

Sławomir Leciejewski

Struktura cyfrowej rewolucji naukowej

Zagadnienia Filozoficzne w Nauce nr 64, 117-136

2018

Artykuł został opracowany do udostępnienia w internecie przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego. Artykuł jest umieszczony w kolekcji cyfrowej bazhum.muzhp.pl, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.

Struktura cyfrowej rewolucji naukowej

Sławomir Leciejewski

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu,
Instytut Filozofii, Zakład Filozofii Techniki
i Rozwoju Cywilizacji

Structure of the digital scientific revolution

Abstract

Nowadays, computers are in common use, both in experimental and theoretical research. It is worth considering if the implementation of a new, universal research tool has significantly changed the science of the end of 20th century. The crucial question which I will try to answer is if computers have revolutionized the scientific research. In order to find the answer, I will describe modern digitally aided science, taking into consideration the research conducted in the greatest elementary physics laboratory. Subsequently, I will refer to the classic concept of scientific revolution proposed by Thomas S. Kuhn. Finally, I will answer the question related to digital revolution in science.

Keywords

philosophy of science, scientific revolution, computer aided scientific research.

1. Wprowadzenie

Rozwój sprzętu komputerowego, oprogramowania oraz urządzeń peryferyjnych umożliwił ich zastosowanie w niemalże wszystkich obszarach ludzkiej aktywności. Jednym z bardzo ważnych zastosowań komputerów jest wspomaganie prac badawczych w naukach empirycznych. Urządzenia te używane były w nauce od lat czterdziestych XX wieku, początkowo z przewagą zastosowań *stricte* obliczeniowych. Warto jednak zaznaczyć, że komputery nie są tylko i wyłącznie urządzeniami przyspieszającymi obliczenia; stosowane do różnorodnych obliczeń przyspieszały również pracę teoretyków, ułatwiając znajdowanie numerycznych wyników prowadzonych przez nich badań. Zmieniły one jednak nie tylko pracę teoretyków, ale także pracę eksperymentalną¹. W latach osiemdziesiątych XX wieku wspomaganie komputerowe badań eksperymentalnych stało się bowiem standardem podczas prac badawczych prowadzonych w większości znanych laboratoriów naukowych.

Współcześnie komputery w naukach empirycznych spełniają wiele różnych zadań, które – jak się wydaje – podzielić można 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 oraz interfejsu) i służy głównie do gromadzenia i wstępnej analizy da-

¹ Zaawansowanie aparatu matematycznego oraz rosnąca złożoność aparatury badawczej doprowadziły na początku XX wieku do wykształcenia się w ramach fizyki dwóch jej dziedzin: teoretycznej i doświadczalnej. Można jednak wykazać, że praktyką badawczą tego typu nauk steruje jedna kultura o charakterze eksperymentalno-teoretycznym. Tak więc, aby uzasadnić, że nastąpiła rewolucyjna zmiana w nauce, należałoby przeanalizować łączne zmiany jakie zaszły zarówno w kulturze teoretycznej, jak i eksperymentalnej. Por. (Kraśiński, 2016).

nych 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 teoretycznego numerycznego 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 teoretycznych analiz numerycznych (z grupy drugiej). Różnego rodzaju wizualizacje komputerowe mogą być tworzone w trakcie eksperymentu (w trybie *on-line*) oraz po skończonym eksperymentcie, podczas teoretycznego opracowywania zgromadzonych danych empirycznych (*off-line*).

Widać zatem, że współcześnie komputery używane są powszechnie zarówno w badaniach eksperymentalnych, jak i teoretycznych (np. w ramach symulacji komputerowych oraz do opracowywania olbrzymich ilości cyfrowych danych empirycznych). Warto zatem zastanowić się, czy wprowadzenie tego nowego narzędzia badawczego, doprowadziło do radykalnej zmiany w nauce końca XX i początku XXI wieku. Tak więc głównym pytaniem, na które będę poszukiwał odpowiedzi jest, czy komputer zrewolucjonizował badania naukowe. Aby udzielić odpowiedzi na to pytanie opiszę współczesną naukę wspomaganą cyfrowo na przykładzie badań prowadzonych w największym laboratorium fizyki cząstek elementarnych². Następnie przypomnę klasyczną koncepcję rewolucji w nauce, którą zaproponował Thomas S. Kuhn. Na zakończenie postaram się udzielić odpowiedzi na pytanie o cyfrową rewolucję w nauce.

