieszającą wnękę, co zdarza się w ściśle określonych momentach (maksymalnie nawet 11 245 razy na sekundę). Ponadto warto zdawać sobie sprawę z faktu zmagazynowania w wiązkach LHC ogromnej ilości energii (całkowita energia w każdej wiązce o maksymalnej energii jest równoważna energii pociągu wążącego 400 ton jadącego z prędkością 150 km/h). Wiązka musi być zatem bardzo precyzyjnie sterowana, gdyż jej niekontrolowana utrata grozi zniszczeniem wyposażenia akceleratora. Bezpieczne działanie LHC wymaga poprawnego działania kilku systemów: kolimatorów i absorbentów wiązki, systemu pochłaniania wiązki, systemu monitorowania wiązki, układów blokowania wiązek oraz systemu zabezpieczającego na wypadek samorzutnej utraty własności nadprzewodzących przez magnesy. Gdy wiązka staje się niestabilna, powinny wykryć to czujniki strat cząstek i w ciągu trzech obiegów układ magnesów powinien usunąć wiązkę z LHC. Wiązka zostaje wówczas skierowana specjalnym tunelem do bloku zatrzymującego, składającego się ze stosu płyt grafitowych o różnych gęstościach.

Tak precyzyjne sterowanie złożonym eksperymentem nie byłoby możliwe bez systemu komputerowego wspomaganie badań doświadczalnych. Bez niego nie byłoby także możliwe uzyskanie jakichkolwiek istotnych wyników badań eksperymentalnych, jakimi niewątpliwie są te, o których wspomniałem na początku niniejszego podrozdziału. Wstępne dane świadczące o odkryciu bozonu Higgsa były możliwe do zdobycia podczas długotrwałych badań eksperymentalnych prowadzonych właśnie przy użyciu LHC w CERN.

Pozyskanie tak ważnych wyników było możliwe dzięki temu, że w CERN istnieje odpowiednia aparatura badawcza (LHC), przeprowadza się tam bardzo skomplikowane eksperymenty fizyczne (opisane wyżej) oraz – co najważniejsze w kontekście problematyki podejmowanej w niniejszym rozdziale – stosuje się komputerowe systemy akwizycji, archiwizacji oraz analizy napływających z detektorów danych. Takim rozproszonym systemem analizy danych pochodzących z eksperymentów jest WLCG (ang. *Worldwide Large Hadron Collider Computing Grid*). Do osiągnięcia ważnych wyników, np. odkrycia bozonu Higgsa, nie wystarczają bowiem lokalne zasoby obliczeniowe centrum komputerowego CERN. Są one imponujące (10 000 węzłów, 65 000 procesorów, 62 PB⁵⁴ pamięci dyskowej), jednak stanowią tylko około 20% potrzebnej mocy obliczeniowej.

Zasoby centrum komputerowego CERN (tzw. Tier-0) służą jedynie do zapisu danych eksperymentalnych, podstawowej obróbki danych empirycznych (kasowania znanych przypadków standardowych) oraz ich dystrybucji do kolejnych poziomów rozległej sieci służącej do przechowywania i analizowania danych uzyskiwanych w LHC (tj. Tier-1 oraz Tier-2). Tier-1 to jedenaście centrów obliczeniowych w Europie i Stanach Zjednoczonych, które archiwizują dane z LHC, dokonują wstępnych obliczeń i analiz zgromadzonego materiału. Z kolei Tier-2 to około 140 mniejszych centrów obliczeniowych zlokalizowanych na całym świecie (w 34 krajach), które zajmują się przeprowadzaniem symulacji komputerowych opartych na danych empirycznych zgromadzonych w Tier-0 i Tier-1 oraz ostateczną analizą danych przeprowadzaną przez ponad 8000 fizyków. Dzięki takiej infrastrukturze naukowcy z całego świata zajmujący się badaniem fizyki cząstek elementarnych mają możliwość dostępu, niemalże w czasie rzeczywistym, do danych uzyskiwanych w LHC oraz ich analizy.

Uzyskanie wyników dotyczących odkrycia bozonu Higgsa wymagało użycia kilkunastu programów komputerowych⁵⁵, całej mocy obliczeniowej Tier-0, siedmiu centrów obliczeniowych Tier-1 i pięćdziesięciu centrów Tier 2⁵⁶. Przeanalizowano w sumie około 30 PB danych empirycznych, używając do tego mocy obliczeniowej 300 000 procesorów oraz zużywając 170 PB prze-

⁵⁴ 1 PB (petabajt), tj. 1024 TB (terabajta), tj. 1024×1024 GB (gigabajta), tj. około 1 000 000 GB.

⁵⁵ Por. *Observation of a new particle...*, s. 2.

⁵⁶ *Observation of a new boson...*, s. 31.

strzeni dyskowej. Dane te uzyskało i analizowało ponad 2800 naukowców ze 178 ośrodków naukowych⁵⁷.

Warto przypomnieć, że 1 PB danych empirycznych to 1 125 899 906 842 624 bajtów (1 bajt to 8 bitów). Aby uzyskać znaczące wyniki, należało przeanalizować 30 razy więcej danych pochodzących z LHC. Są to tak niewyobrażalnie olbrzymie ilości informacji, że bez użycia mocy obliczeniowej w przybliżeniu równej 300 000 komputerów nie sposób byłoby ich analizować. Można zatem stwierdzić, że LHC pracujący w CERN jest wielkim i złożonym układem eksperymentalnym, który nie mógłby funkcjonować bez wspomagania komputerowego. Bez użycia komputerów niemożliwe byłoby dojście do doniosłych poznawczo wyników uzyskanych w CERN w latach 2011–2012.

Wniosek z przedstawionych w niniejszym rozdziale rozważań jest następujący. Bez wspomagania komputerowego wielu doniosłych współczesnych eksperymentów naukowych nie można byłoby przeprowadzić, i to z dwóch powodów. Mamy do czynienia ze zbyt dużą ilością danych empirycznych napływających jednocześnie ze zbyt wielu urządzeń pomiarowych, a ponadto przeprowadzenie współczesnych badań eksperymentalnych związane jest z koniecznością użycia bardzo precyzyjnych systemów sterowania skomplikowanymi urządzeniami wykonawczymi. Tak więc, chcąc jednocześnie prowadzić poznawczo ważne badania eksperymentalne, nieodzowny jest komputer jako bardzo istotna część układu eksperymentalnego. Jego zadaniem jest precyzyjne sterowanie przebiegiem eksperymentu oraz szybkie pobieranie danych empirycznych z wielu urządzeń pomiarowych. Komputer umożliwia zatem współczesne badania eksperymentalne. Jest on także urządzeniem, dzięki któremu możemy mówić o zmianie stylu badań naukowych.

4.3. Komputerowy styl badań naukowych

Koncepcję stylów myślowych, jako jeden z pierwszych, rozwinął filozof, mikrobiolog i immunolog Ludwik Fleck. Styl myślowy w jego rozumieniu to przyjęty w określonym środowisku wzorzec postępowania badawczego, przeprowadzania obserwacji i eksperymentów oraz interpretacji danych doświadczenia; to także wzorzec myślenia i wartościowania. Styl myślowy to „ukierunkowane postrzeganie wraz z odpowiednią obróbką myślową i rzeczową tego, co postrzegane. Charakteryzują go wspólne cechy problemów, którymi kolektyw jest zainteresowany; sądów, które uważa za oczywiste; metod, których używa jako środków poznawczych”⁵⁸. Dla Flecka nie istnieją

⁵⁷ Por. *Observation of a new particle...*, s. 17–28.

⁵⁸ L. Fleck, *Powstanie i rozwój faktu naukowego: wprowadzenie do nauki o stylu myślowym i kolektywie myślowym*, Wydawnictwo Lubelskie, Lublin 1986, s. 131.

żadne zdania czysto sprawozdawcze, tj. opisy surowych faktów. Każde zdanie o faktach jest ich interpretacją w świetle przyjętego stylu myślowego, gdyż „fakt musi być wyrażony w stylu kolektywu myślowego”⁵⁹. Dzięki wspólnemu stylowi myślowemu badacze w danej dziedzinie dochodzą do zbieżnych wyników obserwacji. Ponadto z określonym stylem myślowym związane są odpowiednie problemy. To, co w świetle jednego stylu myślowego zasługuje na miano poważnego problemu, w świetle innego może uchodzić za zagadnienie pozorne lub co najwyżej błahe. Innymi słowy, styl myślowy jest dziełem uwarunkowań społecznych⁶⁰. Dopóki się nie zmieni, dopóty pewnych zjawisk nie można dostrzec, bowiem dany styl myślowy traktuje je jako nieistotne, przypadkowe i dlatego je odrzuca albo lekceważy⁶¹.

Związek z naukowym stylem myślenia jest dodatkowo wzmacniany przez używane w laboratoriach przyrządy, które zostały skonstruowane zgodnie z zasadami stylu. Styl ten wymusza także określone traktowanie badanych obiektów i niejako automatycznie skierowuje myślenie na własne tory⁶². Czy zatem osoby pracujące w CERN przy eksperymencie ATLAS i CMS mogły uzyskać inne wyniki? Jeśli – co wydaje się bardzo prawdopodobne – te dwie grupy badawcze należą do tego samego stylu myślowego, muszą zobaczyć niemalże dokładnie to samo, np. cząstkę elementarną interpretowaną jako bozon Higgsa o energii $126 \pm 0,4$ (ATLAS)⁶³ lub $125,3 \pm 0,4$ GeV (CMS)⁶⁴. Warto zaznaczyć, że w LHC eksperymenty ATLAS i CMS różnią się tylko urządzeniami pomiarowymi. Pozostałe elementy tego złożonego, skomputeryzowanego układu eksperymentalnego są takie same lub bardzo podobne, skonstruowane zgodnie z obowiązującym w tych grupach, wspólnym stylem myślowym⁶⁵. Trudno zatem się dziwić, że uzyskiwane wyniki są bardzo podobne, a w granicy błędów statystycznych ($\pm 0,4$) nawet się pokrywają⁶⁶.

W pierwszej połowie lat osiemdziesiątych XX wieku amerykański filozof Jay David Bolter w książce *Człowiek Turinga* postawił śmiałą tezę, że powszechne używanie komputerów musi spowodować zmiany naszego sposobu myślenia o sobie i o świecie, co w konsekwencji ma doprowadzić do nowego obrazu świata i człowieka. Doszedł do swej tezy poprzez analizy z zakresu

⁵⁹ Tamże, s. 133.

⁶⁰ Por. tamże, s. 94.

⁶¹ Por. A. Siemianowski, *Konwencjonalizm*, [w:] *Filozofia a nauka. Zarys encyklopedyczny*, Wydawnictwo PAN, Wrocław–Warszawa–Kraków–Gdańsk–Łódź 1987, s. 326–327.

⁶² Por. W. Sady, *O naturze badań naukowych*, <http://fleck.umcs.lublin.pl/teksty.sady.natura.pdf> (dostęp: 12.11.2012), s. 20.

⁶³ Por. *Observation of a new particle...*, s. 1.

⁶⁴ Por. *Observation of a new boson...*, s. 30.

⁶⁵ „Każde empiryczne odkrycie może więc być uważane za uzupełnienie, rozwinięcie lub transformację stylu myślowego”, L. Fleck, *Powstanie i rozwój...*, s. 124.

⁶⁶ „Można jeszcze zanotować, że im bardziej jakaś dziedzina wiedzy jest rozbudowana, im staje się bardziej rozwinięta, tym mniejsze stają się różnice przekonań”, tamże, s. 114.

historii filozofii. Pokazywał, że wielkie filozoficzne koncepcje świata i człowieka, zaczynając od Platona, przez Kartezjusza i Newtona, aż do XIX wieku, kształtowane były przez dominujące wtedy technologie. Te z nich, które w danym okresie były najbardziej inspirujące filozoficznie, nazwał „technologiami definiującymi”. Obecnie – według Boltera – taką technologią ma być komputer. „Technologia definiująca definiuje lub redefiniuje rolę człowieka w odniesieniu do przyrody. Obiecując zastąpienie człowieka (lub grożąc nim), komputer podsuwa nam nową definicję człowieka jako «procesora informacji», a przyrody jako «informacji do przetworzenia»”⁶⁷.

Dla przykładu, warto zauważyć, że „większość fundamentalnych problemów współczesnej biologii to problemy związane z przechowywaniem, przekazywaniem, wykorzystaniem informacji i sterowaniem przepływem informacji”⁶⁸. W dzisiejszej biologii coraz częściej próbuje się analizować organizmy jako żywe struktury, które służą do przetwarzania i zapamiętywania informacji⁶⁹.

Z podobnym sposobem wykorzystywania pojęcia przetwarzania informacji, które najczęściej służy do definiowania tego, czym zajmuje się informatyka, mamy do czynienia także w fizyce i kosmologii. Coraz powszechniejsza jest tendencja, aby za Johnem Archibaldem Wheelerem przyjmować, że świat fizyczny składa się przede wszystkim z informacji, a materia i energia mają charakter wtórny. Także Michał Heller zauważa, iż wygodnie jest mówić o Wszechświecie w kategoriach *software* i *hardware*. To, czym jest komputer i jego oprogramowanie, pasuje – zdaniem Hellera – do odkrywanej przez nas matematycznej struktury Wszechświata i obrazowo tłumaczy relacje między matematycznymi prawami fizycznymi (*software*) a ich istniejącym skutkiem – Wszechświatem (*hardware*)⁷⁰. Podobnej metafory komputerowej możemy się doszukać w niektórych analizach z zakresu mechaniki kwantowej. Na przykład w ramach immaterialnej interpretacji mechaniki kwantowej Zbigniew Jacyna-Onyszkiewicz mówi o *software* jako regułach teorii kwantów, a o *hardware* jako Intelেকcie Absolutnym konstytuującym ontologię Wszechświata⁷¹.

Niezależnie od tego, czy powyższe rozwiązania są akceptowalne, czy nie, mają one pewną cechę wspólną. We wszystkich widać, że analogia z kompute-

⁶⁷ J.D. Bolter, *Człowiek Turinga. Kultura Zachodu w wieku komputera*, PIW, Warszawa 1990, s. 43.

⁶⁸ W. Korohoda, *Informacja w biologii*, [w:] M. Heller, J. Mączka (red.), *Informacja a rozumienie*, PAU-OBI-Biblos, Kraków-Tarnów 2005, s. 94.

⁶⁹ Por. P. Polak, *Komputery, wyobrażenia i współczesna filozofia przyrody*, [w:] M. Kuszyk-Bytniewska, A. Łukasik (red.), *Filozofia przyrody współcześnie*, Universitas, Kraków 2010, s. 309.

⁷⁰ Por. M. Heller, *Nauka jako odkrywanie sensu*, Znak, Kraków 2002, http://www miesiecznik.znak.com.pl/ul_2002.html (dostęp: 12.11.2012).

⁷¹ Por. Z. Jacyna-Onyszkiewicz, *Geneza zasad kosmologii kwantowej*, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań 1999, s. 15–35.

rem jest wygodnym sposobem obrazowania tego, jak funkcjonuje Wszechświat. Nic w tym dziwnego, powiedziałby Bolter, gdyż współczesnemu człowiekowi najłatwiej wyobrazić sobie działanie przyrody na wzór działania komputera.

Ponadto, w opinii autora *Człowieka Turinga*, taki powszechnie obowiązujący styl rozwiązywania różnorodnych problemów (także naukowych) za pomocą komputera ma wpływ na styl myślenia ludzi epoki komputerowej. Myślą oni bowiem, że znaczna część ludzkiej aktywności intelektualnej może być zlecona komputerom, realizującym coraz bardziej złożone procesy obliczeniowe⁷². Ma to, według Boltera, w konsekwencji prowadzić do głębokiej przemiany stylu myślenia współczesnego człowieka. „Dawny zachodni styl analizy zostanie przekształcony w modelowanie i symulację – nowy styl elektronicznego rozwiązywania problemów”⁷³.

Nietrudno zauważyć, że symulacje komputerowe wywarły duży wpływ na styl myślenia większości ludzi, którzy niemalże każdego dnia opierają swoje wybory na wynikach różnorodnych symulacji komputerowych (np. prognoz pogody). Manuel Castells w swoim monumentalnym dziele *Wiek informacji* stawia podobną tezę dotyczącą wirtualności rzeczywistej (*real virtuality*). Twierdzi bowiem, że człowiek współczesny w percepcji świata praktycznie nie korzysta już z bezpośredniego doświadczenia, wszystko dociera do niego za pośrednictwem elektronicznych cyfrowych mediów. Realne jest to, co się dzieje na ekranie telewizora lub komputera⁷⁴. Można zatem zadać pytanie, czy tego typu wirtualność rzeczywista dotknęła także naukowców? Czy dominującym współcześnie stylem badań naukowych jest styl komputerowy?

Biorąc pod uwagę powyższe przykłady z zakresu biologii, fizyki i kosmologii, nie można oprzeć się wrażeniu, że naukowcy pracujący w tych dziedzinach myślą głównie o komputerowych sposobach rozwiązywania swoich problemów badawczych. Styl myślowy według Flecka, o czym była mowa wyżej, to przyjęty w określonym środowisku wzorec postępowania badawczego, przeprowadzania obserwacji i eksperymentów oraz interpretacji danych doświadczenia. Widać zatem, że we współczesnych naukach empirycznych systemy komputerowego wspomagania badań doświadczalnych są powszechnie stosowanym standardem; są to wzorcowe układy służące do przeprowadzania badań doświadczalnych oraz interpretacji uzyskanych w ten sposób wyników (była o tym mowa w rozdziale 2). Stąd nasuwa się wniosek, że koncepcja stylu myślowego Flecka wystarcza, aby zdać sobie sprawę z faktu, iż we współczesnych naukach empirycznych mamy do czynienia z komputerowym stylem myślowym.

⁷² Por. J.D. Bolter, dz. cyt., s. 93–94.

⁷³ Tamże, s. 347.

⁷⁴ Por. M. Castells, *Spółczesność sieci*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2011, s. 401–404.

Pojęcie stylu, wprowadzone swego czasu przez Ostwalda Spenglera (w 1918 roku)⁷⁵ i Ludwika Flecka (w 1935 roku)⁷⁶ w odmiennych znaczeniach, podlegało licznym dalszym parafrazom, modyfikacjom i rozwinięciom. Ostatnio nawiązał do niego Alistair C. Crombie (w 1994 roku)⁷⁷, w stylu naukowym wydzielając trzy składniki konstytutywne: typ stosowanego dowodzenia – metody dokonywania odkryć i przeprowadzania dowodu; koncepcja przyrody: przekonania na temat tego, co z istniejącego świata można odkryć; nawyki umysłowe, w szczególności oczekiwania i reakcje na innowacje i zmiany, a w ich ramach tendencje społeczne i jednostkowe.

Powyższa ogólna charakterystyka stylu naukowego także pozwala uzasadnić tezę, że we współczesnych naukach empirycznych mamy do czynienia z komputerowym stylem naukowym. Istnieją już bowiem wstępne opracowania komputerowych systemów odkryć naukowych, komputery są w stanie przeprowadzić wiele dowodów, z którymi człowiek nie może sobie bez nich poradzić⁷⁸, coraz powszechniejsze jest myślenie o przyrodzie jako bycie przetwarzającym informacje. Ponadto większość prac naukowych powstaje przy użyciu wspomaganie komputerowego niezależnie od tego, czy jest to praca zbiorowa, czy indywidualna. Nawykiem umysłowym badaczy pracujących w XXI wieku jest to, aby dochodzić do swoich wyników, wspomagając się technikami komputerowymi. Widać więc, że można zasadnie mówić o komputerowym stylu naukowym.

W innej pracy Crombie wyróżnia w naukowej tradycji Zachodu sześć dominujących stylów myślenia, postępowania badawczego i pracy naukowej⁷⁹:

- 1) postulowanie teoretyczno-matematyczne zastosowane w nowożytnej matematyce,
- 2) posługiwanie się eksperymentem zarówno w celu kontroli postulatów, jak i w poznaniu poprzez obserwację i pomiar,
- 3) konstruowanie hipotetycznych modeli – analogów,

⁷⁵ O. Spengler, *Zmierzch Zachodu. Zarys morfologii historii uniwersalnej* (skrót dokonany przez Helmuta Wenera), tłumaczenie i przedmowa J. Marzęcki, Wydawnictwo KR, Warszawa 2001.

⁷⁶ L. Fleck, *Powstanie i rozwój...*

⁷⁷ A.C. Crombie, *Style myśli naukowej w początkach nowożytnej Europy*, IFiS PAN, Warszawa 1994, s. 82–83.

⁷⁸ Dla przykładu, warto zauważyć, że „rozumowanie indukcyjne w duchu Bacona, być może w nieco zmodyfikowanej formie uwzględniające w pewnym stopniu idee Poppera, znajduje zastosowanie dzięki wielkiej mocy obliczeniowej i właściwym algorytmom współczesnych systemów z dziedziny *machine learning*. Oznacza to, że metoda naukowa uległa zmianie czy rozwojowi dzięki nowym instrumentom w postaci systemów komputerowych *machine learning*, podobnie jak stało się to za czasów Bacona dzięki teleskopowi”, P. Giza, *Filozoficzne i metodologiczne aspekty...*, s. 123.

⁷⁹ A.C. Crombie, *Designed in the Mind: Western Visions of Science, Nature and Humankind*, [w:] tegoż, *Science, Art and Nature in Medieval and Modern Thought*, Hambledon Press, London 1996, s. 1–12.

- 4) porządkowanie różnorodności przez porównanie i taksonomię,
- 5) zastosowanie analizy statystycznej i rachunku prawdopodobieństwa,
- 6) historyczne wyprowadzanie zasad rozwojowych przyrody.