² Omawiając część eksperymentalną współczesnych badań naukowych korzystam z dotychczasowych ustaleń zawartych w monografii (Leciejewski, 2013).

2. Nauka wspomagana cyfrowo

W pierwszej połowie 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 (np. 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” (Giza, 2006, s. 190).

Warto odnotować, że już w latach czterdziestych i pięćdziesiątych XX wieku naukowcy zajmujący się fizyką jądrową musieli zmagać się z dużą ilością żmudnych obliczeń. Były one potrzebne podczas projektowania bomby jądrowej i termojądrowej. Naukowcy ci wnikaliby bowiem do świata, którego nikt nie znał z bezpośredniego doświadczenia. Jedynym sposobem wglądu były symulacje komputerowe wykorzystujące dostępną wiedzę teoretyczną³. Szybko jednak okazało się,

³ Postęp w zakresie budowy komputerów oraz metod obliczeniowych dał naukowcom nowe narzędzie badawcze, jakim jest symulacja komputerowa. W ogólności jest to program komputerowy opracowany w celu modelowania zachowań rzeczywistego układu.

że stopień złożoności obliczeniowej w przypadku bomby wodorowej jest tak wielki, iż nie mógł sobie z nim poradzić nawet ENIAC (ang. *Electronic Numerical Integrator And Computer*). To właśnie brak odpowiednich mocy obliczeniowych spowodował, że próbny wybuch termojądrowy nastąpił dopiero w 1952 roku. Pierwszy realistyczny sposób konstrukcji bomby wodorowej zaproponował Stanisław Ulam, jeden z pionierów metod komputerowych symulacji matematycznych (por. Białyński-Birula i Białyńska-Birula, 2007, s. 17). To on zdołał na podstawie uproszczonych obliczeń wykazać, że początkowy projekt nie doprowadzi do eksplozji. Wyniki Ulama umożliwiły modyfikację koncepcji z 1951 roku. Do tego też czasu laboratorium w Los Alamos pozyskało nowy, potężniejszy komputer MANIAC (ang. *Mathematical Analyzer, Numerator, Integrator, and Computer*), 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. Bardzo często pełni on także inne role w naukach empirycznych – jest bowiem powszechnie wykorzystywany do akwizycji danych empirycznych z przyrządów pomiarowych oraz precyzyjnego sterowania przebiegiem eksperymen-

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.

Dzięki zastosowaniu komputerów w badaniach naukowych potrafimy uzyskiwać wyniki, które mogą być analitycznie nieobliczalne (np. procedury całkujące i różniczkujące, interpolacja i aproksymacja). Por. (Leciejewski, 2013, s. 77–85).

tów⁴. Komputer może także być urządzeniem gromadzącym dane empiryczne i porównującym te dane z modelami teoretycznymi zakodowanymi cyfrowo.

Najłatwiej rolę komputera, jako urządzenia umożliwiającego współczesne badania naukowe, prześledzić można na przykładzie największego laboratorium z zakresu fizyki cząstek elementarnych, jakim jest Europejska Organizacja Badań Jądrowych CERN (fr. *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*, obecnie – *Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire*). W dniu 4 lipca 2012 roku na seminarium w CERN w Genewie przedstawiono wyniki poszukiwań bozonu Higgsa w eksperymentach przeprowadzanych na akceleratorze LHC (ang. *Large Hadron Collider* – Wielki Zderzacz Hadronów). Zaprezentowane wyniki oparte były na danych zebranych w latach 2011–2012. W eksperymentach CMS (ang. *Compact Muon Solenoid*) i ATLAS (ang. *A Toroidal LHC Apparatus*) w analizie przypadków zderzeń proton–proton, w których pojawiają się dwa fotony lub cztery leptony, zaobserwowano znaczący sygnał, który zinterpretowano jako produkcję i rozpad cząstki o masie około 125 GeV (CMS) lub około 126 GeV (ATLAS) (por. Nowina-Konopka, 2012, s. 98–99). Wyznaczone własności tej cząstki wskazują, że jest to poszukiwany w wielu eksperymentach bozon Higgsa⁵.