Sekwencja stylów podana przez Crombiego odpowiada historycznej kolejności ich wyłaniania się w dziejach nauki zachodniej. Według Hackinga studium Crombiego oparte było w znacznej mierze tylko na historii rozwoju nauk Zachodu, począwszy od starożytnej Grecji, aż do wieku XVII. Twierdzi on, że tylko w przypadku ostatniego stylu docieramy do wieku XIX. Uzupełnia zatem listę Crombiego fundamentalną XVII-wieczną innowacją – nauką laboratoryjną⁸⁰. „Charakteryzuje się ona konstruowaniem aparatury przeznaczonej do izolowania i oczyszczania istniejących zjawisk oraz do tworzenia nowych”⁸¹.

Crombie twierdzi, że istnieją odmienne style poszukiwań, każdy wyposażony we własne kanony dobrego rozumowania. Hacking natomiast kładzie nacisk na to, że każdy styl postuluje nowe standardy rozumowania oraz nowe kryteria ustalania tego, co ma być prawdą i fałszem⁸². Style rozumowania według niego są czymś, co określa jako twory samouwierzytelniające się⁸³. „Ogólnie laboratorium stabilizuje się poprzez wzajemne dostosowywanie się idei (które zawierają teorie z różnych poziomów), osprzętu (który podlega rewizji tak samo jak teorie) i cechowanie [*marks*] (zawierające dane i ich analizę)”⁸⁴. Hacking twierdzi także, że niektóre style są bardziej efektywne od pozostałych. Za bardzo efektywny uważa na przykład styl laboratoryjny, którego charakterystyczną cechą jest budowanie aparatów w celu wytwarzania zjawisk. W naukach, w których dominującym stylem rozważań naukowych jest styl laboratoryjny, aparatura naukowa powinna być w centrum uwagi metodologa lub filozofa nauki. Wtedy właśnie aparatura badawcza wyznacza standardy obiektywności, dyktuje sposób pracy naukowej oraz zakreśla nowe horyzonty poznawcze.

Od lat osiemdziesiątych XX wieku mamy do czynienia z komputerowym wspomaganie badań eksperymentalnych. Część z nich to badania laboratoryjne w sensie Hackinga, które także mogą być wspomagane komputerowo. Znacznie łatwiej i precyzyjniej izoluje się bowiem i oczyszcza istniejące zjawiska oraz tworzy nowe (czego przykładem może być choćby LHC w CERN), jeśli część układu eksperymentalnego stanowi komputer. Komputerowy styl badań eksperymentalnych zawierałby zatem w sobie komputerowy styl badań laboratoryjnych (poszerzoną o wspomaganie komputerowe wersję stylu labo-

⁸⁰ Por. I. Hacking, *Niejedności...*, s. 172.

⁸¹ Tamże, s. 172.

⁸² Por. tamże, s. 174.

⁸³ Por. I. Hacking, *Language, Truth and Reason*, [w:] M. Hollis, S. Lukes (eds), *Rationality and Relativism*, MIT Press, Cambridge MA 1982, s. 48–66.

⁸⁴ I. Hacking, *Niejedności...*, s. 179.

ratoryjnego), gdyż nie wszystkie badania eksperymentalne służą stabilizacji i kreacji zjawisk. Jeszcze szerszą kategorią byłby komputerowy styl badań naukowych, który zawierałby w sobie komputerowy styl badań eksperymentalnych oraz pozostałe, jednakże wspomagane komputerowo, style badań wyszczególnione przez Crombiego (np. komputerowo wspomagane dowodzenie matematyczne, komputerowo wspomagane modelowanie, komputerowo wspomagany styl taksonomiczny i historio-genetyczny, komputerowo wspomagany styl statystyczny).

Analizując współczesną pracę naukowców, można zauważyć, że niemalże wszystkie procedury badawcze nauk empirycznych (np. odkrywanie, uzasadnianie, wyjaśnienie, klasyfikowanie itd.) wspomagane są komputerowo. Komputer może pełnić wiele różnych ról w naukach empirycznych, które wymieniłem we wprowadzeniu do rozdziału 2. Możemy zatem mówić o komputerowym stylu badań eksperymentalnych. Jego rozszerzeniem byłby komputerowy styl badań naukowych. Widać bowiem, że obecnie wszystkie typy badań wymienione w ramach sześciu historycznych stylów myślenia według Crombiego można wykonać, posiłkując się komputerem, który jest odpowiednio zaprogramowany i posiada właściwe urządzenia peryferyjne. Istnieją nawet – współcześnie jeszcze bardzo niedoskonałe – komputerowe systemy odkryć naukowych, dzięki którym komputery same mogą dochodzić do prostych uogólnień i formułować prawa nauki⁸⁵.

Szczególnie charakterystyczne dla komputerowego stylu badań naukowych są dwa składniki konstytutywne zaproponowane przez Crombiego: typ stosowanego dowodzenia (metody dokonywania odkryć i przeprowadzania dowodu) oraz nawyki umysłowe. Ich wspólnym mianownikiem jest komputer jako narzędzie, dzięki któremu dokonuje się większości odkryć, i jako narzędzie służące do porównywania danych empirycznych z różnorodnymi bazami danych, np. reprezentującymi oczekiwane wyniki będące konsekwencją przyjęcia takiej, a nie innej teorii. Badanie różnorodnych obiektów i zjawisk za pomocą komputera jest także charakterystycznym nawykiem umysłowym większości naukowców zajmujących się obecnie badaniami naukowymi.

Tak więc, we współczesnych badaniach naukowych (a tym samym także i eksperymentalnych) dominuje komputerowy styl badań naukowych, bowiem większość prac eksperymentalnych prowadzona jest przy użyciu systemów wspomagania komputerowego. Czy taka radykalna zmiana sposobu pracy większości naukowców, którzy do niemalże wszystkich wykonywanych przez siebie procedur badawczych używają wspomagania komputerowego, jest zmianą rewolucyjną? Na to pytanie udzielę odpowiedzi w następnym podrozdziale.

⁸⁵ Por. P. Giza, *Filozoficzne i metodologiczne aspekty...*, s. 186–197.

4.4. Czy komputer zrewolucjonizował badania eksperymentalne?

W niniejszym podrozdziale będę bronił tezy, że dominujący we współczesnych badaniach eksperymentalnych styl komputerowy jest konsekwencją zmiany rewolucyjnej, jaka dokonała się za sprawą komputerów w tychże badaniach. Tym samym będę się starał wykazać, że odpowiedź na postawione w tytule podrozdziału pytanie jest pozytywna.

Termin „rewolucja naukowa” nie był używany zbyt często, zanim Alexandre Koyré rozpowszechnił go w 1939 roku⁸⁶, zaś dopiero w roku 1954 autorzy dwóch książek użyli tego określenia jako tytułu swoich prac. Byli to Alfred R. Hall⁸⁷ i John Desmond Bernal⁸⁸. Steven Shapin uważa, że pojęcie rewolucji jako epokowej, nieodwracalnej zmiany zostało po raz pierwszy zastosowane w sposób systematyczny właśnie w stosunku do nauki, a nie na przykład do wydarzeń politycznych⁸⁹. Twierdzi on także, że nie istnieje żadna istota rewolucji naukowej, a więc możliwe są o niej rozmaite opowieści, a każda z nich zwraca uwagę na jakieś istniejące cechy sytuacji kulturowej, w ramach której odbywa się proces rewolucyjnych zmian. Każda zatem relacja o rewolucji naukowej ma charakter selektywny i cząstkowy⁹⁰.

Autorem najbardziej znanego, klasycznego już dzisiaj modelu rewolucji naukowej, przedstawionego w 1962 roku w książce *Struktura rewolucji naukowych*, jest Thomas S. Kuhn. Jego poglądy są tak dobrze znane, że nie będę ich szczegółowo referował. Przytoczę jedynie te wątki z jego dorobku, które posłużą do udzielenia odpowiedzi na postawione w tytule niniejszego podrozdziału pytanie⁹¹.

Według Kuhna w okresie tzw. nauki normalnej jest ona konstytuowana przez jakiś paradygmat. „Paradygmat wyznacza granice dla nauki normalnej, a nauka normalna aktualizuje i artykułuje paradygmat. Paradygmat nie zawsze pasuje do wyników eksperymentalnych. Istnieją rozbieżności, czyli anomalie. Praktyka nauki normalnej polega w dużym stopniu na rozwiązywaniu tych anomalii przez dokonywanie odpowiednich poprawek nie

⁸⁶ A. Koyré, *Galileo Studies*, The Harvest Press, Brighton 1978.

⁸⁷ A.R. Hall, *The scientific revolution, 1500–1800. The formation of the modern scientific attitude*, Longmans, London 1954.

⁸⁸ J.D. Bernal, *Science in History*, vol. 2: *The scientific and industrial revolutions*, The MIT Press, Cambridge MA 1971.

⁸⁹ Por. S. Shapin, *Rewolucja naukowa*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2000, s. 10.

⁹⁰ Por. tamże, s. 11–14.

⁹¹ Omawiając poglądy Kuhna, wykorzystam opracowanie Kazimierza Jodkowskiego zawarte w książce *Wspólnoty uczonych, paradygmaty i rewolucje naukowe* (Wydawnictwo UMCS, Lublin 1990), gdyż wydobywa ono podstawowe składniki koncepcji Kuhna istotne dla poruszanej w niniejszym podrozdziale problematyki.

naruszających samego paradygmatu. (...) Dopiero wtedy, gdy negatywne wyniki testów zaczną się mnożyć, mogą one być coraz częściej uznawane za argumenty przemawiające przeciwko samej teorii (...). Gdy opinia taka zaczyna być dostrzegalna we wspólnocie uczonych, rozpoczyna się okres nauki nadzwyczajnej, rewolucyjnej. Trwa on względnie krótko i kończy się powrotem do dawnego, ale już udoskonalonego paradygmatu bądź przewrotem naukowym prowadzącym do nowego paradygmatu”⁹².

Pojęcie paradygmatu jest niestety wieloznaczne. Jego definicja podana przez Kuhna brzmi następująco. Paradygmaty są to „powszechnie uznawane osiągnięcia naukowe, które w pewnym czasie dostarczają społeczności uczonych modelowych problemów i rozwiązań”⁹³. W opinii Kazimierza Jodkowskiego, najogólniej, przez Kuhnowski paradygmat można rozumieć „tradycję badawczą, linię myślenia, która niesie szereg wskazówek grupie uczonych, w jaki sposób mają podchodzić do zjawisk, jak je analizować, jakiego rodzaju efektów oczekiwać, jakie typy eksperymentów wykonywać i jakiego zbioru metod używać. Paradygmat dostarcza sposobu widzenia problemów i sugeruje, jakie rodzaje techniki są właściwe oraz jakie rodzaje rozwiązań są akceptowane”⁹⁴.

Obecnie wyróżnia się dwa podstawowe znaczenia terminu „paradygmat”. Pierwsze z nich to tak zwana macierz dyscypliny naukowej. Jest to zbiór przekonań, wartości i technik podzielanych przez członków danej wspólnoty naukowej. Kuhn wymienił cztery typowe składniki macierzy dyscypliny naukowej: symboliczne generalizacje (prawa naukowe wyrażone najczęściej w postaci matematycznej), przekonania metafizyczne (dotyczące istnienia atomów, pola sił, wiara w ciepło jako substancję czy – jako energię ruchu itp.), wartości teoretyczne (dokładność, zakres przewidywań, kwantytatywność, prostota, wewnętrzna spójność, wiarygodność, płodność, społeczna użyteczność itp.) i modelowe rozwiązania (wzorce rozwiązywania łamigłówek). Wzorce uczynił Kuhn swoim drugim rodzajem paradygmatu⁹⁵. Innymi słowy, paradygmat w sensie szerszym jest zbiorem przekonań, wartości i technik naukowych utrzymywanych przez wspólnotę naukową. W znaczeniu węższym zawiera się w poprzednim i jest to wzorzec rozwiązywania problemów. Na podstawie zbioru rozwiązań konkretnych przykładowych problemów uczone, w ramach nauki normalnej, rozwiązuje nowo napotymane problemy.

Kuhn uważa, że teorie po sobie następujące, oddzielone od siebie rewolucją naukową, są niewspółmierne, tj. w pewnym sensie różne, odmienne,

⁹² Tamże, s. 134–135.

⁹³ T.S. Kuhn, *Struktura rewolucji naukowych*, Aletheia, Warszawa 2009, s. 10.

⁹⁴ K. Jodkowski, *Wspólnoty uczonych...*, s. 140.

⁹⁵ Por. tamże, s. 143–147.

nieporównywalne⁹⁶. Jodkowski wyróżnia cztery poziomy niewspółmierności u Kuhna. Są to: zmienność obserwacyjna, zmienność językowa, zmienność metodologiczna i zmienność ontologiczna⁹⁷. Uczni stojący na gruncie odmiennych paradygmatów mogą inaczej postrzegać świat. Jeśli ich obserwacje są odmienne, to akceptowane przez nich teorie są niewspółmierne. Kuhn sporo miejsca poświęca zmienności językowej, tj. problemowi zmiany znaczeń terminów naukowych przy przejściu od jednej teorii do drugiej. Niewspółmierność, tj. brak wspólnej miary, oznacza w tym przypadku brak wspólnego języka. Zmiana paradygmatu prowadzi także do nowych poglądów na temat badanego przedmiotu, do formułowania nowych praw, hipotez, do odkrywania nowych faktów. Co więcej, przy zmianie paradygmatu pewne ważne dotąd problemy naukowe mogą stać się drugorzędne, i odwrotnie, niektóre marginalne pytania stają się kwestiami zasadniczymi. Ponadto niektóre problemy przestają być problemami naukowymi, a niektóre zagadnienia spoza nauki stają się naukowymi (np., odpowiednio, problem mechanicznego modelu podłoża fal elektromagnetycznych, tj. eteru, oraz problem pochodzenia grawitacji u Newtona i Einsteina). Wraz ze zmianą paradygmatu zmieniają się nie tylko problemy, ale także standardy ocen naukowych. To, co w ramach jednego paradygmatu jest wartościowe, dla innego może być bezwartościowe lub przynajmniej obojętne.

Jednym ze składników paradygmatu w sensie szerszym (tzw. macierzy dyscypliny naukowej) są modele ontologiczne mówiące o strukturze świata. Można wyróżnić dwa rodzaje zmienności ontologicznej. Pierwszy z nich polega na tym, że nowa teoria odmiennie strukturalizuje ten sam świat. Drugi rodzaj zmienności ontologicznej występuje wtedy, gdy nowa teoria postuluje istnienie nowych rodzajów przedmiotów, zjawisk, zdarzeń itd. Są one nowe w tym sensie, że nie tylko nie istniały, ale i nie mogły istnieć zgodnie z ontologią dawnej teorii. Może być także na odwrót, tzn. gdy nowa teoria zaprzecza możliwości istnienia przedmiotów postulowanych przez teorię dotychczasową (np. rezygnacja z pojęcia eteru w fizyce relatywistycznej)⁹⁸.

Warto podkreślić, że nauka według Kuhna ma charakter wspólnotowy, a to oznacza, że żadne indywidualne odkrycie nie ma szans przekształcenia się w odkrycie naukowe, jeśli nie zostanie jako takie zaakceptowane przez wspólnotę naukową. Ponadto w trakcie rozwoju nauki zmienia się także zespół problemów uznawanych za naukowe. Po rewolucji naukowej niektóre problemy mogą zostać odrzucone jako pseudoproblemy; może także zmieniać się ich waga dla rozważań naukowych. Konsekwencją tego jest fakt zmiany kryteriów ocen, a przynajmniej kryteriów naukowości. Przed

⁹⁶ Por. tamże, s. 309–313.

⁹⁷ Por. tamże, s. 328–379.

⁹⁸ Por. tamże, s. 371–379.

i po rewolucji różne mogą być także metody i standardy rozwiązywania problemów⁹⁹.

Zmiany normalne, według Kuhna, polegają na kumulatywnym przyroście wiedzy, dodaniu nowej do już istniejącej. Zmiany natury rewolucyjnej dotyczą odkryć, których nie można opisać za pomocą pojęć używanych przed dokonaniem tych odkryć. Nie można wzbogacić nauki o to rewolucyjne odkrycie i nie można tego odkrycia dokonać bez zmiany sposobu myślenia i opisywania pewnego zakresu zjawisk przyrodniczych¹⁰⁰. „W większości przypadków rewolucja poprzedzona jest przez kryzys – powszechną świadomość w ramach grupy uczonych, że uprawianie nauki normalnej napotyka na coraz więcej trudności, anomalii. Kryzys taki jednak nie zawsze jest konieczny. Czasami rewolucję wywołuje zastosowanie nowego instrumentu badawczego, jak mikroskop elektronowy, czy teoretycznego, jak prawa Maxwella, które zostały rozwinięte w innej dziedzinie, wewnątrz innego paradygmatu”¹⁰¹.

Kuhn dostrzegł co prawda fakt, że doskonalenie sprzętu pomiarowego i badawczego wywiera wpływ na teorie naukowe, jednakże nie docenił należycie znaczenia rozwoju aparatury naukowej. Sam zaznacza w *Strukturze rewolucji naukowych*, że poza przygodnymi wzmiankami nie omawia roli, jaką w rozwoju nauki odgrywa postęp techniczny¹⁰². Przypuszcza jednak, „że dokładne rozpatrzenie tych kwestii (...) w istotnym wymiarze pogłębiłoby analizę i rozumienie postępu naukowego”¹⁰³.

Podobne uwagi znaleźć można u I. Bernarda Cohena, który twierdzi, że rozwój narzędzi badawczych może mieć wpływ na powstanie nowych teorii. Jednakże nawet radykalne zmiany w instrumentalnym wyposażeniu nauki nie są dla niego rewolucyjne. Rewolucyjne są dla tego autora, podobnie jak dla Kuhna, tylko te o charakterze teoretycznym¹⁰⁴. Obaj są zatem teoretykami, dla których konsekwencją zmiany aparatury badawczej jest wyłącznie zmiana bazy empirycznej, którą teorie powinny wyjaśnić, zaś zmiany rewolucyjne dotyczą jedynie teoretycznej sfery nauki. Zmiany w aparaturze badawczej mogą wpływać na zmiany teorii, a dopiero te są, według Cohena, rewolucyjne. Z eksperymentalistycznego punktu widzenia jest to zatem pośredni model rewolucji, ze względu na pośredni wpływ aparatury badawczej na zmiany rewolucyjne w nauce.

Cohen wyróżnia podstawowe kryteria, które jego zdaniem muszą być spełnione, aby pewne przemiany w nauce można było uznać za rewolucyjne.

⁹⁹ Por. tamże, s. 551-555.

¹⁰⁰ Por. tamże, s. 166.

¹⁰¹ Tamże, s. 174.

¹⁰² Por. T. Kuhn, *Struktura rewolucji...*, s. 13.

¹⁰³ Tamże, s. 13-14.

¹⁰⁴ Por. I.B. Cohen, *Revolution in Science*, Harvard University Press, Cambridge MA-London 1985, s. 40-41.

I tak, dane wydarzenie: a) musi być ocenione za rewolucyjne przez uczonych i/lub specjalistów pracujących w danej dyscyplinie, gdy zmiana ta następuje; b) musi mieć wpływ na powstające rozprawy naukowe i podręczniki; c) musi zostać uznane za przełomowe przez kompetentnych historyków nauki; d) musi zostać za takie uznane także przez wybitnych naukowców z pokrewnych specjalności¹⁰⁵. Widać zatem, że w koncepcji Cohena pojawiają się nowe elementy. Należy do nich instytucjonalny wymiar rewolucji naukowych. W tym kontekście wymienia on cztery podstawowe rewolucje¹⁰⁶. Pierwsza z nich jest związana z powstaniem w 1675 roku w Londynie pierwszego towarzystwa naukowego Royal Society. Drugą rewolucję wyznacza wzrost znaczenia zawodowych uczonych w społeczeństwach zachodnich i powstanie kolejnych towarzystw naukowych (np. British Association for the Advancement of Science, Berlińska Akademia Nauk) w 1700 roku. Trzecia rewolucja przypada na koniec XIX wieku i związana jest z powstaniem pierwszych ośrodków badawczych i szkół wyższych kształcących naukowców. Czwarta rewolucja obejmuje okres po II wojnie światowej. Cohen wiąże ją z dużymi funduszami łożonymi na rozwój nauk i powstaniem narodowych fundacji wspierających naukę (np. w Stanach Zjednoczonych).

Hacking jest filozofem nauki, który zdecydowanie mocniej od teoretycyistów dowartościowuje znaczenie aparatury badawczej dla przemian poznawczych w nauce. W artykule *On the Stability of the Laboratory Sciences*¹⁰⁷ wymienia cztery zasadnicze cechy charakterystyczne rewolucji naukowych, które nie zakładają perspektywy teoretycznej. Po pierwsze, mają one charakter interdyscyplinarny lub predyscyplinarny. Po drugie, na ich podłożu wyrastają nowe instytucje społeczne o charakterze naukowym lub przemysłowym. Po trzecie, skutkiem tego rodzaju rewolucji są dość radykalne zmiany w strukturze nauki. Następuje przeorganizowanie społeczeństwa nauki na nowy sposób. Po czwarte, rewolucje te pociągają za sobą dość istotne zmiany w naszym światopoglądzie i poznawczym stosunku do świata.

W swoich analizach dotyczących nauki XVII wieku także Shapin zwraca uwagę na cztery wzajemnie powiązane aspekty zmian wiedzy o świecie oraz sposoby jej uzyskiwania, które uznaje za pragmatyczne kryteria rewolucji w nauce¹⁰⁸. Są to: a) mechanizacja natury (mechanistyczne metafory zjawisk przyrody), b) depersonalizacja wiedzy (oddzielenie poznającego podmiotu od poznawanych przedmiotów przyrody), c) zamierzona mechanizacja wytwarzania wiedzy (wyróżnienie reguł metody, mających na celu zdyscyplinowanie

¹⁰⁵ Por. tamże, s. 42-47.

¹⁰⁶ Por. tamże, s. 77-97.

¹⁰⁷ I. Hacking, *On the Stability of the Laboratory Sciences*, „The Journal of Philosophy” 1988, no. 85, s. 507-514.

¹⁰⁸ Por. S. Shapin, dz. cyt., s. 18.

owej produkcji przez wyeliminowanie elementów subiektywnych), d) dążenie do wykorzystywania zreformowanej wiedzy o przyrodzie do realizacji celów moralnych, społecznych i politycznych. Innymi słowy, rewolucyjna jest taka zmiana, w ramach której radykalnie zmieniają się odpowiedzi na trzy pytania: co wiadomo o przyrodzie (tj. pierwszy i drugi aspekt wymieniony wyżej), jak tę wiedzę się zdobywa (trzeci aspekt) i jakim celom służy (czwarty)¹⁰⁹.

W skrócie przedstawionych w niniejszym podrozdziale czterech koncepcjach rewolucji naukowych, Kuhna, Cohena, Hackinga i Shapina, reprezentowana jest cała gama stanowisk: od wyraźnie teoretyczystycznego, poprzez pośrednie (o charakterze socjologicznym), do eksperymentalistycznego. Dla Kuhna, Cohena i Shapina zaplecze eksperymentalne nauki spełnia jedynie rolę wspomagającą przełom w sferze teoretycznego opisu świata. Cohen eksponuje ponadto instytucjonalny wymiar nauki jako ten, który wyznacza istotne etapy w jej rozwoju. Shapin natomiast podkreśla pragmatyczny wymiar zreformowanej wiedzy, uwypuklając zmiany celów, do jakich jest używana. Hacking natomiast mówi o rewolucjach w nauce jako rewolucjach aparaturowych, tj. takich, w ramach których diametralnie zmienia się instrumentarium badawcze wykorzystywane przez naukowców. Takie rewolucyjne zmiany w nauce nie mają wymiaru wyłącznie epistemologicznego, ale także ontologiczny. Nowa aparatura nie tylko bowiem umożliwia dokładniejsze badania świata, ale może także kreować zupełnie nowe, dotychczas nieistniejące w przyrodzie zjawiska.

Pierwszą z przywołanych w niniejszym rozdziale koncepcji rewolucji w nauce sformułował Kuhn. Jeśli jego paradygmat rozumieć w węższym sensie, jako wzorzec rozwiązywania konkretnych problemów akceptowany przez wspólnotę naukową, to bazującej na nim koncepcji rewolucyjnej zmiany, jako przeformułowania takiego wzorca, użyć można do udzielenia odpowiedzi na pytanie, czy komputer zrewolucjonizował badania eksperymentalne. Uzyskana odpowiedź z pewnością nie będzie jednoznaczna, gdyż rozważania Kuhna są zasadniczo teoretyczystyczne. Nie analizuje on bowiem należycie pracy eksperymentalnej i związanych z nią problemów. Jeśli jednak weźmie się pod uwagę instrumentalne kryteria postępu w nauce, np. zdolność do stawiania i rozwiązywania łamigłówek, to nietrudno zauważyć, że potencjał w tym zakresie badań eksperymentalnych wspomaganych komputerowo jest znacznie większy niż badań prowadzonych bez takiego wspomaganie. Nowy paradygmat zwykle wyjaśnia ich więcej i dokładniej niż stary, z czym mamy niewątpliwie do czynienia w przypadku układów eksperymentalnych wspomaganych komputerowo.

Tak więc zastosowanie komputera w naukach empirycznych byłoby rewolucyjne wówczas, gdyby większość naukowych problemów rozwiązywana

¹⁰⁹ Por. tamże, s. 16–18.

była za pomocą systemów komputerowych. A z takim właśnie zjawiskiem mamy do czynienia od lat osiemdziesiątych XX wieku, gdy powszechnie zaczęto stosować w naukach empirycznych systemy komputerowego wspomagania badań eksperymentalnych. Współcześnie zaś większość tego typu badań prowadzona jest przy użyciu komputerów. Ponadto komputery są narzędziami badawczymi umożliwiającymi współczesne badania eksperymentalne (o czym pisałem więcej w podrozdziale 4.2). Zatem, nawet gdy rewolucję rozumieć jako zmianę wzorca rozwiązywania problemów naukowych i uwzględnić instrumentalne kryteria postępu, to niewątpliwie mamy do czynienia ze znacznym postępowaniem w przypadku badań eksperymentalnych wspomaganych komputerowo, a przejście od analogowych do cyfrowych badań empirycznych można uznać za zmianę rewolucyjną, całkowicie bowiem zmienił się sposób rozwiązywania konkretnych problemów badawczych.

Warto przypomnieć, że współcześnie to nie eksperymentatorzy, ale komputery precyzyjnie sterują przebiegiem eksperymentów, zbieraniem danych empirycznych i ich gromadzeniem. Proces obróbki danych empirycznych odbywa się także za pomocą konkretnych programów komputerowych, zaś proste prawa fenomenologiczne mogą być formułowane bez użycia podmiotu eksperymentującego. Tak więc współcześnie mamy do czynienia z komputerowym wzorcem rozwiązywania problemów naukowych. Bez wprowadzenia komputerów do układu eksperymentalnego wielu problemów nie można by rozwiązać, a nawet postawić (np. problemu wartości energii bozonu Higgsa).

Ponadto dzięki komputerowemu wspomaganiu badań doświadczalnych eksperymentatorzy są w stanie dostrzec znacznie więcej nowych rodzajów przedmiotów, zjawisk i zdarzeń. Bez wspomagania komputerowego eksperymenty z zakresu współczesnej fizyki cząstek elementarnych nie mogłyby być przeprowadzane (por. podrozdział 4.2). Nie można byłoby dostrzec szybkozmiennych procesów związanych z rozpadem cząstek elementarnych i identyfikacją nowego bytu - bozonu Higgsa. Dzięki komputerowemu wspomaganiu rozszerza się świat (więcej można zbadać z użyciem komputerów), w którym naukowcy prowadzą swoje badania, co pociąga za sobą zmiany natury ontologicznej. Świat, w którym eksperymentuje się ze wspomaganiami cyfrowymi, jest niewspółmierny ontologicznie ze światem, w którym prowadzono eksperymenty bez wspomaganiami komputerowego. Inne są także metody pracy naukowej w ramach eksperymentów analogowych i cyfrowych. W pracy eksperymentalnej wspomaganie komputerowo uwzględniać trzeba konsekwencje metodologiczne wprowadzenia elementów cyfrowych w układzie eksperymentalnym (por. podrozdział 3.1). Inny jest także status eksperymentatora w tego typu badaniach (por. podrozdział 3.2). Analiza metodologiczna eksperymentów wspomaganymi komputerowo jednoznacznie sugeruje ich

odmienność od eksperymentów klasycznych (por. rozdział 3). Mamy zatem do czynienia także ze zmiennością (niewspółmiernością) metodologiczną, gdy przechodzimy od analogowych do cyfrowych badań eksperymentalnych.

Można także zauważyć pewne cechy zmienności (niewspółmierności) obserwacyjnej. Uczni używający w swojej pracy badawczej komputerów myślą o świecie jako informacji, którą za pomocą komputera można z tego świata wydobyć (por. podrozdział 4.3). Wcześniej, gdy nie było systemów komputerowego wspomaganie badań doświadczalnych, świat nie był tylko „informacją do przetworzenia”¹¹⁰, nie „składał” się z bitów, ale raczej z atomów itp. Po cyfryzacji badań eksperymentalnych inna jest nie tylko postulowana ontologia (z większą ilością badanych obiektów), ale także inaczej postrzega się świat (bity zamiast atomów), co wskazuje na zmienność (niewspółmierność) obserwacyjną. Może to sugerować także inne sposoby artykulacji świata (np. zera i jedynki w cyfrowych bazach danych empirycznych zamiast formuł analitycznych). Cyfrowy sposób pracy badawczej wymaga także cyfrowego zapisu poleceń i wyników. Ze względu jednak na liczne problemy dotyczące przetwarzania analogowo-cyfrowego oraz cyfrowo-analogowego jednoznaczny przekład z analogowej na cyfrową (i odwrotnie) reprezentację świata nie jest możliwy (por. podrozdziały 2.2, 2.6). Mogłoby to sugerować także niewspółmierność na poziomie językowym podczas przejścia z analogowego na cyfrowy sposób eksperymentowania.

Próbując odpowiedzieć na pytanie, czy komputer zrewolucjonizował badania eksperymentalne w kontekście propozycji Kuhna, warto przyjrzeć się także problemowi anomalii. W tym przypadku nie mamy do czynienia z rewolucją poprzedzoną przez wyraźny kryzys, ale raczej z rewolucją wywołaną przez zastosowanie nowego instrumentu badawczego¹¹¹. Tym nowym instrumentem badawczym jest komputer i możliwości użycia go do sterowania przebiegiem eksperymentów oraz jako urządzenia służącego do akwizycji i przetwarzania napływających danych eksperymentalnych. Komputer jednak nie został wykorzystany do przebudowy jakiejś teorii, ale radykalnie zmienił sposób eksperymentowania. W tym kontekście można zatem sugerować zmianę paradygmatu w badaniach eksperymentalnych bez paradygmatycznej zmiany w teorii (np. podstawą nowatorskich, skomputeryzowanych eksperymentów w CERN jest przestarzały już standardowy model cząstek elementarnych). Jest to wniosek dość specyficzny w kontekście kryteriów rewolucji zaproponowanych przez Kuhna. Co więcej, autor ten, jak już zauważyłem, nie omawia roli, jaką w rozwoju nauki odgrywa postęp techniczny¹¹², a jest to, jak się wydaje, współcześnie bardzo ważny element determinujący rozwój nauki. Jej cyfry-

¹¹⁰ J.D. Bolter, dz. cyt., s. 43.

¹¹¹ Por. T. Kuhn, *Struktura rewolucji...*, s. 13-14.

¹¹² Por. tamże, s. 13.

zacja doprowadziła bowiem do zmian rewolucyjnych, których nie da się precyzyjnie opisać w aparacie pojęciowym autora *Struktury rewolucji naukowych*.

Omawiając koncepcję rewolucji naukowej zaproponowaną przez Cohena, zwróciłem uwagę, że pojawia się w niej instytucjonalny wymiar rewolucji w nauce, gdyż dane wydarzenie musi być ocenione jako rewolucyjne przez specjalistów pracujących w danej dziedzinie i specjalnościach pokrewnych. Rewolucyjne wydarzenia muszą mieć wpływ na powstające rozprawy naukowe i podręczniki. Muszą także zostać uznane za przełomowe przez historyków nauki. W ramach takich kryteriów także komputer można uznać za narzędzie badawcze, które zrewolucjonizowało prace eksperymentalne. Wprowadzenie bowiem komputerowego wspomaganie tych badań diametralnie zmieniło sposób pracy naukowej (o czym przekonywałem w rozdziale 3), co z pewnością zauważyli i docenili wszyscy eksperymentatorzy pracujący w ramach różnych specjalności. W większości współczesnych prac eksperymentalnych znajdziemy wzmianki o oprogramowaniu, za pomocą którego dokonywano obliczeń, analiz i wizualizacji wyników badań. Pojawiają się także liczne podręczniki służące studentom do nauki eksperymentowania wspomaganego komputerowo¹¹³. Historycy nauki natomiast przekonują, że pojawienie się komputera, rozwój jego możliwości i różnorodności zastosowań zmienia całą współczesną kulturę (łącznie z nauką końca XX i początku XXI wieku)¹¹⁴.

Wspomniałem wcześniej, że Shapin jest autorem pragmatycznych kryteriów rewolucji w nauce. Dla niego rewolucyjna jest taka zmiana, w ramach której radykalnie zmieniają się odpowiedzi na trzy pytania: co wiadomo o przyrodzie, jak tę wiedzę się zdobywa i jakim celom ona służy. Zmianie odpowiedzi na pierwsze z nich towarzyszyć ma depersonalizacja wiedzy, tzn. oddzielenie poznającego podmiotu od poznawanych przedmiotów przyrody. Z czymś takim niewątpliwie mamy do czynienia w przypadku układów eksperymentalnych wspomaganym komputerowo. Układy te bowiem wprowadzają wiele nowych, wcześniej nieużywanych, elementów pośredniczących pomiędzy eksperymentatorem a badanym obiektem. Współcześnie bowiem do badań empirycznych wykorzystuje się urządzenia pomiarowe, przetworniki analogowo-cyfrowe, interfejsy oraz komputer wraz z oprogramowaniem (opisane w rozdziale 2), które są takimi elementami pośredniczącymi. Jeszcze pół wieku temu głównym elementem pośredniczącym pomiędzy poznającym podmiotem a poznawanym przedmiotem było urządzenie pomiarowe. Widać

¹¹³ Na przykład klasyczny już podręcznik na polskim rynku wydawniczym: H. Szydłowski, *Pracownia fizyczna wspomaganą komputerem*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012.

¹¹⁴ Najlepszym tego przykładem na polskim rynku wydawniczym jest przywoływana już monografia z zakresu historii informatyki i jej konsekwencji społecznych: P. Gawrysiak, *Cyfrowa rewolucja...*

zatem, że „odległość” pomiędzy eksperymentatorem a badanym zjawiskiem powiększyła się diametralnie.

Kolejnym pragmatycznym kryterium rewolucji w nauce zaproponowanym przez Shapina jest to, co wpływa na zmianę sposobu uzyskiwania wiedzy o świecie. Związane jest to, według niego, z zamierzoną mechanizacją wytwarzania wiedzy, tj. z pojawieniem się takich reguł metody naukowej, które mają na celu zdyscyplinowanie produkcji wiedzy przez wyeliminowanie elementów subiektywnych. Nietrudno dostrzec, że w eksperymentach wspomaganych komputerowo mamy do czynienia z taką radykalną zmianą sposobu uzyskiwania wiedzy o świecie, z której wyeliminowano elementy subiektywne poprzez cyfrowe metody akwizycji i archiwizacji danych empirycznych. Współcześnie bowiem to komputer, a nie podmiot eksperymentujący, pobiera dane empiryczne z urządzeń pomiarowych oraz precyzyjnie steruje przebiegiem eksperymentu. Komputer jest także odpowiedzialny za gromadzenie i przetwarzanie danych empirycznych, a często odbywa się to automatycznie, bez udziału eksperymentatora. Komputer może również sam formułować proste prawa fenomenologiczne, tj. dokonywać uogólnień indukcyjnych, przeszukując i analizując cyfrowe bazy danych empirycznych. Można zatem stwierdzić, że komputer w badaniach eksperymentalnych w wielu przypadkach zastępuje badacza, to zaś radykalnie zmienia sposób uzyskiwania wiedzy o świecie.

Trzecim kryterium rewolucji zaproponowanym przez Shapina jest zmiana celu badań naukowych, co związane jest z dążeniem do wykorzystywania nowej, zreformowanej wiedzy o przyrodzie do realizacji celów moralnych, społecznych i politycznych. W tym przypadku trudno wskazać radykalną zmianę celów badawczych, gdy są one wspomagane komputerowo. Można jednak zauważyć ogólny wpływ użycia komputerów we wszystkich niemalże przejawach życia społecznego, co doprowadziło do tzw. rewolucji informacyjnej¹¹⁵ oraz powstania tzw. społeczeństwa informacyjnego¹¹⁶. Można więc zaryzykować tezę, że współcześnie komputery mogą mieć wpływ i tym samym pomagają w realizacji różnorodnych celów społecznych i politycznych, co jednak niekoniecznie musi być wprost związane z badaniami naukowymi wspomaganymi komputerowo.

Powyższe rozważania sugerują, że większość kryteriów rewolucji zaproponowanych przez Shapina jest spełniona, gdy następuje zmiana z analogowego na cyfrowy sposób przeprowadzania badań eksperymentalnych. Komputer bowiem, będący częścią układu eksperymentalnego, powoduje, że radykalnie zmienia się „odległość” pomiędzy poznającym podmiotem a poznawanymi

¹¹⁵ Szerzej o problemie rewolucji informacyjnej w: tamże.

¹¹⁶ Powstaniu nowej epoki społeczeństwa informacyjnego poświęcona jest przywoływana już obszerna monografia: J. Papińska-Kacperek (red.), *Spółeczeństwo...*

przedmiotami przyrody oraz sposób uzyskiwania wiedzy o świecie. Tak więc, biorąc pod uwagę nawet tak ogólne i nie do końca precyzyjne kryteria Shapina, można powiedzieć, że komputer zrewolucjonizował badania eksperymentalne.

Najciekawszą propozycją rewolucji w nauce, gdyż jednoznacznie eksperymentalistyczną, jest, przywołana wcześniej, koncepcja Hackinga. Autor ten, o czym wspomniałem, a co warto podkreślić, wymienia cztery zasadnicze składniki rewolucji naukowych niemających charakteru teoretycystycznego. Nietrudno dostrzec, że zastosowanie wspomaganie komputerowego w badaniach eksperymentalnych z najlepszym przybliżeniem spełnia założenia Hackinga dotyczące rewolucyjnych przemian w aparaturze badawczej. Komputer jest interdyscyplinarnym narzędziem badawczym. Używa się go powszechnie we wszystkich naukach empirycznych jako narzędzia wspomagającego badania eksperymentalne oraz służące do numerycznej analizy uzyskanych wyników (funkcje 1–7 komputera wymienione we wstępie do rozdziału 2). Ponadto we wszystkich naukach jest to narzędzie, dzięki któremu prezentuje się otrzymane wyniki oraz komunikuje się z innymi ośrodkami badawczymi (funkcje 8–9).

Zastosowanie komputera w badaniach eksperymentalnych doprowadziło także do ogromnych zmian w produkcji i dystrybucji aparatury badawczej. Powstały wyspecjalizowane firmy, które produkują przyrządy pomiarowe, będące funkcjonalnymi całościami złożonymi z urządzeń pomiarowych, przetworników analogowo-cyfrowych i interfejsów. Są one specjalnie projektowane tak, aby mogły współpracować z komputerem. Ponadto pojawiły się także firmy software'owe, zajmujące się projektowaniem i wdrażaniem oprogramowania służącego tylko i wyłącznie do wspomaganie badań doświadczalnych (co zostało opisane szerzej w podrozdziale 2.5). Utworzono także zupełnie nowe instytucje naukowe, których celem jest udostępnianie mocy obliczeniowej superkomputerów przystosowanych do numerycznych analiz naukowych (np. wspomniany w podrozdziale 4.2 *Worldwide Large Hadron Collider Computing Grid*).

Komputer używany w badaniach eksperymentalnych doprowadził także do radykalnych zmian w strukturze nauki, tj. do przeorganizowania społeczeństwa nauki. Współcześnie bowiem mniejsze znaczenie mają poszczególne, lokalne ośrodki badawcze, a niemalże wszystkie ważne badania prowadzone są w ramach międzyuczelnianych, międzynarodowych, ogólnościatowych, olbrzymich projektów badawczych, których istnienie opiera się na dwóch głównych filarach. Pracę prowadzi się w ogromnych, skomputeryzowanych ośrodkach badawczych, a uzyskiwane dane empiryczne analizowane są dzięki elektronicznej komunikacji przez naukowców z całego świata. Najlepiej widoczne jest to na przykładzie LHC w CERN (co zostało opisane szczegółowo w podrozdziale 4.2).

Pojawiają się także nowe subdyscypliny naukowe, np. fizyka komputerowa zajmująca się zastosowaniem komputerów w badaniach fizycznych. Jej powstanie możliwe było dopiero wtedy, gdy komputery uzyskały odpowiednią moc obliczeniową i stały się powszechnie dostępne. Przedmiot jej zainteresowań można z grubsza podzielić na dwie odrębne części: teoretyczną fizykę komputerową, której głównym obszarem działania jest rozwiązywanie problemów fizycznych metodami numerycznymi (o czym pisałem w paragrafie 3.2.1), oraz doświadczalną fizykę komputerową, która zajmuje się głównie zastosowaniem komputerów w eksperymentach fizycznych (o czym traktował rozdział 2).

Hacking twierdzi także, że rewolucje w aparaturze badawczej pociągają za sobą dość istotne zmiany w naszym światopoglądzie i poznawczym stosunku do świata. Zastosowanie komputerów w badaniach empirycznych zmieniło nie tylko obraz świata, ale i Wszechświata. Dzięki skomputeryzowanym aparatom badawczym udało się zbadać z niespotykaną dotąd dokładnością tzw. promieniowanie reliktowe (np. satelita WMAP zmierzył anizotropie w rozkładzie promieniowania mikrofalowego z dokładnością do 0,2 stopnia, co umożliwiło oszacowanie z dużą dokładnością wieku Wszechświata oraz proporcji między materią świecącą a ciemną), występowanie czarnych dziur w centrach galaktyk (np. program badawczy teleskopu Hubble'a dowiódł, że masy czarnych dziur w centrach galaktyk są silnie skorelowane z rozmiarami tych ostatnich), przyspieszoną ekspansję Wszechświata (odkrytą poprzez obserwacje odległych supernowych za pomocą sterowanych cyfrowo: teleskopu Hubble'a i teleskopów Kecka) oraz wiele innych zjawisk.