Warto zapytać, czy tego typu przełomowe odkrycia empiryczne w fizyce cząstek elementarnych mogłyby mieć miejsce bez syste-

⁴ Taki układ eksperymentalny został szczegółowo opisany w (Leciejewski, 2013, s. 36–61).

⁵ Po sukcesie, jakim było odkrycie bozonu Higgsa, nastąpił okres przebudowy LHC mający na celu osiągnięcie pełnej świetności przy energii zderzeń 14 TeV. Po tych przeróbkach detektory zaczęły zbierać 10 razy więcej danych niż w stadium początkowym pracy LHC. W tym czasie w CERN zaczęto intensywniej eksplorować również inne ważne programy badawcze z zakresu fizyki dotyczące m.in.: kaonów, promieniowania kosmicznego, supersymetrii, ciemnej materii oraz antymaterii. Por. (Nowina-Konopka, 2014, s. 30–34).

mów komputerowego wspomaganie badań eksperymentalnych? Odpowiedź na to pytanie wydaje się oczywista: bez wspomaganie komputerowego nie można przeprowadzić większości współczesnych eksperymentów. Dzieje się tak, ponieważ w tego typu eksperymentach mamy do czynienia ze zbyt dużą ilością danych napływających jednocześnie ze zbyt wielu urządzeń pomiarowych. Najłatwiej prześledzić to na eksplorowanym już przykładzie LHC⁶.

W LHC około 150 milionów czujników dostarcza dane eksperymentalne z częstością 40 milionów razy na sekundę. Po wstępnym przefiltrowaniu cyfrowym (kasuje się przypadki standardowe, które są już znane) uzyskuje się około 100 interesujących zderzeń na sekundę. Szybkość przesyłania danych ze wszystkich detektorów wynosi około 700 MB/s (tj. około 15 000 000 GB na rok). Te ogromne ilości informacji cyfrowych są dostępne dla tysięcy naukowców na całym świecie i są przez nich analizowane. Zadaniem Sieci Komputerowej LHC (*LHC Computing Grid*) jest zbieranie i archiwizacja danych oraz dostarczanie infrastruktury oraz oprogramowania do ich analizy.

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.

⁶ Ze szczegółami technicznymi dotyczącymi konstrukcji zderzacza LHC zapoznać się można np. w obszernym artykule (Kulka, 2009).

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. System sterowania wiązką w LHC musi być na tyle precyzyjny i szybki, aby 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). Tak precyzyjne sterowanie złożonym eksperymentem (m.in. włączanie wnęk rezonansowych 10 000 razy na sekundę) 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 wyżej.

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 niniejszej sekcji – stosuje się komputerowe systemy akwizycji, archiwizacji oraz analizy napływających z detektorów danych. Takim rozproszonym systemem teoretycznej 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 PB pamięci dyskowej), jednak jak się okazuje 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 w 34 krajach na całym świecie, które zajmują się przeprowadzaniem symulacji komputerowych opartych na danych empirycznych zgromadzonych w Tier-0 i Tier-1 oraz wspomaganą cyfrowo teoretyczną 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 do ich analizy.