Należy zatem stwierdzić, że stosując kryteria rewolucji w nauce zaproponowane przez Hackinga, można sformułować tezę, iż komputer zrewolucjonizował badania eksperymentalne, gdyż wprowadzenie tego narzędzia badawczego niewątpliwie ma charakter interdyscyplinarny. W związku z zastosowaniem komputerów w naukach empirycznych powstają nowe instytucje społeczne oraz zachodzą radykalne zmiany w strukturze nauki. Rewolucja ta pociąga za sobą także dość istotne zmiany w naszym światopoglądzie i poznawczym stosunku do świata.

Komputer zrewolucjonizował badania eksperymentalne jeszcze w jednym sensie. Gdy porówna się elementy prac laboratoryjnych zaproponowane przez Hackinga (a szczegółowo opisane w podrozdziale 1.3) z dziesięcioma podstawowymi funkcjami komputera w naukach empirycznych (opisanymi we wstępie do rozdziału 2), to nietrudno stwierdzić, że większość z nich została skomputeryzowana. Oznacza to, iż niemalże wszystkie prace laboratoryjne wykonuje się współcześnie z użyciem wspomagania komputerowego, co jeszcze kilkadziesiąt lat temu było niemożliwe do realizacji.

W podrozdziale 1.3 szczegółowo opisałem piętnaście elementów taksonomii prac eksperymentalnych, które Hacking podzielił na trzy grupy: idee,

rzeczy i znaki. W grupie idei usytuował on rozmaite rodzaje pytań i teorii składających się na intelektualne składniki przeprowadzanych eksperymentów. Zaliczył do nich: pytania, wiedzę podstawową, teorię systematyczną, hipotezy lokalne (fenomenologiczne) oraz modelowanie aparatury badawczej. Symulacje komputerowe (omówione w paragrafie 3.2.1) przeprowadzane są wtedy, gdy chcemy uzyskać odpowiedzi na jakieś ważne pytania, dotyczące np. projektowania i optymalizacji nowych, wspomaganych komputerowo, zestawów eksperymentalnych (jest to siódma funkcja komputera w badaniach eksperymentalnych wymieniona we wstępie do rozdziału 2). Symulacje te przeprowadza się na podstawie zaprogramowanej w systemie komputerowym wiedzy podstawowej, teorii systematycznej i hipotez lokalnych. Bez takiego intelektualnego zaplecza, które dałoby się przełożyć na jakiś język komputerowy, symulacje komputerowe są niemożliwe do przeprowadzenia. Komputer, jako narzędzie wykonujące wiele ważnych poznawczo symulacji komputerowych, jest bardzo często obecny we współczesnej pracy naukowej, którą Hacking zalicza do idei. Pięć pierwszych elementów pracy eksperymentalnej wymienionych przez tego autora z powodzeniem wspomaganych jest współcześnie przez systemy komputerowe dokonujące symulacji komputerowych (wymienione we wstępie do rozdziału 2 jako szóste zadanie komputera w badaniach eksperymentalnych). Wykonuje się je na przykład po to, aby w świecie wirtualnym sprawdzić, czy projektowana aparatura badawcza będzie mogła służyć do realizacji danych celów poznawczych w kontekście założonej wiedzy, teorii i hipotez¹¹⁷. Tak więc pięć pierwszych elementów taksonomii prac laboratoryjnych Hackinga pokrywa się z dwiema funkcjami komputera w naukach empirycznych (pytania, wiedza podstawowa, teoria systematyczna i hipotezy lokalne – funkcja 6, modelowanie stosowanej aparatury badawczej – funkcja 7).

Wcześniej zaznaczyłem, że Hacking do przedmiotowych składników praktyki laboratoryjnej zalicza wszystkie te elementy, które podpadają pod kategorię rzeczy. Opisałem wtedy szczegółowo te elementy, które zalicza on do rzeczy: obiekt badania, źródła modyfikacji, detektory, narzędzia i sprawcy danych. W rozdziale 2 omówiłem także zasadniczą dla rozważań zawartych w książce rolę komputera w badaniach empirycznych (we wstępie do rozdziału 2 została wymieniona jako pierwsza), jaką jest pobieranie danych empirycznych z urządzeń pomiarowych przez przetworniki analogowo-cyfrowe i interfejsy oraz sterowanie przebiegiem eksperymentu przez przetworniki cyfrowo-analogowe i urządzenia wykonawcze. Zestawiając z sobą kategorię rzeczy Hackinga z pierwszą funkcją komputera w badaniach naukowych,

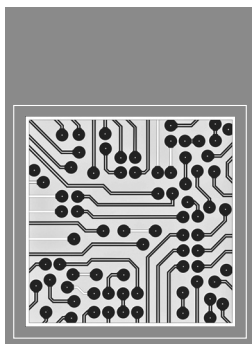
¹¹⁷ Do tego celu służy np. oprogramowanie GEANT4. Por. A. Konefał, *Symulacje metodą Monte Carlo za pomocą oprogramowania GEANT4*, „Postępy Fizyki” 2006, t. 57, z. 6, s. 242–251.

można zauważyć, że pokrywa się ona z czterema składnikami praktyki eksperymentalnej tegoż autora: źródłami modyfikacji, detektorami, narzędziami i sprawcami danych. Za pomocą systemów komputerowego wspomaganie pracy eksperymentalnej można znacznie precyzyjniej: wywoływać zmiany w badanym obiekcie, mierzyć sygnały pochodzące od niego, sterować przebiegiem prac eksperymentalnych oraz pobierać dane empiryczne z detektorów. Można zatem postawić tezę, że komputerowe wspomaganie stało się współcześnie głównym elementem przedmiotowych składników praktyki laboratoryjnej wymienionych przez Hackinga. Obiekt badania znacznie precyzyjniej może być badany i modyfikowany, gdy użyjemy komputera w badaniach eksperymentalnych. Tak więc cztery elementy przedmiotowych składników praktyki laboratoryjnej Hackinga (źródła modyfikacji, detektory, narzędzia, sprawcy danych) współcześnie wspomagane są przez systemy komputerowe (pierwsza funkcja komputera w naukach empirycznych, szczegółowo opisana w rozdziale 2).

Trzecią grupę, szczegółowo omówionych wcześniej, elementów w taksonomii Hackinga stanowią dane (wyniki) eksperymentów, a dokładniej – wszystkie operacje, jakie mogą być na nich dokonywane. Oprócz otrzymanych danych (wyników) są to: oszacowanie danych, ich redukowanie, analizowanie oraz ich interpretacja. We współczesnych układach eksperymentalnych (omówionych w rozdziale 2) wyniki eksperymentów są gromadzone i przetwarzane przy użyciu zaawansowanych systemów komputerowych. Komputer bowiem odpowiedzialny jest za akwizycję i archiwizację danych empirycznych (drugie zadanie komputera w naukach empirycznych ze wstępu do rozdziału 2). Z wykorzystaniem wyspecjalizowanego oprogramowania analizuje dane empiryczne w kontekście pytań i teorii zakładanych w trakcie eksperymentowania (funkcja trzecia ze wstępu do rozdziału 2). Komputer jest też w stanie sam formułować proste prawa fenomenologiczne jako efekt uogólnień indukcyjnych tworzonych na podstawie cyfrowych baz danych empirycznych (funkcja czwarta). Istnieją także metody numerycznego uzasadniania przeprowadzania kolejnych eksperymentów (funkcja piąta) nawiązujące do różnego typu technik symulacji komputerowych (funkcja szósta). Komputer jest ponadto w stanie dokonywać wizualizacji otrzymanych wyników (funkcja ósma). Nietrudno zatem zauważyć, że pięć ostatnich elementów taksonomii prac laboratoryjnych Hackinga pokrywa się z sześcioma zadaniami komputera w naukach empirycznych (dane – funkcja 2, oszacowanie danych – funkcja 3, redukowanie danych – funkcja 3, analizowanie danych – funkcja 3 i 4, interpretacja – funkcje 4, 5, 6 i 8).

Niemalże wszystkie elementy prac laboratoryjnych wyszczególnione w taksonomii Hackinga (jedynie z wyjątkiem obiektu badań) podlegają współcześnie komputerowemu wspomaganie. Akwizycja i archiwizacja danych

empirycznych, ich przetwarzanie w kontekście przyjętych założeń o charakterze teoretycznym oraz wizualizacja otrzymanych wyników odbywa się z użyciem systemów komputerowego wspomaganie badań doświadczalnych. Należy zatem stwierdzić, że współczesne badania eksperymentalne mogą być i są prowadzone głównie z użyciem komputerów. To przejście od analogowej do cyfrowej pracy eksperymentalnej można uznać za zmianę rewolucyjną. Szczególnie dobrze widoczne jest to w kontekście kryteriów rewolucji zaproponowanych przez Hackinga i Shapina, choć także teoretyczystyczne ustalenia Kuhna i Cohena są pomocne, aby argumentować na rzecz tej tezy. Wydaje się więc, że pozytywną odpowiedź na postawione w tytule niniejszego podrozdziału pytanie uznać można za wystarczająco uzasadnioną.



Zakończenie

Współcześnie w naukach doświadczalnych komputer pełnić może wiele różnych funkcji. Może służyć do pobierania danych empirycznych z urządzeń pomiarowych dzięki przetwornikom analogowo-cyfrowym oraz interfejsom. Może także sterować przebiegiem eksperymentu dzięki przetwornikom cyfrowo-analogowym, interfejsom oraz urządzeniom wykonawczym (por. rozdział 2). Komputer może być także używany do tworzenia cyfrowych baz danych empirycznych (por. podrozdział 2.4) oraz porównywania tych danych z ustaleniami teoretycznymi (por. podrozdziały 2.5, 3.2 oraz 4.2). Oprogramowanie może służyć do formułowania prostych praw fenomenologicznych (por. paragraf 3.2.2) oraz numerycznie uzasadniać przeprowadzanie kolejnych eksperymentów (por. podrozdział 3.2 i rozdział 4). Komputer może być także specyficznym narzędziem badawczym wykonującym różnorodne symulacje przebiegu zjawisk i procesów (por. paragraf 3.2.1) oraz służącym do projektowania i optymalizacji nowych, wspomaganých komputerowo zestawów eksperymentalnych (por. podrozdział 4.2). Współczesne urządzenia cyfrowe służyć mogą także do wizualizacji danych empirycznych oraz otrzymanych wyników analiz numerycznych (por. paragraf 3.2.1). Użyć ich można również do elektronicznej komunikacji pomiędzy ośrodkami naukowymi oraz do optymalizacji procesów komunikacyjnych między człowiekiem a komputerem (por. podrozdziały 3.2 oraz 4.2).

Przeprowadzone analizy metodologiczne eksperymentów wspomaganých komputerowo sugerują, że wprowadzenie komputerowego wspomagania badań doświadczalnych powoduje „oddalenie” eksperymentatora od badanego obiektu oraz pojawienie się zupełnie nowych artefaktów, które nie mogły się pojawić w eksperymentach przeprowadzanych bez użycia komputerów (por. paragraf 3.1.1). Zastosowanie komputerów w badaniach eksperymentalnych wprowadza także nowe jakościowo metody interpretacji wyników ekspe-

rymentów (np. całkowanie numeryczne, szybka transformata Fouriera itd.) oraz nowe jakościowo sposoby uzasadniania numerycznego (por. paragraf 3.2.1). Ponadto użycie komputera wraz z oprogramowaniem do analizy danych napływających z przyrządu pomiarowego powoduje, że niemalże każda skomputeryzowana obserwacja będzie obserwacją pośrednią w sensie Boniolo.

Komputery poszerzają także możliwości poznawcze podmiotu eksperymentującego. Ich zastosowanie pozwala bowiem na wykonywanie wielu prac badawczych, które bez cyfrowego wspomaganie byłyby niemożliwe. Niewątpliwe i bezdyskusyjne są także zmiany ilościowe w eksperymentach z komputerowym wspomaganie badań doświadczalnych. Eksperymentator posługujący się komputerem otrzymuje szybkie i precyzyjne narzędzie służące do rejestracji pomiarów i przeprowadzania obliczeń.

Jedną z ważnych metod komputerowego poszerzania możliwości poznawczych podmiotu eksperymentującego są także symulacje komputerowe. Stanowią one specyficzny pomost pomiędzy pracą teoretyczną a eksperymentalną. Ujęcie teoretyczne zaimplementowane do programu komputerowego służącego do przeprowadzania symulacji jest praktycznie użyteczne jako swoiste wirtualne laboratorium. Badacz może oddziaływać na oprogramowanie w sposób przypominający pracę eksperymentalną (por. paragraf 3.2.1). Symulacje umożliwiają bowiem wykonywanie na obiektach teoretycznych (reprezentacjach, symbolach, modelach) operacji typowo eksperymentalnych (manipulacje tymi przedmiotami oraz obserwacja zachodzących zdarzeń). Eksperymentator może także korzystać z oprogramowania wspomagającego planowanie eksperymentów, późniejszą ich realizację oraz analizę danych empirycznych. Niemożliwa jest jednak całkowita automatyzacja odkrycia naukowego (por. paragraf 3.2.2).

Instrumentarium używane podczas badań eksperymentalnych wspomaganym komputerowo implikuje wszakże konieczność przeformułowania wielu tez wysuwanych przez zwolenników nowego eksperymentalizmu. To bowiem, że nowy eksperymentalizm, jako kierunek metodologiczny proponowany, aby dokonać adekwatnego opisu pracy laboratoryjnej, pomija rolę komputera w badaniach eksperymentalnych, jest – moim zdaniem – największym przeoczeniem filozofów nauki będących jego twórcami. Już w czasie powstawania tego kierunku (w latach osiemdziesiątych XX wieku) bardzo ważną rolę w badaniach doświadczalnych odgrywały komputery. Na przykład w analizowanym przez Hackinga, eksperymencie PEGGY II to właśnie komputer odpowiedzialny był za zapisywanie kierunku polaryzacji dla każdego impulsu. Warto zatem podkreślić, że bez komputera całe urządzenie badawcze nie mogłoby działać we właściwy sposób. Ze względu na to ważne przeoczenie nowy eksperymentalizm nie jest koncepcją metodologiczną adekwatnie rekonstruującą współczesną praktykę eksperymentalną, która

w istotnej mierze wspomagana jest przez różnorodne urządzenia cyfrowe. Na przykład problemu demaskowania artefaktów w układach eksperymentalnych wspomaganych komputerowo nie da się rozwiązać metodami zaproponowanymi przez Hackinga (na podstawie sieci, na podstawie koincydencji, metodą ślepej próby) ani nawet przez ich modyfikacje (por. podrozdział 4.1).

Nowi eksperymentalniści zakładają dualizm kultur: teoretycznej i eksperymentalnej. Istnieją dla nich tylko te dwie podstawowe opcje w filozofii nauki, tj. skupianie się bądź na zagadnieniach teorii, bądź na zagadnieniach eksperymentu. Tym samym, tak ważne dla współczesnej nauki, zagadnienia związane z eksperymentami przeprowadzanymi na modelach matematycznych (symulacje komputerowe) nie mogą być analizowane z perspektywy tego kierunku metodologicznego. Ponadto akcentują oni tylko fakt wybiórczości teorii, a nie dostrzegają faktu wybiórczości eksperymentu, podczas gdy każdy układ eksperymentalny wspomagany komputerowo jest wybiórczy w tym sensie, że może badać tylko wybrany aspekt złożonych zjawisk (por. podrozdział 4.1).

Według Hackinga współczesna technologia rozszerza granice ludzkiej świadomości i wiedzy. Nie zauważa on jednak faktu, że to właśnie komputer jest współcześnie najważniejszym urządzeniem badawczym skutecznie poszerzającym możliwości poznawcze podmiotu eksperymentującego. Współcześnie bowiem to właśnie komputery przyczyniają się do rozszerzenia pojęcia obserwowalności. Podobnie jak teleskopy i mikroskopy, komputery odsłaniają przed naukowcami nowe horyzonty, umożliwiając np. modelowanie różnych zjawisk, od zderzeń galaktyk poczynając, a na reakcjach chemicznych kończąc (por. podrozdział 4.1). To właśnie dzięki komputerom wspomagającym badania eksperymentalne można widzieć znacznie więcej, a w wielu przypadkach to właśnie zastosowanie komputerowego wspomagania badań doświadczalnych w ogóle umożliwia współczesne badania eksperymentalne (por. podrozdział 4.2).

Bez wspomagania komputerowego wielu ważnych współczesnych eksperymentów naukowych nie można byłoby przeprowadzić, i to z dwóch ważnych powodów. Mamy do czynienia ze zbyt dużą ilością danych empirycznych napływających jednocześnie ze zbyt wielu urządzeń pomiarowych, a ponadto przeprowadzenie współczesnych badań eksperymentalnych związane jest z koniecznością użycia bardzo precyzyjnych systemów sterowania skomplikowanymi urządzeniami wykonawczymi. Najlepiej jest to widoczne na przykładzie urządzenia badawczego o nazwie *Large Hadron Collider* (Wielki Zderzacz Hadronów) zainstalowanego w laboratorium CERN. Komputer umożliwia więc współczesne badania eksperymentalne (por. podrozdział 4.2). Jest on także bardzo ważnym elementem determinującym zmianę stylu badań eksperymentalnych.

We współczesnych naukach empirycznych systemy komputerowego wspomagania badań doświadczalnych są powszechnie stosowanym standardem, a naukowcy myślą głównie o komputerowych sposobach rozwiązywania swoich problemów badawczych. Urządzenia cyfrowe to współcześnie wzorcowe układy służące do przeprowadzania takich badań oraz interpretacji uzyskanych w ten sposób wyników (por. rozdział 2). Stąd nasuwający się wniosek, że koncepcja stylu myślowego Flecka wystarcza, aby zdać sobie sprawę z faktu, iż w dzisiejszych naukach empirycznych mamy do czynienia z komputerowym stylem myślowym (por. podrozdział 4.3).

Warto podkreślić, że współcześnie niemalże wszystkie procedury badawcze nauk empirycznych (np. odkrywanie, uzasadnianie, wyjaśnianie, klasyfikowanie itd.) są wspomagane komputerowo. Komputer może pełnić wiele różnych funkcji w naukach empirycznych (por. wstęp do rozdziału 2). Możemy zatem mówić o komputerowym stylu badań eksperymentalnych. Jego rozszerzeniem jest komputerowy styl badań naukowych. Szczególnie charakterystyczne dla niego są dwa składniki konstytutywne zaproponowane przez Crombiego: typ stosowanego dowodzenia oraz nawyki umysłowe. Ich wspólnym mianownikiem jest komputer jako narzędzie, dzięki któremu współcześnie dokonuje się większości odkryć, i jako narzędzie służące do porównywania danych empirycznych z danymi teoretycznymi. Badanie różnorodnych obiektów i zjawisk za pomocą urządzeń cyfrowych jest także charakterystycznym nawykiem umysłowym większości naukowców pod koniec XX i na początku XXI wieku (por. podrozdział 4.3).

Dominujący we współczesnych badaniach eksperymentalnych komputerowy styl badań jest konsekwencją zmiany rewolucyjnej, jaka dokonała się za sprawą komputerów w badaniach eksperymentalnych. Najbardziej znaną koncepcję rewolucji naukowych zaproponował Kuhn. Jeśli weźmie się pod uwagę instrumentalne kryteria postępu w nauce, np. zdolność do stawiania i rozwiązywania łamigłówek, to nietrudno zauważyć, że potencjał w tym zakresie badań eksperymentalnych wspomaganych komputerowo jest znacznie większy niż badań prowadzonych bez takiego wspomaganie. Tak więc zastosowanie komputera w naukach empirycznych byłoby rewolucyjne wówczas, gdyby większość naukowych problemów rozwiązywana była za pomocą systemów komputerowych. Warto przypomnieć, że z tym mamy do czynienia od lat osiemdziesiątych XX wieku, gdy powszechnie zaczęto stosować w naukach empirycznych systemy komputerowego wspomaganie badań eksperymentalnych. Tak więc, gdy rewolucję rozumieć jako zmianę wzorca rozwiązywania problemów naukowych i uwzględnić instrumentalne kryteria postępu, to przejście od analogowych do cyfrowych badań empirycznych uznać można za zmianę rewolucyjną (por. podrozdział 4.4).

Dzięki komputerowemu wspomaganiu rozszerza się także świat (można badać znacznie więcej obiektów), w którym naukowcy prowadzą swoje badania, co pociąga za sobą zmiany natury ontologicznej. Świat, w którym eksperymentuje się ze wspomaganiami cyfrowymi, jest niewspółmierny ontologicznie ze światem, w którym badania przeprowadza się bez komputerowego wspomaganie. Inne są także metody pracy naukowej w ramach eksperymentów analogowych i cyfrowych. Mamy zatem do czynienia również ze zmiennością (niewspółmiernością) metodologiczną, gdy przechodzimy od analogowych do cyfrowych badań eksperymentalnych. Można także zauważyć pewne cechy niewspółmierności obserwacyjnej (bity zamiast atomów) i językowej (zera i jedynki w cyfrowych bazach danych empirycznych zamiast formuł analitycznych).

Wyznacznikiem rewolucyjnej zmiany, według Kuhna, jest niewspółmierność, a w przypadku przejścia od analogowej do cyfrowej pracy eksperymentalnej mamy do czynienia z takimi niewspółmiernościami. Sugerują one, że tego typu zmiana miała charakter rewolucyjny. Problematiczne jest jednak to, że w tym wypadku nie zachodzi zmiana o charakterze teoretycznym, ale mamy do czynienia ze zmianą rewolucyjną, będącą konsekwencją doskonalenia sprzętu badawczego (por. podrozdział 4.4).

W ramach kryteriów rewolucji naukowej zaproponowanych przez Cohena można także uznać komputer za narzędzie badawcze, które zrewolucjonizowało prace eksperymentalne, bowiem wprowadzenie komputerowego wspomaganie tych badań diametralnie zmieniło sposób pracy naukowej. W większości współczesnych prac eksperymentalnych znajdziemy wzmianki o oprogramowaniu, za pomocą którego dokonywano obliczeń, analiz i wizualizacji wyników badań. Pojawiają się także podręczniki służące studentom do nauki eksperymentowania wspomaganego komputerowo. Historycy nauki przekonują natomiast, że pojawienie się komputera, rozwój jego możliwości i różnorodności zastosowań zmienia całą współczesną kulturę, łącznie z nauką końca XX i początku XXI wieku (por. podrozdział 4.4).

Zgodnie z pragmatycznymi kryteriami rewolucji w nauce zaproponowanymi przez Shapina także możemy mówić o cyfrowej rewolucji w badaniach eksperymentalnych. Według niego z pytaniem dotyczącym tego, co wiadomo o przyrodzie, skorelowana ma być depersonalizacja wiedzy, tj. oddzielenie poznającego podmiotu od poznawanych przedmiotów przyrody. Z czymś takim mamy niewątpliwie do czynienia w przypadku układów eksperymentalnych wspomaganymi komputerowo. Pojawiło się w nich bowiem wiele nowych elementów pośredniczących między eksperymentatorem a badanym obiektem (przetworniki analogowo-cyfrowe, interfejsy, komputery, oprogramowanie itd.). W przypadku eksperymentów wspomaganymi komputerowo mamy do

czynienia także z radykalną zmianą sposobu uzyskiwania wiedzy o świecie, z której wyeliminowano elementy subiektywne poprzez cyfrowe metody akwizycji i archiwizacji danych empirycznych. Można także zauważyć ogólny wpływ użycia urządzeń cyfrowych we wszystkich niemalże przejawach życia społecznego, co w powszechnej opinii doprowadziło do powstania tzw. społeczeństwa informacyjnego (por. podrozdział 4.4).

Większość kryteriów rewolucji zaproponowanych przez Shapina jest spełnionych, gdy następuje zmiana z analogowego na cyfrowy sposób przeprowadzania badań eksperymentalnych, co także dostrzec można w ramach eksperymentalistycznej koncepcji rewolucji w nauce zaproponowanej przez Hackinga. Zastosowanie wspomagania komputerowego w badaniach eksperymentalnych z najlepszym przybliżeniem spełnia właśnie założenia Hackinga dotyczące rewolucyjnych przemian w aparaturze badawczej. Komputer jest bowiem interdyscyplinarnym narzędziem badawczym. Używa się go powszechnie we wszystkich naukach empirycznych jako narzędzia wspomagającego badania eksperymentalne oraz służącego do numerycznej analizy uzyskanych wyników. Ponadto we wszystkich naukach jest to narzędzie, dzięki któremu prezentuje się otrzymane wyniki oraz komunikuje się z innymi ośrodkami badawczymi. Zastosowanie komputera w badaniach eksperymentalnych doprowadziło także do ogromnych zmian w produkcji i dystrybucji aparatury badawczej. Powstały wyspecjalizowane firmy, które produkują przyrządy pomiarowe specjalnie projektowane tak, aby mogły współpracować z komputerem. Pojawiły się także firmy wdrażające oprogramowanie służące do wspomagania badań doświadczalnych. Utworzono także zupełnie nowe instytucje naukowe, których celem jest udostępnianie mocy obliczeniowej superkomputerów do prac badawczych.

Komputer używany w badaniach eksperymentalnych doprowadził także do radykalnych zmian w strukturze nauki. Pracę prowadzi się w olbrzymich, skomputeryzowanych ośrodkach badawczych, a uzyskane dane empiryczne analizowane są dzięki elektronicznej komunikacji przez naukowców z całego świata. Pojawiają się także nowe subdyscypliny naukowe, np. fizyka komputerowa (teoretyczna fizyka komputerowa, doświadczalna fizyka komputerowa). Ponadto zastosowanie komputerów w badaniach empirycznych zmieniło nasz obraz Wszechświata (por. podrozdział 4.4).

Stosując kryteria rewolucji w nauce zaproponowane przez Hackinga, można sformułować tezę, że komputer zrewolucjonizował badania eksperymentalne. Do podobnego wniosku można dojść, porównując elementy prac laboratoryjnych zaproponowane przez Hackinga z dziesięcioma podstawowymi funkcjami komputera w naukach empirycznych. Większość z nich została skomputeryzowana, co oznacza, że niemal wszystkie prace laboratoryjne wykonuje się współcześnie z użyciem wspomagania cyfrowego, co jeszcze

kilkadziesiąt lat temu było niemożliwe. Akwizycja i archiwizacja danych empirycznych, ich przetwarzanie w kontekście przyjętych założeń o charakterze teoretycznym oraz wizualizacja otrzymanych wyników odbywa się z użyciem systemów komputerowego wspomaganie badań doświadczalnych. Można zatem powiedzieć, że współczesne badania eksperymentalne prowadzone są głównie z użyciem komputerów. To przejście od analogowej do cyfrowej pracy eksperymentalnej uznać można za zmianę rewolucyjną. Szczególnie dobrze widoczne jest to w kontekście kryteriów rewolucji zaproponowanych przez Hackinga i Shapina, choć także teoretyczystyczne ustalenia Kuhna i Cohena są pomocne, aby argumentować na rzecz tej tezy.

Warto także dodać, że opisywana na wiele sposobów cyfrowa rewolucja cywilizacyjna zbanalizowała rewolucję w nauce, jaka dokonała się w niej za sprawą komputerów. Być może jednak nie jest tak, że cyfrowa rewolucja w badaniach eksperymentalnych to tylko konsekwencja wcześniejszej cyfrowej rewolucji cywilizacyjnej. Powstanie samego komputera (ENIAC) było przecież skutkiem zapotrzebowania militarno-naukowego dotyczącego obliczeń trajektorii lotów, symulacji reakcji łańcuchowych, projektowania tuneli aerodynamicznych oraz badania promieniowania kosmicznego itp. Powstanie Internetu było również konsekwencją militarno-naukowych inspiracji (*Advanced Research Project Agency* zainicjowała powstanie pierwszej sieci ARPANET, która połączyła ze sobą cztery ośrodki naukowe realizujące badania wojskowe w Stanach Zjednoczonych: Uniwersytet Kalifornijski w Los Angeles i Santa Barbara, Uniwersytet Utah w Salt Lake City oraz Uniwersytet Stanforda w Menlo Park). Pojawienie się technologii WWW, która zrewolucjonizowała i zwiirtualizowała relacje społeczne, jest już tylko wynikiem potrzeb naukowych (naukowcy z CERN stworzyli projekt sieci dokumentów hipertekstowych, o nazwie *World Wide Web*). Inspiracją powstania tego rozwiązania było ułatwienie wyszukiwania odnośników w tekstach naukowych (kliknięcie w odsyłacz w danym tekście naukowym umożliwiało automatyczne przechodzenie do cytowanego dokumentu). Może zatem cyfrowa rewolucja cywilizacyjna jest raczej konsekwencją cyfrowej rewolucji w badaniach eksperymentalnych?

Niewątpliwie jest jednak to, że komputer w bardzo dużym stopniu uczestniczy w procesie współczesnych badań naukowych, wyznacza nowy, tj. komputerowy styl tych badań. Zastosowanie komputera z pewnością zrewolucjonizowało badania eksperymentalne w ramach wielu dziedzin naukowych. Z drugiej strony nie można jednak pomijać tego, że istnieje sporo ograniczeń zarówno samego komputera, jak i układów eksperymentalnych wspomaganych komputerowo. Czy możliwa jest kolejna rewolucja w naukowych obliczeniach numerycznych? Jedną z możliwości daje nowa dyscyplina – informatyka kwantowa, która zajmuje się wykorzystaniem zjawisk kwantowych do szyb-

kiego przesyłania i przetwarzania informacji, a także bezpieczeństwem tego przekazu, niemożliwym do osiągnięcia za pomocą dotychczas stosowanych metod i urządzeń. Wydaje się bowiem, że komputery kwantowe są w stanie wykonać to, czego nie mogą wykonywać komputery klasyczne, to znaczy te, które są aktualnie produkowane i sprzedawane.

Już w roku 1985 David Deutsch¹ zaprezentował projekt kwantowej maszyny obliczeniowej oparty na rejestrze kwantowych układów dwupoziomowych oraz zestaw uniwersalnych operacji unitarnych służących do przetwarzania informacji. Są to tzw. bramki kwantowe, których różne konfiguracje mogą realizować różne algorytmy kwantowe. Pierwsze algorytmy kwantowe, które pozwalały wykonać konkretne zadania szybciej niż algorytmy klasyczne, powstały we wczesnych latach dziewięćdziesiątych XX wieku. Jednakże po roku 1994, kiedy to Peter Shor² przedstawił kwantowy algorytm faktoryzacji liczb, nastąpiło duże zainteresowanie obliczeniami kwantowymi. Algorytm ten jest efektywny, gdyż liczba niezbędnych operacji rośnie jedynie wielomianowo z liczbą cyfr będących danymi wejściowymi (w algorytmach klasycznych liczba operacji rośnie wykładniczo względem ilości danych wejściowych). Zagadnienie faktoryzacji dużych liczb naturalnych (np. 200 i większych) odgrywa zasadniczą rolę w protokołach szyfrowania informacji. Dlatego też ogłoszenie algorytmu Shora, który rozwiązuje problem rozkładu liczby na czynniki pierwsze wielokrotnie szybciej niż algorytmy klasyczne, spowodowało gwałtowny wzrost zainteresowania informatyką kwantową.

W ciągu kolejnych lat uzyskano sporo ważnych wyników. Lov Grover³ podał kwantowy algorytm przeszukiwania bazy danych składających się z N elementów w celu znalezienia w bazie elementu wyróżnionego (algorytm klasyczny potrzebuje N operacji, aby tego dokonać, a algorytm kwantowy tylko $N^{1/2}$). Podano także schematy kwantowej korekcji błędów, które pozwalają na odtwarzanie zapisanej informacji w przypadku wystąpienia różnych rodzajów szumów. Doprowadziło to do odkrycia schematu obliczeń kwantowych odpornych na błędy. Uogólniając klasyczną teorię informacji, udało się też sformułować podstawy teorii informacji kwantowej. Kluczowym osiągnięciem była praca Benjamina Schumachera⁴, w której uogólnił on do przypadku kwantowego twierdzenie Shannona o kodowaniu informacji klasycznej⁵. W tej

¹ D. Deutsch, *Quantum theory, the Church-Turing principle and the Universal quantum computer*, „Proc. R. Soc. Lond.” 1985, A 400, s. 97–117.

² P.W. Shor, *Algorithms for quantum computation, discrete log and factoring*, „FOCS’35” 1995, no. 124, s. 124–134.

³ L. Grover, *A Fast quantum mechanical algorithm for database search*, „STOC’28” 1996, no. 212, s. 212–219.

⁴ B. Schumacher, *Quantum coding*, „Physical Review” 1995, A 51, s. 2738–2747.

⁵ C.E. Shannon, *A Mathematical Theory of Communication*, „The Bell System Technical Journal” 1948, vol. 27, s. 379–423, 623–656, July, October.

pracy pojawiło się po raz pierwszy pojęcie kubit (*qubit*), oznaczające dowolny układ kwantowy, opisywany w dwuwymiarowej przestrzeni Hilberta. Termin ten powstał jako skrót angielskiego wyrażenia *quantum bit* i szybko przyjął się w literaturze przedmiotu jako określenie podstawowej jednostki informacji kwantowej.

Wiele aktualnych prac badawczych dotyczących opisu korelacji kwantowych oraz nierówności Bella, teorii kwantowego pomiaru i zjawiska dekoherencji jest motywowanych możliwością potencjalnych zastosowań w teorii informacji. Ważną dziedziną badań jest także odkryty przez Erwina Schrödingera efekt kwantowego splątania, wykorzystywany między innymi do kryptografii kwantowej⁶, gęstego kodowania informacji⁷ oraz kwantowej teleportacji⁸.

Chociaż obecnie nie działa jeszcze żaden komputer kwantowy, to ostatnie piętnaście lat przyniosło wiele ciekawych wyników eksperymentalnych. Poprawnie działające bramki kwantowe udało się skonstruować, wykorzystując oddziaływanie spójnych wiązek światła monochromatycznego z pojedynczymi jonami w pułapkach magnetycznych. Alternatywne rozwiązania otrzymano, wykorzystując atomy we wnękach rezonansowych, układy nadprzewodzące, półprzewodnikowe kropki kwantowe, układy spinowe w ciele stałym oraz układy optyki liniowej, w której role kubitów odgrywają poszczególne fotony, a sprzężenie pomiędzy nimi uzyskuje się dzięki procesowi pomiaru.

W dotychczasowych prototypach kwantowych układów obliczeniowych udaje się w sposób stabilny kontrolować najwyżej 10 kubitów⁹. Wykorzystując taki zestaw kubitów do realizacji algorytmu Shora, można rozłożyć na czynniki pierwsze liczbę piętnaście, otrzymując znany rezultat $15 = 5 \times 3$. Abyśmy mogli uzyskać wyniki o znaczeniu praktycznym, trzeba by skonstruować układ składający się ze 100–200 kubitów, na które da się oddziaływać w sposób efektywny. Która z dotychczasowych realizacji fizycznych układu kilku kubitów będzie dała się rozszerzyć na 100 kubitów? Trudno jest jednoznacznie odpowiedzieć na to pytanie. Dotychczasowy postęp technologiczny pozwala mieć nadzieję, że kolejne lata przyniosą nowe, bardziej wydajne realizacje bramek kwantowych. Natomiast zbudowanie przed rokiem 2020 komputera kwantowego, który potrafiłby sfaktoryzować liczbę dwustucyfrową, wydaje się bardzo mało prawdopodobne. Jednakże kiedy to nastąpi, niezbędne będzie

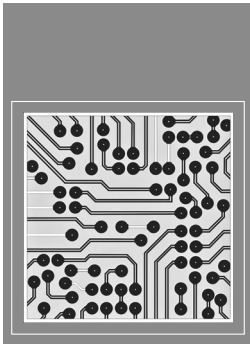
⁶ Por. C.H. Bennett, G. Brassard, A.K. Ekert, *Quantum Cryptography*, „Scientific American” 1992, no. 50, s. 50–57.

⁷ Por. C.H. Bennett, S.J. Wiesner, *Communication via one – and two-particle operators on Einstein-Podolski-Rosen states*, „Phys. Rev. Lett.” 1992, vol. 69, no. 20, s. 2881–2884.

⁸ Por. C.H. Bennett et al., *Teleporting an Unknown Quantum State via Dual Classical and Einstein-Podolski-Rosen Channel*, „Phys. Rev. Lett.” 1993, vol. 70, no. 13, s. 1895–1899.

⁹ Por. M. Le Bellac, *Wstęp do informatyki kwantowej*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012, s. 16.

przeanalizowanie konsekwencji metodologiczno-filozoficznych komputera kwantowego w badaniach naukowych. Może on bowiem umożliwić obliczenia na niedostępnym obecnie poziomie szybkości i złożoności. Być może doprowadzi to do nowych, rewolucyjnych zmian jakościowych w badaniach naukowych XXI wieku.



Bibliografia

- ACKERMANN R.J., *The New Experimentalism*, „Brit. J. Phil. Sci.” 1989, no. 40, s. 185–190.
- AFELTOWICZ Ł., *Laboratoria w działaniu. Innowacja technologiczna w świetle antropologii nauki*, Oficyna Naukowa, Warszawa 2011.
- AYER A.J., *Filozofia w XX wieku*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2000.
- BACON F., *Novum Organum*, PWN, Warszawa 1955.
- BANACHOWSKI L., DIKS K., RYTTER W., *Algorytmy i struktury danych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1999.
- BARROW J.D., *Kres możliwości? Granice poznania i poznanie granic*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2005.
- BARROW J.D., *Księga nieskończoności. Krótki przewodnik po tym, co nieograniczone, ponadczasowe i bez końca*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2008.
- BARZYKOWSKI J. (red.), *Współczesna metrologia. Zagadnienia wybrane*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2004.
- BENNETT C.H., BRASSARD G., CREPEAU C., JOZSA, R. PERES A., WOOTTERS W.K., *Teleporting an Unknown Quantum State via Dual Classical and Einstein-Podolski-Rosen Channel*, „Phys. Rev. Lett.” 1993, vol. 70, no. 13, s. 1895–1899.
- BENNETT C.H., BRASSARD G., EKERT A.K., *Quantum Cryptography*, „Scientific American” 1992, no. 50, s. 50–57.
- BENNETT C.H., WIESNER S.J., *Communication via one – and two-particle operators on Einstein-Podolski-Rosen states*, „Phys. Rev. Lett.” 1992, vol. 69, no. 20, s. 2881–2884.
- BERGSTRÖM B., *Komunikacja wizualna*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2009.
- BERNAL J.D., *Science in History*, vol. 2: *The scientific and industrial revolutions*, The MIT Press, Cambridge MA 1971.
- BHAT P.C., *Observation of a Higgs-like Boson in CMS at the LHC*, „Nuclear Physics B” 2013, no. 234, s. 7–14.
- BIAŁYNICKI-BIRULA I., BIAŁYNICKA-BIRULA I., *Modeling Reality. How Computers Mirror Life*, Oxford University Press, Oxford 2004.
- BIAŁYNICKI-BIRULA I., BIAŁYNICKA-BIRULA I., *Modelowanie rzeczywistości. Jak w komputerze przegląda się świat*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2007.
- BIERNAT J., *Arytmetyka komputerów*, PWN, Warszawa 1996.

- BIŃCZYK E., *Praktyka, laboratorium, czynniki pozaludzkie. Najnowsze modele technonauki oraz wybrane tezy Ludwika Flecka*, „Przegląd Filozoficzny – Nowa Seria” 2010, nr 2, s. 9–26.
- BIŃCZYK E., *Technonauka w społeczeństwie ryzyka. Filozofia wobec niepożądanego następstwa praktycznego sukcesu nauki*, Wydawnictwo Naukowe UMK, Toruń 2012.
- BOLTER J.D., *Człowiek Turinga. Kultura Zachodu w wieku komputera*, PIW, Warszawa 1990.
- BOMBIK M., *Nowy eksperymentalizm a wartość eksperymentalnego uzasadniania w naukach empirycznych*, „Studia Philosophiae Christianae”, UKSW, 2005, nr 1 (41), s. 5–40.
- BONIOLO G., *On Scientific Representation. From Kant to a New Philosophy of Science*, Palgrave Macmillan, New York 2007.
- BRANDT S., *Analiza danych. Metody statystyczne i obliczeniowe*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999.
- BROCKMAN J. (red.), *Nowy renesans, Granice nauki*, Wydawnictwo CiS, Warszawa 2005.
- BRONK A., *Filozofia i nauka: problem demarkacji*, „Roczniki Filozoficzne” 1995, t. XLIII, nr 1, s. 181–233.
- BROOKSHEAR J.G., *Informatyka w ogólnym zarysie*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2003.
- BUTTERFIELD H., *Rodowód współczesnej nauki 1300–1800*, PWN, Warszawa 1963.
- CACKOWSKI Z., *Główne idee epistemologii Ludwika Flecka*, „Nauka” 1998, nr 3, s. 147–160.
- CACKOWSKI Z., *Ludwik Fleck, „Edukacja Filozoficzna”* 2002, t. 34, s. 180–198.
- CACKOWSKI Z., KMITA J., SZANIAWSKI K., SMOCZYŃSKI P. (red.), *Filozofia a nauka. Zarys encyklopedyczny*, Wydawnictwo PAN, Wrocław–Warszawa–Kraków–Gdańsk–Łódź 1987.
- CAMPBELL N., *Physics: The Elements*, Cambridge University Press, Cambridge 1920.
- CARNAP R., *The Methodological Character of Theoretical Concepts*, [w:] H. Feigl, M. Scriven (eds), *Minnesota Studies in the Philosophy of Science. The foundations of science and the concepts of psychology and psychoanalysis*, vol. 1, University of Minnesota Press, Minneapolis 1956, s. 38–75.
- CARTWRIGHT N., *How the Laws of Physics Lie*, Clarendon Press, Oxford 1983.
- CARTWRIGHT N., *The Simulacrum Account of Explanation*, [w:] tejsze, *How the Laws of Physics Lie*, Clarendon Press, Oxford 1983, s. 143–162.
- CASTELLS M., *Koniec tysiąclecia*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2009.
- CASTELLS M., *Spółczesność sieci*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2011.
- CERN. *LHC the guide*, Communication Group, Szwajcaria 2008, <http://www.coepp.org.au/files/coepp/docs/CERN-Brochure-2008-001-Eng.pdf> (dostęp: 12.11.2012).
- CHALMERS A., *Czym jest to, co zwiemy nauką?*, Wydawnictwo Siedmioróg, Wrocław 1993.
- CIACIURA M., OLCHOWIK W. (red.), *Metody i narzędzia projektowania komputerowych systemów medycznych*, Wyższa Szkoła Technologii Informatycznych w Warszawie, Warszawa 2009.
- COHEN I.B., *Introduction*, [w:] Ch.R. Eames, *A Computer Perspective*, Harvard University Press, Cambridge MA 1973, s. 6–7.
- COHEN I.B., *Revolution in Science*, Harvard University Press, Cambridge MA–London 1985.
- COLLINS D., SHAPIN S., *Experiment, Science Teaching and the New History and Sociology of Science*, [w:] M. Shortland, A. Warwick (eds), *Teaching the History of Science*, Blackwell, Oxford 1989, s. 67–79.
- Combined search for the Standard Model Higgs boson using up to 4.9 fb⁻¹ of pp collision data at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector at the LHC*, „Physics Letters B” 2012, no. 710, s. 49–66.
- CROMBIE A.C., *Designed in the Mind: Western Visions of Science, Nature and Humankind*, [w:] tegoż, *Science, Art and Nature in Medieval and Modern Thought*, Hambleton Press, London 1996, s. 1–12.