Uzyskanie wyników dotyczących odkrycia bozonu Higgsa wymagało użycia kilkunastu różnych programów komputerowych służących do przeprowadzania analiz danych empirycznych, całej mocy obliczeniowej Tier-0, siedmiu centrów obliczeniowych Tier-1 i pięćdziesięciu centrów Tier 2. Przeanalizowano w sumie około 30 PB danych empirycznych, używając do tego mocy obliczeniowej 300 000 procesorów oraz zużywając 170 PB przestrzeni dyskowej. Dane te uzyskało i analizowało ponad 2800 naukowców ze 178 ośrodków naukowych.

Warto jeszcze raz podkreślić, że 30 PB to tak 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.

Tak więc 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 współcześnie 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.

Z przytoczonych informacji dotyczących ilości przetwarzanych danych empirycznych w eksperymencie prowadzonym z użyciem LHC widać także, że nie tylko sam eksperyment, ale także analizy teoretyczne polegające m.in. na porównywaniu danych empirycznych z wyprowadzonymi z modeli teoretycznych prognozami, byłyby niemożliwe bez wspomagania komputerowego. Gdyby bowiem jeden fizyk chciał przeanalizować 30 PB znaczących danych empirycznych, to samo ich czytanie zajęłoby mu około 510 mld lat przy założeniu, że będzie czytał 100 stron znormalizowanego maszynopisu A4 dziennie.

Do tego należałoby doliczyć kolejne setki miliardów lat potrzebnych na analizę danych oraz ich interpretację w świetle obowiązujących koncepcji teoretycznych.

Widać zatem, że współczesnych badań naukowych (eksperymentalnych i teoretycznych bazujących np. na skomplikowanych symulacjach komputerowych przetwarzających olbrzymie ilości danych empirycznych) nie dałoby się prowadzić bez udziału cyfrowych technik akwizycyjnych, sterujących oraz obliczeniowych, których elementem kluczowym są bardzo szybkie i wydajne komputery zorganizowane w architektury sieciowe.

Czy zatem możemy mówić o cyfrowej rewolucji w nauce? Na to pytanie postaram się odpowiedzieć w ostatniej części artykułu po wcześniejszym przypomnieniu klasycznej już koncepcji rewolucji w nauce.

3. Rewolucje w nauce

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 referował⁷. Przytoczę jedynie te wątki z jego dorobku, które posłużą do udzielenia odpowiedzi na pytanie, czy pod koniec XX wieku miała miejsce cyfrowa rewolucja naukowa.

Według Kuhna w okresie tzw. nauki normalnej konstituowana jest ona przez jakiś paradygmat, którym są „powszechnie uznawane

⁷ Omawiając poglądy Kuhna, wykorzystam opracowanie (Jodkowski, 1990), gdyż wydobywa ono podstawowe składniki koncepcji Kuhna istotne dla poruszanej przeze mnie problematyki.

osiągnięcia naukowe, które w pewnym czasie dostarczają społeczności uczonych modelowych problemów i rozwiązań” (Kuhn, 2009, s. 10). W opinii Kazimierza Jodkowskiego 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” (Jodkowski, 1990, s. 140).

Współcześnie zwraca się uwagę na 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 te uczynił Kuhn swoim drugim rodzajem paradygmatu (por. Jodkowski, 1990, s. 143–147).

Tak więc, 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 wzorec rozwiązywania problemów. Na podstawie zbioru rozwiązań konkretnych przykładowych problemów uczony, w ramach nauki normalnej, rozwiązuje nowo napotymane problemy.

Kuhn uważał także, że teorie po sobie następujące, oddzielone od siebie rewolucją naukową, są niewspółmierne, tj. w pewnym sensie różne, odmienne, nieporównywalne (por. Jodkowski, 1990, s. 309–313). Jodkowski wyróżnia cztery poziomy niewspółmierności u Kuhna. Są to: zmienność obserwacyjna, zmienność językowa, zmienność metodologiczna i zmienność ontologiczna (por. Jodkowski, 1990, s. 328–379). Uczeni 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) (por. Jodkowski, 1990, s. 371–379).