- CROMBIE A.C., *Nauka średniowieczna i początki nauki nowożytnej*, t. I, Instytut Wydawniczy PAX, Warszawa 1960.
- CROMBIE A.C., *Nauka średniowieczna i początki nauki nowożytnej*, t. II, Instytut Wydawniczy PAX, Warszawa 1960.
- CROMBIE A.C., *Science, Art and Nature in Medieval and Modern Thought*, Hambledon Press, London 1996.
- CROMBIE A.C., *Style myśli naukowej w początkach nowożytnej Europy*, IFiS PAN, Warszawa 1994.
- CZARNOCKA M., *Doświadczenie w nauce. Analiza epistemologiczna*, IFiS PAN, Warszawa 1992.
- CZARNOCKA M., *Koncepcja eksperymentu Allana Franklina. Nowy eksperymentalizm na rozdrożu?*, [w:] D. Sobczyńska, P. Zeidler (red.), *Nowy eksperymentalizm – teoretycyzm – reprezentacja*, Wydawnictwo Naukowe IF UAM, Poznań 1994, s. 109–122.
- CZARNOCKA M., *Obserwacja a eksperyment*, „*Studia Filozoficzne*” 1989, nr 4, s. 117–131.
- CZECHOWSKI R., SIENKIEWICZ P., *Przestępcze oblicza komputerów*, PWN, Warszawa 1993.
- CZERNY J., ZIPPER W., *Podstawy filozofii fizyki*, Wydawnictwo UŚ, Katowice 1998.
- DANILUK A., *RS 232C. Praktyczne programowanie*, Helion, Gliwice 2001.
- DEUTSCH D., *Kwantowe obliczenia*, [w:] J. Brockman (red.), *Nowy renesans, Granice nauki*, Wydawnictwo CiS, Warszawa 2005, s. 187–198.
- DEUTSCH D., *Quantum theory, the Church-Turing principle and the Universal quantum computer*, „*Proc. R. Soc. Lond.*” 1985, A 400, s. 97–117.
- DITTMAYER S., SCHUMACHER M., *The Higgs boson in the Standard Model – From LEP to LHC: Expectations, Searches, and Discovery of a Candidate*, „*Progress in Particle and Nuclear Physics*” 2013, no. 70, s. 1–54.
- DOWLING D., *Experimenting on Theories*, „*Science in Context*” 1999, vol. 12, no. 2, s. 261–273.
- DURKA P.J., *Cyfrowy świat. Jak to działa*, Wydawnictwo Adamantan, Warszawa 2004.
- DURKA P.J., *Komputer, Internet, cyfrowa rewolucja*, PWN, Warszawa 2000.
- FAUDROWICZ A., *Komputery i my*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2001.
- FEIGL H., SCRIVEN M. (eds), *Minnesota Studies in the Philosophy of Science. The foundations of science and the concepts of psychology and psychoanalysis*, vol. 1, University of Minnesota Press, Minneapolis 1956.
- FEYNMAN R.P., *Wykłady o obliczeniach*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2007.
- Filozofia a nauka. Zarys encyklopedyczny*, Wydawnictwo PAN, Wrocław–Warszawa–Kraków–Gdańsk–Łódź 1987.
- FLECK L., *O obserwacji naukowej i postrzeganiu w ogóle*, „*Przegląd Filozoficzny*” 1935, nr 38, s. 58–76.
- FLECK L., *Powstanie i rozwój faktu naukowego: wprowadzenie do nauki o stylu myślowym i kolektywie myślowym*, Wydawnictwo Lubelskie, Lublin 1986.
- FORTUNA Z., MACUKOW B., WAŚOWSKI J., *Metody numeryczne*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2001.
- FRANKLIN A., *Can that Be Right? Essays on Experiment, Evidence and Science*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht–Boston–London 1999.
- FRANKLIN A., *Experiment. Right Or Wrong*, Cambridge University Press, Cambridge 1990.
- FRANKLIN A., *How Experiments End (Review of Peter Galison, How Experiments End)*, „*Brit. J. Phil. Sci.*” 1988, no. 39, s. 411–414.
- FRANKLIN A., *The Epistemology of Experiment (Review of Ian Hacking, Representing and Intervening)*, „*Brit. J. Phil. Sci.*” 1984, no. 35, s. 381–390.
- FRANKLIN A., *The Neglect of Experiment*, Cambridge University Press, Cambridge 1986.
- FRANKLIN A., *What Makes a „Good” Experiment?*, „*Brit. J. Phil. Sci.*” 1981, no. 32, s. 367–374.

- GALISON P., *Bubble Chambers and the Experimental Workplace*, [w:] P. Achinstein, O. Hannaway (eds), *Observation, Experiment and Hypothesis in Modern Physical Science*, The MIT Press, Cambridge MA–London 1985, s. 309–373.
- GALISON P., *Computer Simulations and the Trading Zone*, [w:] P. Galison, D.J. Stump (eds), *The Disunity of Science: Boundaries, Contexts, and Power*, Stanford University Press, Stanford 1996, s. 118–157.
- GALISON P., *How Experiments End*, The University of Chicago Press, Chicago 1987.
- GALISON P., *How the First Neutral Current Experiments Ended*, „Reviews of Modern Physics” 1983, no. 55, s. 477–509.
- GALISON P., *The Discovery of the Muon and the Failed Revolution Against Quantum Electrodynamics*, „Centaurus” 1983, no. 26, s. 262–316.
- GAWRYSIAK P., *Cyfrowa rewolucja. Rozwój cywilizacji informacyjnej*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2008.
- GELERNTER D., *Mechaniczne piękno. Kryterium estetyczne w informatyce*, Wydawnictwo CiS, Warszawa 1999.
- GERVASIO M., MICHELINI M., VIOLA R., *Rozszerzenie zmysłów przez computer – pomiary termiczne, optyczne i elektryczne*, „Postępy Fizyki” 2009, t. 60, z. 6, s. 249–254.
- GIERE R.N., *Explaining Science. A Cognitive Approach*, The University of Chicago Press, Chicago–London 1988.
- GIZA P., *Czy możliwa jest automatyzacja odkrycia naukowego: perspektywy głównych programów badawczych w dziedzinie teorii odkryć maszynowych*, [w:] M. Kuszyk-Bytniewska, A. Łukasik (red.), *Filozofia przyrody współcześnie*, Universitas, Kraków 2010, s. 319–345.
- GIZA P., *Filozoficzne i metodologiczne aspekty komputerowych systemów odkryć naukowych*, Wydawnictwo UMCS, Lublin 2006.
- GIZA P., *I. Hackinga koncepcja realizmu naukowego*, [w:] K. Jodkowski, Z. Muszyński (red.), *O sposobie istnienia rzeczy*, Wydawnictwo UMCS, Lublin 1992, s. 163–179.
- GIZA P., *Realizm Iana Hackinga a konstruktywizm empiryzm Basa C. van Fraassena*, Wydawnictwo UMCS, Lublin 1990.
- GIZA P., *Representing and intervening*, [w:] B. Skarga (red.), *Przewodnik po literaturze filozoficznej XX wieku*, t. 2, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1994, s. 138–141.
- GIZA P., *Reprezentowanie a interweniowanie, recenzja książki I. Hackinga*, „Studia Filozoficzne” 1983, nr 1, s. 188–194.
- GLEICK J., *Informacje. Bit. Wszechświat. Rewolucja*, Znak, Kraków 2012.
- GOOK M., *Interfejsy sprzętowe komputerów PC*, Helion, Gliwice 2005.
- GRABIŃSKA T., *Od nauki do metafizyki*, PWN, Warszawa–Wrocław 1998.
- GRABIŃSKA T., *Teoria, model, rzeczywistość*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1993.
- GRABOWSKI M., *Elementy filozofii nauki*, Wydawnictwo UMK, Toruń 2000.
- GROBLER A., *Metodologia nauk*, Wydawnictwo Aureus – Wydawnictwo Znak, Kraków 2006.
- GROVER L., *A Fast quantum mechanical algorithm for database search*, „STOC’28” 1996, no. 212, s. 212–219.
- GRZĄDKOWSKI B., *Cząstka Higgsa istnieje?*, „Postępy Fizyki” 2012, t. 63, z. 3, s. 100–104.
- HACKING I. (ed.), *Scientific Revolutions*, Oxford University Press, Oxford 1981.
- HACKING I., *‘Style’ for Historians and Philosophers*, „Studies in History and Philosophy of Science” 1992, vol. 23, no. 1, s. 1–20.
- HACKING I., *Artificial Phenomena*, „British Journal for the History of Science” 1991, no. 24, s. 235–241.

- HACKING I., *Czy widzimy przez mikroskop?*, [w:] D. Sobczyńska, P. Zeidler (red.), *Nowy eksperymentalizm – teoretycyzm – reprezentacja*, Wydawnictwo Naukowe IF UAM, Poznań 1994, s. 31–55.
- HACKING I., *Do We See through a Microscope?*, [w:] P.M. Churchland, C.A. Hooker, *Images of Science*, Chicago–London 1985, s. 132–152.
- HACKING I., *Eksperymentowanie a realizm naukowy*, [w:] D. Sobczyńska, P. Zeidler (red.), *Nowy eksperymentalizm – teoretycyzm – reprezentacja*, Wydawnictwo Naukowe IF UAM, Poznań 1994, s. 9–30.
- HACKING I., *Experiment, Right Or Wrong, by A. Franklin*, „Philosophy of Science” 1992, vol. 59, no. 4, December.
- HACKING I., *Experimentation and Scientific Realism*, [w:] J. Leplin (ed.), *Scientific Realism*, University of California Press, Berkeley–Los Angeles–London 1984, s. 154–172.
- HACKING I., *Language, Truth and Reason*, [w:] M. Hollis, S. Lukes (eds), *Rationality and Relativism*, MIT Press, Cambridge MA 1982, s. 48–66.
- HACKING I., *Niejedności nauk*, „Studia Philosophica Wratislaviensia” 2008, vol. III, fasc. 1, s. 149–180.
- HACKING I., *On the Stability of the Laboratory Sciences*, „The Journal of Philosophy” 1988, no. 85, s. 507–514.
- HACKING I., *Philosophers of Experiment*, [w:] A. Fine, J. Leplin (eds), *PSA: proceedings of the biennial meeting of the Philosophy of Science Association*, Philosophy of Science Association, East Lansing 1988, s. 147–156.
- HACKING I., *Representing and Interweaving: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science*, Cambridge University Press, New York–Cambridge 1983.
- HACKING I., *The Self-Vindication of the Laboratory Sciences*, [w:] A. Pickering (ed.), *Sciences as practice and culture*, The University of Chicago Press, Chicago–London 1992, s. 29–64.
- HACKING I., *The Uses of Experiments: Studies in the Natural Science*, „Philosophy of Science” 1992, vol. 59, no. 4, December.
- HACKING I., *Theory and Experiment – Recent Insights and New Perspectives on Their Relations*, „Isis” 1990, vol. 81, no. 309.
- HAJDUK Z., *Temporalność nauki. Kontrowersyjne zagadnienia dynamiki nauki*, RW KUL, Lublin 1995.
- HALL A.R., *The scientific revolution, 1500–1800. The formation of the modern scientific attitude*, Longmans, London 1954.
- HALL R.A., *Rewolucja naukowa 1500–1800. Kształtowanie się nowożytnej postawy naukowej*, Instytut Wydawniczy PAX, Warszawa 1966.
- HAREL D., *Komputery – spółka z o.o. Czego komputery naprawdę nie umieją robić*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
- HAREL D., *Rzecz o istocie informatyki. Algorytmika*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2001.
- HARRINGTON R.D., *Observation of an excess of events in the Higgs boson search in ATLAS*, „Nuclear Physics B” 2013, no. 234, s. 15–20.
- HEERMANN D.W., *Podstawy symulacji komputerowych w fizyce*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1997.
- HELLER M., LUBAŃSKI M., ŚLAGA S.W., *Zagadnienia filozoficzne współczesnej nauki. Wstęp do filozofii przyrody*, ATK, Warszawa 1992.
- HELLER M., MAĆZKA J. (red.), *Informacja a rozumienie*, PAU-OBI-Biblos, Kraków–Tarnów 2005.

- HELLER M., *Nauka jako odkrywanie sensu*, Znak, Kraków 2002, http://www miesiecznik.znak.com.pl/ul_2002.html (dostęp: 12.11.2012).
- HEMPEL C.G., *Filozofia nauk przyrodniczych*, Aletheia, Warszawa 2001.
- HIGGS P.W., *Broken symmetries and the masses of gauge bosons*, „Physical Review Letters” 1964, vol. 13, no. 16, s. 508–509.
- HOPCROFT J.E., MOTWANI R., ULLMAN J.D., *Wprowadzenie do teorii automatów, języków i obliczeń*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2005.
- IZYDORCZYK J., PŁONKA G., TYMA G., *Teoria sygnałów*, Helion, Gliwice 1999.
- JACYNA-ONYSZKIEWICZ Z., *Geneza zasad kosmologii kwantowej*, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań 1999.
- JODKOWSKI K., *Teza o niewspółmierności w ujęciu Thomasa S. Kuhna i Paula K. Feyerabenda*, Wydawnictwo UMCS, Lublin 1984.
- JODKOWSKI K., *Wspólnoty uczonych, paradygmaty i rewolucje naukowe*, Wydawnictwo UMCS, Lublin 1990.
- KAZIBUT J., *Proces doskonalenia się instrumentarium badawczego nauk laboratoryjnych*, „Nauka” 2012, nr 2, s. 115–129.
- KIPPENHAHN R., *Tajemne przekazy. Szyfry, enigma i karty chipowe*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2000.
- KONEFAŁ A., *Symulacje metodą Monte Carlo za pomocą oprogramowania GEANT4*, „Postępy Fizyki” 2006, t. 57, z. 6, s. 242–251.
- KOROHODA W., *Informacja w biologii*, [w:] M. Heller, J. Mączka (red.), *Informacja a rozumienie*, PAU-OBIBLOS, Kraków–Tarnów 2005.
- KOTOWA B., SUCH J. (red.), *Z filozoficznej problematyki badań nad rozwojem*, Wydawnictwo Naukowe IF UAM, Poznań 1993.
- KOWALSKI P., *Uwiktani w informatykę*, Wydawnictwo MIKOM, Warszawa 2004.
- KOYRÉ A., *Galileo Studies*, The Harvest Press, Brighton 1978.
- KRAJEWSKI W., *Czy prawa nauki są prawdziwe?* (recenzja książki N. Cartwright, *How the Laws of Physics Lie?*, Oxford 1983), „Studia Filozoficzne” 1986, nr 5.
- KRAJEWSKI W., STRAWIŃSKI W. (red.), *Odkrycie naukowe i inne zagadnienia współczesnej filozofii nauki*, Wydawnictwo Semper, Warszawa 2003.
- KUBICKI R., SÓJKA J., ZEIDLER P., *Problem destrukcji pojęcia prawdy*, Wydawnictwo Naukowe IF UAM, Poznań 1992.
- KUHN T.S., *Droga po Strukturze. Eseje z lat 1970–1993 i wywiad-rzeka z autorem „Struktury rewolucji naukowych”*, Wydawnictwo Sic!, Warszawa 2003.
- KUHN T.S., *Dwa bieguny*, PIW, Warszawa 1985.
- KUHN T.S., *Możliwe światy w historii nauki*, „Literatura na Świecie” 1991, nr 5 (238), s. 120–155.
- KUHN T.S., *Struktura rewolucji naukowych*, Aletheia, Warszawa 2009.
- KUJAWIŃSKA M., *Wybrane problemy metrologii optoelektronicznej (polowa interferometria laserowa)*, [w:] J. Barzykowski (red.), *Współczesna metrologia. Zagadnienia wybrane*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2004, s. 345–435.
- KULIKOWSKI J.L., *Komputery w badaniach doświadczalnych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993.
- KULKA J., *Techniczne aspekty zderzacza LHC*, „Postępy Fizyki” 2009, t. 60, z. 3, s. 109–118.
- KUSZYK-BYTNIEWSKA M., ŁUKASIK A. (red.), *Filozofia przyrody współcześnie*, Universitas, Kraków 2010.
- KWIATKOWSKI T., *Klasyfikacja*, [w:] *Filozofia a nauka. Zarys encyklopedyczny*, Wydawnictwo PAN, Wrocław–Warszawa–Kraków–Gdańsk–Łódź 1987, s. 283–297.

- LATOUR B., *Nigdy nie byliśmy nowocześni*, Oficyna Naukowa, Warszawa 2011.
- LATOUR B., *Wizualizacja i poznanie: zrysowywanie rzeczy razem*, „Avant” 2012, vol. III, nr T, s. 207–257.
- LE BELLAC M., *Wstęp do informatyki kwantowej*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012.
- LECIEJEWSKI S., *Komputer we współczesnych eksperymentach naukowych (próba przypisu do koncepcji nowego eksperymentalizmu)*, [w:] A. Szczuciński (red.), *Cywilizacyjne dylematy rozwoju nauki i techniki*, Oficyna Wydawnicza „Batik”, Poznań 2000, s. 69–91.
- LECIEJEWSKI S., *Komunikacja multimedialna w edukacji filozoficznej – konieczność czy zbędne obciążenie pracy dydaktycznej?*, [w:] I. Surina (red.), *Przestrzeń edukacyjna wobec wyzwań i oczekiwań społecznych*, Oficyna Wydawnicza „Impuls”, Kraków 2010, s. 247–258.
- LECIEJEWSKI S., *Komunikacja multimedialna w edukacji filozoficznej XXI wieku*, [w:] M. Domaradzki, E. Kulczycki, M. Wendland (red.), *Język, rozumienie, komunikacja*, Wydawnictwo Naukowe IF UAM, Poznań 2011, s. 83–96.
- LECIEJEWSKI S., *Problem świadomości w wybranych interpretacjach mechaniki kwantowej i kosmologii*, [w:] P. Orlik (red.), *Światłocienie świadomości*, Wydawnictwo Naukowe IF UAM, Poznań 2002, s. 181–196.
- LECIEJEWSKI S., *Specyfika wspomaganých komputerowo badań eksperymentalnych w naukach przyrodniczych*, „Studia Philosophiae Christianae”, UKSW, 2009, nr 1 (45), s. 119–131.
- LECIEJEWSKI S., *Status eksperymentatora w naukach empirycznych a współczesne techniki informatyczne*, [w:] D. Sobczyńska, P. Zeidler (red.), *Homo experimentator*, Wydawnictwo Naukowe IF UAM, Poznań 2003, s. 159–187.
- LEPLIN J., *The Role of Experiment in Theory Construction*, „International Studies in the Philosophy of Sciences” 1987, vol. 2, no. 1, Autumn, s. 72–83.
- LINCOLN D., *Kwantowa granica. LHC – Wielki Zderzacz Hadronów*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2010.
- LUDWICKI M., *Urządzenia wykonawcze*, „Chemia Przemysłowa” 2008, nr 3 (382), s. 70–75.
- LYONS R.G., *Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1999.
- MAES P., *Oprogramowanie inteligentne*, „Świat Nauki” 1995, nr 11 (51), s. 58–60.
- MARCISZEWSKI W., *Sztuczna inteligencja*, Znak, Kraków 1998.
- MARVEN C., EWERS G., *Zarys cyfrowego przetwarzania sygnałów*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1999.
- MAZIERSKI S., *Prawa przyrody. Studium metodologiczne*, RW KUL, Lublin 1993.
- MIELCZAREK W., *USB. Uniwersalny interfejs szeregowy*, Helion, Gliwice 2005.
- MILL J.S., *System logiki dedukcyjnej i indukcyjnej*, PWN, Warszawa 1962.
- MINSKY M., *Co nadejdzie po umysłach?*, [w:] J. Brockman (red.), *Nowy renesans, Granice nauki*, Wydawnictwo CiS, Warszawa 2005, s. 197–214.
- MIŚ B., *Ku myślącym maszynom*, Instytut Wydawniczy „Nasza Księgarnia”, Warszawa 1981.
- MROZKA J., *Metrologia w procesie poznania*, [w:] J. Barzykowski (red.), *Współczesna metrologia. Zagadnienia wybrane*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2004, s. 17–66.
- NAGEL E., *Struktura nauki*, PWN, Warszawa 1970.
- NAWROCKI W., *Komputerowe systemy pomiarowe*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006.
- NAWROCKI W., *Rozproszone systemy pomiarowe*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006.

- NEKRAŠAS E., *Wiedza prawdopodobna. Powstanie i rozwój w empiryzmie logicznym programu probabilistycznej oceny wiedzy naukowej*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1992.
- NOWAK L., *Wstęp do idealizacyjnej teorii nauki*, PWN, Warszawa 1977.
- NOWINA KONOPKA M., *Bozon Higgsa zarejestrowany w eksperymentach ATLAS i CMS*, „Postępy Fizyki” 2012, t. 63, z. 3, s. 98–99.
- NUSSE H.E., YORKE J.A., *Dynamika. Badania numeryczne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998.
- Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC*, „Physics Letters B” 2012, no. 716, s. 30–61.
- Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC*, „Physics Letters B” 2012, no. 716, s. 1–29.
- OLEJNIK R.M. OFM, *Matematyczna teoria miary a metodologiczne analizy procedur pomiarowych*, Wydawnictwo Diecezji Tarnowskiej Biblos, Kraków–Tarnów 2011.
- OSOWSKI S., *Sztuczne sieci neuronowe w metrologii*, [w:] J. Barzykowski (red.), *Współczesna metrologia. Zagadnienia wybrane*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2004, s. 217–344.
- PAPIŃSKA-KACPEREK J. (red.), *Spółczeństwo informacyjne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2008.
- PARKER W.S., *An Instrument for What? Digital Computers, Simulation and Scientific Practice*, „Spontaneous Generations: A Journal for the History and Philosophy of Science” 2010, vol. 4, no. 1, s. 39–44.
- PENROSE R., *Nowy umysł cesarza. O komputerach, umyśle i prawach fizyki*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2000.
- PICKERING A. (ed.), *Sciences as practice and culture*, The University of Chicago Press, Chicago–London 1992.
- PIETUSKA-MADEJ E., *Odkrycie naukowe. Kontrowersje filozoficzne*, PWN, Warszawa 1990.
- PIOTROWSKA E., *Elektroniczna technika obliczeniowa a matematyka. Refleksje filozoficzne*, [w:] D. Sobczyńska, A. Szczuciński (red.), *Techniczne determinanty rozwoju nauki*, Wielkopolska Agencja Wydawnicza, Poznań 1992, s. 107–118.
- PIOTROWSKA E., WIŚNIEWSKI J. (red.), *Z filozofii przyrodoznawstwa i matematyki*, Wydawnictwo Fundacji Humaniora, Poznań 2002.
- PIOTROWSKI J. (red.), *Pomiary. Czujniki i metody pomiarowe wybranych wielkości fizycznych i składu chemicznego*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2009.
- PIOTROWSKI J., KOSTYRKO K., *Wzorcowanie aparatury pomiarowej*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2000.
- PLASSCHE VAN DE R., *Scalone przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2001.
- POLAK P., *Komputery, wyobrażenia i współczesna filozofia przyrody*, [w:] M. Kuszyk-Bytniewska, A. Łukasik (red.), *Filozofia przyrody współcześnie*, Universitas, Kraków 2010, s. 305–317.
- POLAŃSKI Z., *Badania empiryczne – metodyka i wspomaganie komputerowe*, [w:] J. Barzykowski (red.), *Współczesna metrologia. Zagadnienia wybrane*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2004, s. 124–216.
- POLAŃSKI Z., *Planowanie doświadczeń w technice*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1984.
- POLAŃSKI Z., *Współczesne metody badań doświadczalnych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1978.
- POPPER K.R., *Logika odkrycia naukowego*, PWN, Warszawa 1977.

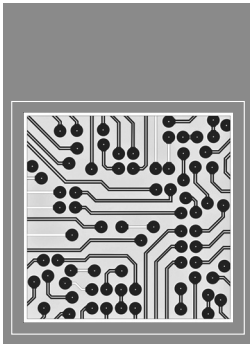
- POPPER K.R., *Wiedza obiektywna. Ewolucyjna teoria epistemologiczna*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012.
- PRATAF R., *MATLAB 7 dla naukowców i inżynierów*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
- QUINE W.V., *Granice wiedzy i inne eseje filozoficzne*, PIW, Warszawa 1986.
- RAINKO S., *Dwa paradygmaty. Esej z teorii wiedzy*, PIW, Warszawa 2011.
- RHEINGOLD H., *Narzędzia ułatwiające myślenie. Historia i przyszłość metod poszerzania możliwości umysłu*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2003.
- ROMANOWSKI S., ŚWIATŁA-WÓJCIK D., *Symulacje komputerowe w fizyce i chemii. Wybrane zagadnienia*, Wydawnictwo Akademii Humanistyczno-Ekonomicznej w Łodzi, Łódź 2009.
- ROSCH W.L., *Biblia o multimediach*, Intersoftland, Warszawa 1997.
- ROSKAL Z.E., *Astronomia matematyczna w nauce greckiej. Metodologiczne studium historyczno-przyrodnicze*, RW KUL, Lublin 2002.
- ROSKAL Z.E., *Kosmos chthoniczny. Historyczny rozwój monistycznej interpretacji kosmosu*, Wydawnictwo KUL, Lublin 2012.
- ROSKAL Z.E., *Platońska kosmologia, astronomia i matematyka w nauce greckiej*, „Kwartalnik Historii Nauki i Techniki” 2001, nr 4, s. 37–60.
- ROSSI P., *Filozofowie i maszyny*, PWN, Warszawa 1978.
- SACHA K., *Mikrokomputer w szkole i w domu*, WSiP, Warszawa 1988.
- SADY W., *Fleck o społecznej naturze poznania*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2000.
- SADY W., *Larry Laudana modele racjonalności*, „Colloquia Communia” 1991, nr 1–3, s. 95–118.
- SADY W., *O naturze badań naukowych*, <http://fleck.umcs.lublin.pl/teksty.sady.natura.pdf> (dostęp: 12.11.2012).
- SADY W., *Procedury badawcze w naukach empirycznych*, „Studia Filozoficzne” 1980, nr 5, s. 117–131.
- SADY W., *Racjonalna rekonstrukcja odkryć naukowych*, Wydawnictwo UMCS, Lublin 1990.
- SADY W., *Spór o racjonalność naukową. Od Poincarégo do Laudana*, Fundacja Nauki Polskiej, Wrocław 2000.
- SAK J., *Style myślenia według Ludwika Flecka*, „Zagadnienia Naukoznawstwa” 2001, nr 1 (147), s. 147–157.
- SAMPLE I., *Peter Higgs. Poszukiwania boskiej cząstki*, Prószyński Media Sp. z o.o., Warszawa 2012.
- SCHUMACHER B., *Quantum coding*, „Physical Review” 1995, A 51, s. 2738–2747.
- SHANNON C.E., *A Mathematical Theory of Communication*, „The Bell System Technical Journal” 1948, vol. 27, s. 379–423, 623–656, July, October.
- SHAPIN S., *Revolucja naukowa*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2000.
- SHOR P.W., *Algorithms for quantum computation, discrete log and factoring*, „FOCS’35” 1995, no. 124, s. 124–134.
- SHORTLAND M., WARWICK A. (eds), *Teaching the History of Science*, Blackwell, Oxford 1989.
- SIEMIANOWSKI A., *Konwencjonalizm*, [w:] *Filozofia a nauka. Zarys encyklopedyczny*, Wydawnictwo PAN, Wrocław-Warszawa-Kraków-Gdańsk-Łódź 1987, s. 322–330.
- SIENKIEWICZ P., *Poszukiwanie Golema. O cybernetyce i cybernetykach*, KAW, Warszawa 1988.
- SIEROTOWICZ A., *Między ewolucyjnym a stacjonarnym obrazem świata. Refleksje z pogranicza historii i filozofii nauki*, Wydział Filozoficzny Towarzystwa Jezusowego w Krakowie, Kraków 1989.
- SIEROTOWICZ A., *Mikrofalowe promieniowanie tła jako experimentum crucis w kosmologii*, Wydział Filozoficzny Towarzystwa Jezusowego w Krakowie, Kraków 1993.

- SIKORA M., *Problem interpretacji w metodologii nauk empirycznych*, Wydawnictwo Naukowe IF UAM, Poznań 1997.
- SIKORA M., *Problem reprezentacji poznawczej w nowożytnej i współczesnej refleksji filozoficznej*, Wydawnictwo Naukowe IF UAM, Poznań 2007.
- SIKORSKI W., *Wykłady z podstaw informatyki*, Wydawnictwo MIKOM, Warszawa 2005.
- SIMONDO S., *An Introduction to Science and Technology Studies*, Wiley-Blackwell, Oxford 2010.
- SNOW C.P., *Dwie kultury*, Prószyński i S-ka, Warszawa 1999.
- SOBCZYŃSKA D., *Aparatura chemiczna a postulaty nowej epistemologii badań naukowych*, [w:] E. Piotrowska, J. Wiśniewski (red.), *Z filozofii przyrodznawstwa i matematyki*, Wydawnictwo Fundacji Humaniora, Poznań 2002, s. 169–179.
- SOBCZYŃSKA D., *Eksperymenty myślowe w rozważaniach teoretycznych i praktyce eksperymentalnej przyrodznawstwa*, [w:] P. Leśniewski, Z. Tworak (red.), *LOGOS – rozum i logika*, Wydawnictwo Naukowe IF UAM, Poznań 2001.
- SOBCZYŃSKA D., *Eksperymenty w chemii i fizyce. Szkic porównawczy z punktu widzenia struktury sytuacji eksperymentalnej*, [w:] J. Such, J. Szymański, A. Szczuciński (red.), *Swoistość metod badawczych a przedmiot nauk szczegółowych*, Wielkopolska Agencja Wydawnicza, Poznań 1994.
- SOBCZYŃSKA D., *Instrumentarium badawcze chemii a globalne przemiany poznawcze w nauce*, [w:] J. Such, M. Szcześniak (red.), *Z epistemologii wiedzy naukowej*, Wydawnictwo Naukowe IF UAM, Poznań 1998, s. 185–203.
- SOBCZYŃSKA D., *Między obserwacją a eksperymentem*, [w:] E. Pakszys, J. Such, J. Wiśniewski (red.), *Nauka w świetle współczesnej filozofii*, PWN, Warszawa 1992, s. 118–142.
- SOBCZYŃSKA D., *Nauka i komputery. Kreatywność maszyny, kreatywność umysłu*, [w:] A. Szczuciński (red.), *Cywilizacyjne dylematy rozwoju nauki i techniki*, Oficyna Wydawnicza „Batik”, Poznań 2000, s. 51–67.
- SOBCZYŃSKA D., *Nie tylko technika, czyli kilka uwag o sztuce badań eksperymentalnych*, [w:] D. Sobczyńska, A. Szczuciński (red.), *Techniczne determinanty rozwoju wiedzy*, WAWĘ, Poznań 1992, s. 37–52.
- SOBCZYŃSKA D., *Nowy eksperymentalizm i jego miejsce w refleksji nad eksperymentem naukowym*, [w:] D. Sobczyńska, P. Zeidler (red.), *Nowy eksperymentalizm – teoretycyzm – reprezentacja*, Wydawnictwo Naukowe IF UAM, Poznań 1994, s. 57–86.
- SOBCZYŃSKA D., *O eksperymentcie i rozwoju eksperymentowania w naukach przyrodniczych*, [w:] J. Such, E. Pakszys (red.), *Szkice o rozwoju nauki*, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań 1986, s. 151–171.
- SOBCZYŃSKA D., *Sztuka badań eksperymentalnych*, Wydawnictwo Naukowe IF UAM, Poznań 1993.
- SOBCZYŃSKA D., *Wokół filozofii eksperymentu. Poglądy „nowego eksperymentalizmu”*, [w:] J. Such, J. Wiśniewski (red.), *Teoria i eksperyment*, Wydawnictwo Naukowe IF UAM, Poznań 1992, s. 7–34.
- SOBCZYŃSKA D., SZCZUCIŃSKI A. (red.), *Techniczne determinanty rozwoju nauki*, Wielkopolska Agencja Wydawnicza, Poznań 1992.
- SOBCZYŃSKA D., ZEIDLER P. (red.), *Chemia: laboratorium myśli i działań*, Wydawnictwo Naukowe IF UAM, Poznań 1999.
- SOBCZYŃSKA D., ZEIDLER P. (red.), *Homo experimentator*, Wydawnictwo Naukowe IF UAM, Poznań 2003.
- SOBCZYŃSKA D., ZEIDLER P. (red.), *Nowy eksperymentalizm – teoretycyzm – reprezentacja*, Wydawnictwo Naukowe IF UAM, Poznań 1994.

- SPENGLER O., *Zmierzch Zachodu. Zarys morfologii historii uniwersalnej* (skrót dokonany przez Helmuta Wernera), tłumaczenie i przedmowa J. Marzęcki, Wydawnictwo KR, Warszawa 2001.
- STACEWICZ T., KOTLICKI A., *Elektronika w laboratorium naukowym*, PWN, Warszawa 1994.
- SUCH J., *Czy istnieje experimentum crucis?*, PWN, Warszawa 1975.
- SUCH J., *Eksperyment*, [w:] Z. CACKOWSKI, J. KMITA, K. SZANIAWSKI, P. SMOCZYŃSKI (red.), *Filozofia a nauka. Zarys encyklopedyczny*, Wydawnictwo PAN, Wrocław-Warszawa-Kraków-Gdańsk-Łódź 1987, s. 120-131.
- SUCH J., *Problemy weryfikacji wiedzy*, PWN, Warszawa 1975.
- SUCH J., *Relacja korespondencji a wynikanie*, [w:] W. Krajewski, W. Mejbaum, J. Such (red.), *Zasada korespondencji w fizyce a rozwój nauki*, PWN, Warszawa 1974, s. 65-114.
- SUCH J., *Rodzaje determinacji a rozwój nauki*, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań 1992.
- SUCH J., *Rola praktyki i doświadczenia w procesie sprawdzania wiedzy w naukach przyrodniczych i społecznych*, „Panta Rei” 1988, t. III, Ossolineum, s. 27-54.
- SUCH J., *Rola techniki w kształtowaniu nowożytnego przyrodznawstwa*, „Studia Filozoficzne” 1973, nr 7, s. 3-27.
- SUCH J., *Szkice o dialektyce*, KiW, Warszawa 1986.
- SUCH J., SZCZEŚNIAK M., *Filozofia nauki*, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań 2002.
- SUCH J., SZCZEŚNIAK M. (red.), *Z epistemologii wiedzy naukowej*, Wydawnictwo Naukowe IF UAM, Poznań 1998.
- SUCH J., WIŚNIEWSKI J. (red.), *Teoria i eksperyment. O związkach teorii z doświadczeniem*, Wydawnictwo Naukowe IF UAM, Poznań 1992.
- ŚWISUŁSKI D., *Komputerowa technika pomiarowa. Oprogramowanie wirtualnych przyrządów pomiarowych w LabVIEW*, Agenda Wydawnicza PAK, Warszawa 2005.
- SZCZUCIŃSKI A., *Eksperyment komputerowy. Przełom poznawczy?*, [w:] D. Sobczyńska, P. Zeidler (red.), *Homo experimentator*, Wydawnictwo Naukowe IF UAM, Poznań 2003, s. 139-158.
- SZCZUCIŃSKI A., *Między eksperymentem fizycznym i technicznym*, [w:] J. Such, J. Wiśniewski (red.), *Teoria i eksperyment. O związkach teorii z doświadczeniem*, Wydawnictwo Naukowe IF UAM, Poznań 1992, s. 57-66.
- SZCZUCIŃSKI A., *Rewolucje w naukach przyrodniczych a rozwój nauk o wszechświecie*, [w:] J. Such, E. Pakszys, I. Czerwonogóra (red.), *Rozprawy i szkice z filozofii i metodologii nauk*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa-Poznań 1992, s. 135-148.
- SZCZUCIŃSKI A. (red.), *Cywilizacyjne dylematy rozwoju nauki i techniki*, Oficyna Wydawnicza „Batic”, Poznań 2000.
- SZLACHCIC K., *Ian Hacking i filozofia nauki eksperymentalnej*, „Studia Philosophica Wratislaviensia” 2008, vol. III, fasc. 1, s. 145-147.
- SZYDŁOWSKI H., *Pracownia fizyczna wspomaganą komputerem*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012.
- SZYDŁOWSKI H. (red.), *Pomiary fizyczne za pomocą komputera*, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań 1999.
- SZYDŁOWSKI H., *Pomiary wspomagane komputerowo*, „Postępy Fizyki” 2009, t. 60, z. 6, s. 242-248.
- SZYMAŃSKI J., „*Samoczynny eksperyment*” jako nowa kategoria poznania empirycznego, [w:] J. Such, J. Szymański, A. Szczuciński, *Swoistość metod badawczych a przedmiot nauk szczegółowych*, Wielkopolska Agencja Wydawnicza, Poznań 1994.
- SZYMAŃSKI J., *Rewolucja naukowo-techniczna a nowa technika obserwacji naukowej*, [w:] *Studia nad zagadnieniami rewolucji naukowo-technicznej*, Wydawnictwo PAN, Wrocław-Warszawa-Kraków-Gdańsk 1974, s. 71-104.

- SZYMAŃSKI J., *Rola teorii i techniki w eksperymentalnym testowaniu wiedzy*, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań 1982.
- SZYMAŃSKI J., *Technika a nowe sposoby gromadzenia informacji empirycznej*, „*Studia Filozoficzne*” 1977, nr 11, s. 81–87.
- SZYNKIEWICZ M., *Rozwój technologii komputerowych w świetle filozoficznej refleksji nad nauką i techniką*, „*Czas Informacji*” 2011, nr 3 (8), s. 5–16.
- TADEUSIEWICZ M., HAŁGAS S., *Komputerowe metody analizy układów analogowych. Teoria i zastosowania*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008.
- TARGOWSKI P., SYLWESTRZAK M., BOJRASZEWSKI T., *Środowisko LabVIEW – własności i przykłady zastosowań*, „*Postępy Fizyki*” 2009, t. 60, z. 6, s. 255–256.
- TEACZAŁA W., *Środowisko LabVIEW w eksperymencie wspomaganym komputerowo*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
- TEACZAŁA W., TYKARSKI L., *Elektronika w eksperymencie fizycznym*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1998.
- TLAGA W., WINIECKI W., *Systemy pomiarowe*, [w:] J. Barzykowski (red.), *Współczesna metrologia. Zagadnienia wybrane*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2004, s. 436–568.
- TUREK J., *Filozoficzne interpretacje faktów naukowych*, Wydawnictwo KUL, Lublin 2009.
- TURZYNIECKA D., DOMAŃSKA A., *Dokładność oceny niepewności i dokładność systemów pomiarowych*, [w:] J. Barzykowski (red.), *Współczesna metrologia. Zagadnienia wybrane*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2004, s. 67–123.
- UFNAŁSKI W., *Obliczenia fizykochemiczne na Twoim PC*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1997.
- WATKINS J., *Nauka a sceptycyzm*, PWN, Warszawa 1989.
- WATKINS J., *Nowe spojrzenie na racjonalność nauki*, „*Literatura na Świecie*” 1991, nr 5, s. 9–31.
- WEINBERG S., *A Model of Leptons*, „*Physical Review Letters*” 1967, vol. 19, no. 21, s. 1264–1266.
- WINIECKI W., *Organizacja komputerowych systemów pomiarowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006.
- WIŚNIEWSKI J., *Matematyka w teoriach naukowych – analiza metodologiczna*, [w:] E. Pakszys, J. Such, J. Wiśniewski (red.), *Nauka w świetle współczesnej filozofii*, PWN, Warszawa 1992, s. 179–208.
- WÓJCICKI S., *Zasady eksperymentu*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1972.
- WOJTATOWICZ T.W., *Badania doświadczalne wspomagane komputerowo*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2010.
- ZAMECKI S., *Historia dziedziny nauka*, „*Zagadnienia Naukoznawstwa*” 2000, nr 2–3 (144–145), s. 151–165.
- ZAMECKI S., *Pojęcie odkrycia naukowego a historia dziedziny nauki*, Wydawnictwo PAN, Wrocław-Warszawa-Kraków-Gdańsk-Łódź 1988.
- ZARZYCKI J., *Cyfrowa filtracja ortogonalna sygnałów losowych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1998.
- ZEIDLER P., *Chemia w świetle filozofii. Studia z filozofii, metodologii i semiotyki chemii*, Wydawnictwo-Naukowe IF UAM, Poznań 2011.
- ZEIDLER P., *Historyczny program badawczy metodologii*, „*Studia Metodologiczne*” 1991, nr 26, s. 3–23.
- ZEIDLER P., *Między optymizmem a nihilizmem poznawczym w konstruktywistycznej filozofii nauki*, [w:] J. Such, M. Szcześniak (red.), *Z epistemologii wiedzy naukowej*, Wydawnictwo Naukowe IF UAM, Poznań 1998, s. 61–81.

- ZEIDLER P., *Nowy eksperymentalizm a teoretycyzm. Spór o przedmiot i sposób uprawiania filozofii nauki*, [w:] D. Sobczyńska, P. Zeidler (red.), *Nowy eksperymentalizm – teoretycyzm – reprezentacja*, Wydawnictwo Naukowe IF UAM, Poznań 1994, s. 87-108.
- ZEIDLER P., *Spór o realizm we współczesnej filozofii nauki*, „Colloquia Communia” 1991, nr 1-3, styczeń-czerwiec, s. 43-60.
- ZEIDLER P., *Spór o stabilność praktyki badawczej nauk empirycznych*, [w:] J. Kmita, B. Kotowa, J. Sójka (red.), *Nauka, humanistyka, człowiek*, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań 2005, s. 139-155.
- ZEIDLER P., *Spór o status poznawczy teorii. W obronie antyrealistycznego wizerunku nauki*, Wydawnictwo Naukowe IF UAM, Poznań 1993.
- ZEIDLER P., SOBCZYŃSKA D., *Koncepcja realizmu w nowym eksperymentalizmie a problem istnienia przedmiotów teoretycznych chemii*, [w:] D. Sobczyńska, P. Zeidler (red.), *Nowy eksperymentalizm – teoretycyzm – reprezentacja*, Wydawnictwo Naukowe IF UAM, Poznań 1994, s. 175-195.
- ZIELIŃSKI T.P., *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2009.
- ŻYCKOWSKI K., *Teoria informacji kwantowej. Postowie do wydania polskiego Wykładów o obliczeniach Feynmana*, [w:] R.P. Feynman, *Wykłady o obliczeniach*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2007, s. 263-272.