Warto także podkreślić, że nauka według Kuhna ma charakter wspólnotowy⁸, 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 i po rewolucji różne mogą być także metody i standardy rozwiązywania problemów (por. Jodkowski, 1990, s. 551–555).

Zmiany normalne w nauce, 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 przyrodniczych (por. Jodkowski, 1990, s. 166). „W więk-

⁸ Warto przypomnieć, że z taką właśnie sytuacją mamy do czynienia podczas gromadzenia danych w ramach złożonych eksperymentów oraz obróbki danych dzięki wykorzystaniu cyfrowych infrastruktur sieciowych (np. WLCG). Innymi słowy, to właśnie cyfrowa komunikacja internetowa umożliwia taką wspólnotową pracę bardzo dużych grup naukowców.

szości 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” (Jodkowski, 1990, s. 174).

Kuhn zauważył ważny fakt, że doskonalenie sprzętu pomiarowego i badawczego wywiera wpływ na teorie naukowe, jednakże nie docenił należycie znaczenia rozwoju aparatury badawczej. Sam zaznacza w *Strukturze rewolucji naukowych*, że poza przygodnymi wzmiankami nie omawia roli, jaką w rozwoju nauki odgrywa postęp techniczny (por. Kuhn, 2009, s. 13). Przypuszcza jednak, „że dokładne rozpatrzenie tych kwestii (...) w istotnym wymiarze pogłębiłoby analizę i rozumienie postępu naukowego” (Kuhn, 2009, s. 13–14).

4. Podsumowanie

Jeśli paradygmat Kuhna 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 naukowe. Uzyskana odpowiedź z pewnością nie będzie jednoznaczna,

gdyż rozważania Kuhna są zasadniczo teoretyczystyczne⁹. 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 naukowych 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 badań naukowych wspomaganych komputerowo.

Tak więc zastosowanie komputera w naukach empirycznych byłoby rewolucyjne wówczas, gdyby większość naukowych problemów rozwiązywana była za pomocą systemów komputerowych. Z takim właśnie zjawiskiem mamy do czynienia od lat osiemdziesiątych XX wieku, gdy powszechnie zaczęto stosować w naukach empirycznych systemy komputerowego wspomaganie badań eksperymentalnych. Współcześnie zaś większość tego typu badań prowadzona jest przy użyciu komputerów. Ponadto komputery są narzędziami badawczymi umożliwiającymi współczesne badania eksperymentalne (por. Leciejewski, 2013, s. 107–115). 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 naukowych wspomaganych komputerowo, a przejście od analogowych do cyfrowych badań empirycznych można uznać za zmianę rewolucyjną, całkowicie bowiem zmienił się sposób rozwiązywania konkretnych problemów badawczych.

⁹ „Teoretycyzm jest stanowiskiem, którego zwolennicy uważają, iż zmatematyzowane nauki empiryczne są zbiorem teorii, a teorie naukowe są dobrze zdefiniowanymi przedmiotami” (Zeidler, 1994, s. 89).

Warto przypomnieć, że współcześnie to nie eksperymetatorzy, 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, eksperymetatorzy 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 (co w skrócie opisałem na przykładzie LHC). 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 wspomagania 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. Leciejewski, 2013, s. 63–75). Inny jest także status eksperymentatora w tego typu badaniach (por. Leciejewski, 2013, s. 76–93). Analiza metodologiczna eksperymen-

tów wspomaganych komputerowo jednoznacznie sugeruje ich odmiennosc od eksperymentów klasycznych (por. Leciejewski, 2013, s. 62–93). 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. Leciejewski, 2013, s. 115–121). Wcześniej, gdy nie było systemów komputerowego wspomaganie badań naukowych, świat nie był tylko „informacją do przetworzenia” (Bolter, 1990, s. 43), nie „składał” się z bitów, ale raczej z atomów itp. Po cyfryzacji badań naukowych 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 jedyńki 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. Leciejewski, 2013, s. 44–48, 60–61). Mogłoby to sugerować także niewspółmierność na poziomie językowym podczas przejścia z analogowego na cyfrowy sposób badania świata.