Ineks nazwisk

- Ackerman R. 15
Afeltowicz Ł. 23–24
- Bacon F. 20, 22, 119
Bell A.G. 43
Bennett C.H. 145
Beth E.W. 17
Bernal J.D. 122
Białynicka-Birula I. 70–71, 108
Białynicki-Birula I. 70–71, 108
Bińczyk E. 23
Bolter J.D. 116–118, 129
Boniolo G. 75, 138
Boruszewski J. 14
Box G.E.P. 37
Boyle R. 98
Brassard G. 145
Brookshear J.G. 54–55, 80
Butterfield H. 13
- Campbell N. 32
Carnap R. 17, 31, 95
Cartwright N. 28, 32
Castells M. 118
Cohen B. 12, 125–127, 130, 136
Collins D. 22
Comte A. 22
- Crombie A.C. 12–13, 119–121, 140
Czarnocka M. 23–24, 102, 107, 111
- Descartes R. 16
Deutsch D. 144
Dingler H. 21
Dowling D. 84–85
- Einstein A. 124
Ekert A.K. 145
- Feyerabend P. 19
Fisher R.A. 22, 36
Fleck L. 11, 115–116, 118–119, 140
Fraassen van B.C. 17, 25
Franklin A. 23–27, 103
- Galison P. 9, 24, 95–96
Gawrysiak P. 11, 72–73, 101, 130
Giere R.N. 22
Giza P. 25, 38, 86–87, 90, 92, 105, 107, 119, 121
Grover L. 144
- Hacking I. 24–35, 41, 45, 49, 52, 56, 60, 96–99, 101–107, 120, 126–127, 132–136, 138–139, 142–143

Hall A.R. 13, 122
 Harel D. 71-72
 Heller M. 117
 Hempel C. 32
 Herschel W. 22
 Higgs P. 98-99, 109-111, 114, 116, 128
 Holland J. 87
 Holyoak K. 87

 Izydorczyk J. 46

 Jacyna-Onyszkiewicz Z. 117
 Jodkowski K. 122-125

 Kazibut R. 14, 98
 Kiefer J.C. 37
 Knorr Cetina K.D. 23
 Konefał A. 134
 Korohoda W. 117
 Koyré A. 13, 122
 Krebs H. 88
 Kwiatkowski T. 31
 Kuhn T.S. 12, 18-19, 27, 30, 32, 95, 122-125,
 127, 129, 136, 140-141, 143
 Kulikowski J.L. 13, 39, 62

 Lagrange J.L. 16, 69, 81
 Laplace P.S. 69
 Latour B. 23
 Laudan L. 19, 27
 Le Bellac M. 145
 Leciejewski S. 68, 106
 Lincoln D. 110
 Ludwicki M. 61

 Mach E. 20-21
 Marciszewski W. 86
 McCarthy J. 86
 Mill J.S. 22

 Nawrocki W. 46, 51, 57, 59-60
 Neumann von J. 54, 108

 Newton I. 16, 69, 82, 89, 117, 124
 Nisbett R. 87
 Nowak L. 24

 Papińska-Kacperek J. 7, 131
 Piotrowski J. 42, 45, 57
 Plassche van R. 48
 Płonka G. 46
 Polak P. 117
 Polański Z. 36, 86, 90
 Popper K. 17-18, 35, 86, 95, 119

 Reis J.P. 43
 Rheingold H. 85
 Romanowski S. 77, 79, 82

 Sady W. 19, 116
 Sample I. 99
 Schrödinger E. 82, 145
 Schumacher B. 111, 144
 Shannon C.E. 45, 48, 66, 144
 Shapere D. 75
 Shapin S. 12, 22, 122, 126-127, 130-132,
 135, 141-143
 Shor P. 144-145
 Shortland M. 22
 Siemianowski A. 116
 Sikora M. 23, 35, 98
 Simon H. 87-89
 Sismondo S. 23
 Sneed J. 17
 Sobczyńska D. 13, 15, 20-21, 23, 26-27,
 68, 84, 100, 102
 Spengler O. 119
 Stallman R. 73
 Stegmüller W. 17
 Such J. 20, 24
 Suppe F. 17
 Suppes P. 17
 Szydłowski H. 100, 130
 Szymański J. 24
 Szyrkiewicz M. 13

Światła-Wójcik D. 77, 79, 82

Tłaczała W. 58-59

Thagard P. 87

Turing A. 71, 87, 89, 92

Tyma G. 46

Ulam S. 108

Warwick A. 22

Weinberg S. 99

Wheeler J.A. 117

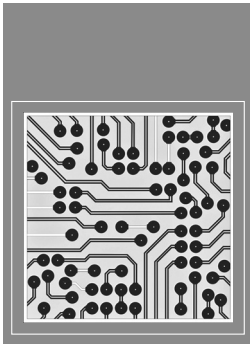
Wiesner S.J. 145

Winiński W. 50-51

Wojtatowicz T.W. 41, 46, 49-50, 52, 61

Wolfowitz J. 37

Zeidler P. 13, 15-17, 20, 23, 26, 68, 98-100



Ineks rzeczowy

- algorytm
 - klasyczny 144
 - kwantowy 144
- aparatura badawcza
- artefakty
 - aparaturowe 26-27, 102-107, 137, 139
 - w przetwornikach analogowo-cyfrowych 66-67, 104
 - w przyrządzie pomiarowym 104
 - w urządzeniu pomiarowym 104
- automatyzacja
 - badań doświadczalnych 62-63
 - odkrycia naukowego 86-90, 92-93, 138
- błędy
 - przetwornika analogowo-cyfrowego 47-48, 66-67
 - przetwornika cyfrowo-analogowego 60
 - sygnałów analogowych 109
 - w oprogramowaniu 72-73
 - w symulacjach komputerowych 80-81
- bozon Higgosa 99, 109-111, 128
- budowanie modeli 28
- CERN 11, 64, 74, 75, 93, 96, 98-99, 101, 106, 109-115, 120, 129, 132, 139, 143
- cykl maszynowy 55
- detektor śladowy 112
- eksperyment
 - ATLAS 93, 110, 112-113
 - CMS 93, 110-113
 - komputerowy 77-85
 - na teoriach 84-85
 - PEGGY II 29, 35, 100-101, 138
 - wspomagany komputerowo 98-102
- eksperymentalizm 10, 19-24
- fizyka komputerowa 133
 - doświadczalna 133
 - teoretyczna 133
- funkcje komputera w naukach empirycznych 10, 38-39, 68, 76, 106, 133-136, 137
- historia eksperymentu 22
- ilościowe własności
 - przetwornika analogowo-cyfrowego 47, 65-66

- przetwornika cyfrowo-analogowego 60
- informatyka 8
 - kwantowa 143-146
- interfejs 11, 49-52
 - szeregowy 49, 50
 - równoległy 49, 51-52
- interpretacja wyników z zastosowaniem komputera 68
- interweniowanie 29, 95
- iteracja 80

- jednostka centralna (CPU) 53
- język maszynowy 54

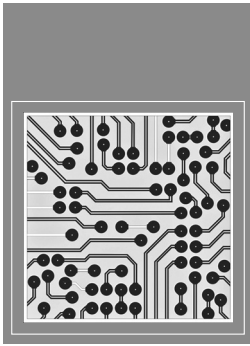
- kalkulacja 28
- kalorymetr 112
- kodowanie sygnału analogowego 45, 46
- komputer 10, 52-56
 - AGC (Apollo Guidance Computer) 101
 - Altair 8800 8
 - Apple II 8
 - Apple Macintosh 8
 - Cray-1 8
 - czasu rzeczywistego 101
 - deterministyczny 94
 - drugiej generacji 8
 - ENIAC 7, 70, 108, 143
 - GELL-MANN 105, 107
 - IBM PC 5150 8
 - kwantowy 12, 144-146
 - MANIAC 108
 - pierwszej generacji 7-8
 - trzeciej generacji 8
 - osobisty 8
 - w układzie eksperymentalnym 68-72
- komputerowe systemy odkryć naukowych 11, 86-90, 121
- komputerowe wspomaganie
 - badań doświadczalnych 39, 62-63, 102, 107-115, 118, 128, 130
 - obliczeń numerycznych 9, 77-85, 108
 - planowania eksperymentów 86, 90-92, 138
- komputerowy styl
 - badań eksperymentalnych 11, 120-121, 140
 - badań laboratoryjnych 120-121
 - badań naukowych 9, 11, 12, 94, 115-121, 140, 143
 - myślowy 118, 140
- konstruktywizm społeczny 22-24
- kreowanie nowych zjawisk 25, 95
- kubit 145
- kwantowanie sygnału analogowego 45, 46
- kwantowe splątanie 145

- laboratorium w ujęciu Hackinga 30-35
- laboratoryjny styl badań naukowych 94, 120
- LEP (Large Electron-Positron Collider) 111
- LHC (Large Hadron Collider) 64, 75, 96, 98-99, 109-115, 120, 132, 139

- manipulacyjne kryterium istnienia 25
- mechanizm Higgsa 98-99
- metodologia badań eksperymentalnych 19-30
- metody
 - numeryczne 68-69, 81
 - przetwarzania analogowo-cyfrowego 48
- model standardowy cząstek elementarnych 110-111, 129
- model symulacyjny 78-79
 - deterministyczny (ciągły) 79
 - stochastyczny (dyskretny) 79

- NASA (National Aeronautics and Space Administration) 101
- nastawnik 61
- nauka laboratoryjna 30, 96–98, 120
- niewspółmierność 95–96, 123–124, 141
- językowa 124, 129
 - metodologiczna 124, 128–129
 - obserwacyjna 124, 129
 - ontologiczna 124, 128
- nowa historia i socjologia nauki 22–23
- nowy eksperymentalizm 9, 12, 15–16, 24–30, 94–98, 138–139
- obserwacja
- bezpośrednia w sensie Shapere'a 75
 - pośrednia w sensie Boniola 75, 138
- oprogramowanie 10, 56–59, 130
- BACON 87, 88
 - CADEX/DOE 90–92
 - DAX-Expert 91–92
 - DENDRAL 89
 - DESIGN-EXPERT 91
 - ESDET 91
 - FAHRENHEIT 87–88, 90, 92
 - GOLEM 89, 90
 - INDUCE 89
 - JMP 91
 - KEKADA 88
 - komercyjne 73–75
 - LabVIEW 57–59, 92
 - MATLAB 91
 - Meta-DENDRAL 89, 90
 - PI 90
 - SAS 91
 - STATGRAPHICS PLUS 91
 - STATISTICA 91
 - w układzie eksperymentalnym 72–75
 - wolne 73–74
- ograniczenie poznawcze wynikające z zastosowania przetworników analogowo-cyfrowych 67
- pamięć główna (operacyjna) komputera 53
- paradygmat 18–19, 122–124, 127
- w znaczeniu szerszym (macierz dyscypliny naukowej) 123–124
 - w znaczeniu węższym (wzorzec rozwiązywania problemów) 123, 127–128
- pole Higgsa 98–99
- postęp w obliczeniach komputerowych 70
- pośredni model rewolucji w nauce 125
- praktyka
- eksperymentalna 15, 28
 - eksperymentalna wspomagana komputerowo 16
- problem-solving activity 18–19
- problem
- komiwożera 71
 - NP-zupełny 71
- próbkowanie sygnału analogowego 45–46
- przedmiotowe składniki praktyki laboratoryjnej 32–33
- przetwornik
- analogowo-analogowy 45
 - analogowo-cyfrowy 10–11, 44–48
 - analogowo-cyfrowy w układzie eksperymentalnym 64–67
 - cyfrowo-analogowy 60–61
 - cyfrowo-analogowy w układzie eksperymentalnym 64–65
- przyrząd pomiarowy 57, 104, 132
- regulator 61
- rekurencja 80
- rewolucja
- aparaturowa 127, 132–133
 - informacyjna 131
 - instytucjonalna w nauce 126, 130
 - komputerowa 13
 - w nauce 12, 97, 122–127, 143

- w badaniach eksperymentalnych 122-136, 140
- rewolucja cyfrowa
 - w badaniach eksperymentalnych 11-12, 127-136, 140-143
 - w rozwoju cywilizacji 11, 143
- rozkazy maszynowe 54
- rozszerzanie obserwowalności 103
- rozwiązywanie sytuacji problemowych 18-19
 - za pomocą komputera 118
- różniczkowanie numeryczne 82-83
- sieć komputerowa
 - ARPANET (Advanced Research Projects Agency Network) 143
 - Internet 143
 - LHC (LHC Computing Grid) 113-115
 - WLCG (Worldwide Large Hadron Collider Computing Grid) 114-115, 132
 - WWW (World Wide Web) 143
- siłownik 61
- spektroskopia 68
- spekulacja 28
- społeczeństwo informacyjne 131
- SPS (Super Proton Synchrotron) 99, 101
- styl badań
 - eksperymentalnych 139-140
 - laboratoryjnych 35, 97-98, 120
 - naukowych 11, 12
- styl
 - myślowy 11, 115-116, 118, 140
 - myślenia 118-120
 - naukowy 119
- superkomputer 8
- symulacja komputerowa 9, 11, 77-85, 102, 108, 138
- system automatyzacji badań doświadczalnych 39
- taksonomia prac eksperymentalnych 10, 12, 30-35, 133-136
 - idee 31, 134
 - rzeczy 31, 32-33, 134-135
 - znaki (dane) 31, 33-34, 135
- technologie definiujące 116-118
- teoretycyzm w nauce 10, 15, 16-19
- teoria
 - eksperymentu 21-22, 36-37
 - naukowa 15
 - oddziaływania elektroslabego 99
- teoretyczne składniki praktyki laboratoryjnej 31-32
- teza
 - o niewspółmierności 19
 - o niestabilności nauk empirycznych 30
 - o stabilności nauk laboratoryjnych 30, 97-98
- twierdzenie
 - Kotelnikowa-Shannona 45-46
 - Nyquista 46
- układ eksperymentalny wspomagany komputerowo 39-41, 106
- urządzenie
 - pomiarowe (czujnik) 41-44
 - wykonawcze 61
- „ustalone podejście” do teorii naukowej 16-18
- uzasadnianie numeryczne 11, 69-70, 106, 138
- wirtualność rzeczywista 118
- wirtualny przyrząd pomiarowy 52, 59
- wizualizacje komputerowe 85
- wybiórczość eksperymentów wspomaganych komputerowo 102-103, 139
- zasada nieoznaczoności Heisenberga 67



The digital revolution in experimental research. Methodological and philosophical study

S u m m a r y

The main objective of my book is the methodological and philosophical analysis of the computer-supported experimental practice. Reflections concerning this issue are conducted in relation to the establishments of methodologists and philosophers of science who worked on the analysis of the experimental practice in sciences. This content is included in the second subchapter of Chapter 1 of my book. The point of reference in that part of this treatise is constituted by the philosophy of new experimentalism by Ian Hacking, presented in his main work from this field: *Representing and Intervening*. These reflections are preceded by a discussion on the dichotomy: theoretism-experimentalism which enables us to juxtapose the tradition of philosophy of experiment and the most important establishments of philosophy related to the creations of experimental studies by Hacking, described in the article *The Self-Vindication of the Laboratory Science*. I refer to it when discussing the elements of modern computer-supported experimental systems, as much as when providing the answer to the main questions asked in the book.

Nowadays, computers in empirical sciences play numerous roles which can be divided into three main groups: analytical: (on-line), synthetic (off-line) and presentational (both on-line and off-line). In the first one, the computer is connected directly to the measurement instrument (consisting of measurement apparatus, analogue-digital converters and interface) and it is mainly used for gathering and analyzing empirical data which is obtained from the experimental system (therefore, its on-line analytical role). In the second group, the computer is not directly connected to the experimental system but it is mainly used to process the previously gathered empirical data (therefore, its off-line synthetic role). A crucial class of computer applications is also the presentation of converted empirical data (from the first group), obtained from the results of numerical analyses (from the second group). Various kinds of computer visualizations can be created during the course of the experiment

(in the on-line mode), as much as after the completed experiment, during the course of processing the gathered empirical data (off-line mode).

The tasks fulfilled by computers which I have included in the first group, are described in Chapter 2 – therefore, the content constitutes the starting point for further methodological and philosophical analyses. Introducing the digital elements to the experimental systems has fundamentally changed this practice. Analogue-digital converters, computer and software are the most valid for this change, therefore, I take those digital elements of modern experimental systems into deeper consideration. In the prologue to Chapter 2 I also discuss in detail other tasks of computers in empirical sciences, and I refer to them in Chapter 3 and Chapter 4 as to examples which I use to justify my own methodological and philosophical theses.

The crucial issue discussed in Chapter 3 is the question if the application of the computer (digital) support to the experimental research incorporates to the scientific work merely the undiscussable quantitative changes, or do we also observe here qualitative changes as well. Does the “distance” between the object and subject of an experiment change, due to the application of the analogue-digital converters and interfaces? Does the interpretation of the results of experiments conducted with the presence of computer support varies substantially from the results of the classic empirical research? Does the application of computer simulations, i.e., the digital numerical methods, introduces a different mode of justification of scientific hypotheses – the numerical justification? Does, therefore, the status of an experimentator in the empirical research change qualitatively in cases when the scientific research is supported by computers and other digital elements of modern experimental systems? Giving answers to those stated questions, I refer to the established ideas present in Chapter 2, as well as to the basic knowledge from the field of computer simulation and computer systems of scientific discovery which I discuss in abridgement, in relation to the available publications.

Chapter 4 constitutes the key chapter: here, I defend my theses concerning the new style of the experimental research, new style of the scientific research and the digital revolution which has taken place in empirical sciences. It is, indeed, astonishing that, until now, such theses neither have been formulated nor justified in various scientific treatises. Although there have been attempts to point the revolutionary change in the development of civilization caused by the process of computerization in numerous spheres of social life, still, these theses appeared usually devoid of sufficient justification, present mainly in popular science literature or the one concerning history and sociology of science. The thesis about computer science revolution is often formulated in the widely recognized culture, yet it has failed to find its reflection in professional publications from the field of philosophy of science and methodology. The concepts of scientific revolutions to which I refer in this book have not yet been discussed in order to justify the thesis of the digital revolution in experimental sciences. Similar concepts of the reflective style, as much as the style of the scientific research have not been used to display that the digitalization of the empirical, or widely, scientific research, brings forth the emergence of a new style of the experimental research, as much as a new style of the scientific research.

The main objective of my book is to provide answers to two fundamental questions from the field of philosophical reflection on science and its development. Firstly, if the use of computer in empirical studies has created a brand new computer style of the scientific research; secondly, whether computer has revolutionized experimental studies. When providing the answers, I refer to the well-known concepts of thought developed by Ludwik Fleck, the style of the scientific research by Alistair Cameron Crombie and its further modifications, as much as to several concepts of scientific revolutions (by Thomas Samuel Kuhn, Bernard Cohen and Steven Shapin).

As those concepts were displayed and discussed in numerous works – also in Polish publications concerning that matter – I, therefore, do not explain them in detail. My consideration begins from proving that philosophy of new experimentalism fails to provide a sufficient conceptual apparatus which would enable us to create an adequate analysis of the computer-supported experimental work. On the basis of the recent research material from the field of particles physics, conducted in the largest and the most computerized laboratory in the world – CERN, I display that nowadays it becomes impossible to obtain cognitively significant results, if one's work is deprived of the computer support. The same factual material enables us to justify the thesis about the computer style of the scientific research.

The answer to the most crucial question put by me in this book: do we observe the digital revolution in the experimental research, becomes possible to be found, as long as the criteria of scientific revolutions proposed by four previously mentioned authors are related to the change caused by the transition between analogue and digital mode of experimenting. In the closing subchapter of my book I relate to the taxonomy of experimental works by Hacking, I point that virtually all elements of the experimental works highlighted by the author of *The Self-Vindication of the Laboratory Science* are nowadays computer-supported. It strengthens the thesis about the revolution which has taken place in the experimental research, due to the incorporation of digital elements into the experimental system.

The book is concluded by a glance into the future, as I delineate emerging possibilities concerning the application of quantum computers to the scientific research.

Translated by Karolina Kruk



Sławomir Leciejewski jest absolwentem fizyki, filozofii i teologii Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. W 2002 roku na podstawie rozprawy *Obserwator w kosmologii antropicznej* uzyskał stopień doktora nauk humanistycznych w zakresie filozofii. Jest adiunktem Zakładu Logiki i Metodologii Nauk w Instytucie Filozofii UAM. Publikuje prace z filozofii nauki oraz metodologii nauk przyrodniczych. Autor książki *Rola zasad antropicznych w rozwoju współczesnej kosmologii. Studium metodologiczne*.

Praca podejmuje bardzo ambitny cel. Dotyczy niezwykle ważnej i aktualnej problematyki. Przybliża problem wspomagania komputerowego w badaniach eksperymentalnych. Pokazuje, że dziś, ze względu na zastosowanie komputera, badania te różnią się jakościowo od badań, w których technologia cyfrowa nie występowała. Zaproponowana przez Autora konceptualizacja badań eksperymentalnych z punktu widzenia wykorzystywanych w nich komputerów na pewno pogłębia filozoficzno-metodologiczną refleksję nad współczesnymi naukami empirycznymi.

dr hab. Marek Sikora
profesor Politechniki Wrocławskiej
(z recenzji wydawniczej)

ISBN 978-83-232-2558-4
ISSN 0083-4246



9 788323 225584