Próbując odpowiedzieć na pytanie, czy komputer zrewolucjonizował badania naukowe w kontekście propozycji Kuhna, warto przyrzeć 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 badawczego (por. Kuhn, 2009, s. 13–14). Tym nowym instrumentem badawczym jest komputer i możliwości użycia go do sterowania przebiegiem eksperymentów oraz jako urządzenia służącego do akwizycji i cyfrowego (teoretycznego) przetwarzania napływających danych eksperymentalnych. Komputer jednak nie został wykorzystany do przebudowy jakiejś teorii, ale radykalnie zmienił sposób pracy naukowej. W tym kontekście można zatem sugerować zmianę paradygmatu w badaniach eksperymentalnych bez paradygmatycznej zmiany w teorii (np. podstawą nowatorskich, skomputeryzowanych eksperymentów w CERN jest historyczny 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 techniczny (por. Kuhn, 2009, s. 13), a jest to, jak się wydaje, współcześnie bardzo ważny element determinujący rozwój nauki. Jej cyfryzacja doprowadziła bowiem do zmian rewolucyjnych, których nie da się jednoznacznie oraz precyzyjnie opisać w aparacie pojęciowym autora *Struktury rewolucji naukowych*.

Jak wynika z powyższych analiz można stwierdzić, że na przełomie XX i XXI wieku mieliśmy do czynienia z radykalną zmianą pracy naukowej (zarówno tej o charakterze teoretycznym, jak i eksperymentalnym). Komputery bowiem umożliwiły prowadzenie skomplikowanych eksperymentów naukowych oraz złożonych cyfrowych symulacji. Można zatem mówić o cyfrowej rewolucji naukowej, której szczegółowe analizy cały czas czekają na swojego autora (książka o tytule *Struktura cyfrowej rewolucji naukowej* cały czas czeka na opracowanie).

Bibliografia

- Białyński-Birula, I. i Białyńska-Birula, I., 2007. *Modelowanie rzeczywistości. Jak w komputerze przegląda się świat*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
- Bolter, J.D., 1990. *Człowiek Turinga. Kultura Zachodu w wieku komputera*. Warszawa: PIW.
- Giza, P., 2006. *Filozoficzne i metodologiczne aspekty komputerowych systemów odkryć naukowych*. Lublin: Wydawnictwo UMCS.
- Jodkowski, K., 1990. *Wspólnoty uczonych, paradygmaty i rewolucje naukowe*. Lublin: Wydawnictwo UMCS.
- Kraśniński, A., 2016. *O dwóch kulturach nauk przyrodniczych: teoretycznej i eksperymentalnej. Studium z filozofii i metodologii przyrodoznawstwa*. Poznań: Wydawnictwo Naukowe Wydziału Nauk Społecznych UAM.
- Kuhn, T.S., 2009. *Struktura rewolucji naukowych*. Warszawa: Aletheia.
- Kulka, J., 2009. Techniczne aspekty zderzacza LHC. *Postępy Fizyki*, 60(3), ss. 109–118.
- Leciejewski, S., 2013. *Cyfrowa rewolucja w badaniach eksperymentalnych. Studium metodologiczno-filozoficzne*. Poznań: Wydawnictwo Naukowe UAM.
- Nowina-Konopka, M., 2012. Bozon Higgsa zarejestrowany w eksperymentach ATLAS i CMS. *Postępy Fizyki*, 63(3), ss. 98–99.
- Nowina-Konopka, M., 2014. CERN – poszukiwania antymaterii. *Postępy Fizyki*, 64(1-6), ss. 30–34.
- Zeidler, P., 1994. Nowy eksperymentalizm a teoretycyzm. Spór o przedmiot i sposób uprawiania filozofii nauki. W: Sobczyńska, D. i Zeidler, P. red. *Nowy eksperymentalizm – teoretycyzm – reprezentacja*. Poznań: Wydawnictwo Naukowe IF UAM, ss. 87–108.