DOI: 10.14746/sh.2017.29.4.003

Sensus Historiae
ISSN 2082–0860
Vol. XXIX (2017/4)
s. 39-51

Sławomir Leciejewski
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

Komputer jako narzędzie umożliwiające współczesne badania eksperymentalne (na przykładzie Wielkiego Zderzacza Hadronów)

Wprowadzenie. Cyfrowe badania naukowe

Do połowy XX w. 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 w. sytuacja zaczęła się zmieniać, gdyż rola komputerów w naukach empirycznych zaczęła być 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.[1]

To, że pojawiły się programy typu GELL-MANN umożliwiające przeprowadzanie rozumowań prowadzących do sformułowania modelu struktury kwarkowej na poziomie praw fenomenologicznych, jest oczywistą konsekwencją istnienia komputerów o odpowiednich parametrach, na których uruchamiane są systemy odkryć naukowych. Naukowcy — jak wspomniano

[1] P. Giza, *Filozoficzne i metodologiczne aspekty komputerowych systemów odkryć naukowych*, Wydawnictwo Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej, Lublin 2006, s. 190.

— nie byliby w stanie przeprowadzać tego typu rozumowań opartych jedynie na prawach fenomenologicznych opisujących wielkości empiryczne i zależności przyczynowe[2].

Już znacznie wcześniej, bo w latach 40. i 50. XX w., fizycy zajmujący się fizyką jądrową musieli borykać się z dużą ilością żmudnych obliczeń. Było to potrzebne podczas projektowania bomby jądrowej i termojądrowej. Naukowcy ci zmagali się ze światem, którego nikt nie znał z bezpośredniego doświadczenia. Jedynym sposobem wglądu w ten świat były symulacje komputerowe wykorzystujące dostępną wiedzę teoretyczną[3]. Szybko jednak okazało się, że stopień złożoności obliczeniowej w przypadku bomby wodorowej jest tak wielki, że nie mógł sobie z nim poradzić nawet ENIAC[4]. To właśnie brak odpowiednich mocy obliczeniowych spowodował, że pierwszy próbny wybuch termojądrowy nastąpił dopiero w 1952 r. Nie byłoby go, gdyby nie Polak Stanisław Ulam, jeden z pionierów metod komputerowych symulacji matematycznych. To on zdołał na podstawie uproszczonych obliczeń wykazać, że pierwszy projekt bomby wodorowej nie doprowadzi do eksplozji. Wyniki Ulama umożliwiły modyfikację koncepcji z 1951 r., do tego też czasu laboratorium w Los Alamos pozyskało nowy, potężniejszy komputer MANIAC[5], który umożliwił obliczeniowe potwierdzenie założeń Ulama. Tak więc szybkie powstanie i przetestowanie bomby termojądrowej było możliwe dzięki odpowiedniej mocy obliczeniowej komputera MANIAC.

Współcześnie jednak komputera nie wykorzystuje się tylko i wyłącznie do przeprowadzania szybkich obliczeń arytmetycznych związanych z symulacjami komputerowymi. Bardzo często komputer pełni także inne role w naukach empirycznych. Jest on bowiem powszechnie wykorzystywany do akwizycji danych empirycznych z przyrządów pomiarowych oraz precyzyjnego sterowania przebiegiem eksperymentów. We współczesnych układach eksperymentalnych wspomaganych komputerowo można wyróżnić kilka

[2] Por. *ibidem*, s. 180-192.

[3] Por. P. Galison, *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. 119-137.

[4] ENIAC (*Electronic Numerical Integrator And Computer*) składał się z 18 000 lamp, 6 000 przekaźników elektromechanicznych, zajmował powierzchnię ponad 150 m^2, pobierał moc równą 200 kW, a jego ciężar wynosił około 30 ton. Komputer ten pracował w systemie dwójkowym, operacja dodawania trwała 2 ms, a mnożenia — 2,8 ms.

[5] MANIAC był to komputer oparty na architekturze von Neumanna, zbudowany w Los Alamos Scientific Laboratory na przełomie lat 40. i 50., a uruchomiony w marcu 1952 r. Komputer ten miał pamięć operacyjną 600 słów, a taktowany był zegarem 11 kHz. Zbudowano go z 2400 lamp elektronowych. Był to najpotężniejszy komputer swoich czasów, a głównym sposobem jego wykorzystania była pomoc przy projektowaniu bomby wodorowej.

podstawowych elementów sprzętowych stanowiących jedną funkcjonalną całość. Informacje na temat obiektu badań doświadczalnych pobiera się za pomocą urządzeń pomiarowych (czujników). Następnie ta analogowa informacja ulega wstępnemu przetwarzaniu przy użyciu przetworników analogowo-cyfrowych. 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)[6].

Komputer może być także 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. Odkształcenia 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, a 0 — jego brak). Ten rodzaj kodu jest na tyle uniwersalny, że można w nim wyrażać różne wielkości fizyczne, symbole językowe (jak np. w kodzie ASCII) itd. Jest on ponadto bardzo odporny na zakłócenia. Jeśli np. spadnie napięcie prądu, zmienia się diametralnie sens sygnału analogowego (reprezentuje on już wtedy zupełnie inną wartość liczbową), 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 nic nie zgubi z pierwotnej wielkości. Tymczasem zapis cyfrowy wymaga ucięcia danej liczby do n-tego miejsca po przecinku i ignorowania całej nieskończonej reszty, co

[6] Por. S. Leciejewski, *Specyfika wspomaganych komputerowo badań eksperymentalnych w naukach przyrodniczych*, „Studia Philosophiae Christianae", 45 (2009), 1, s. 121-125.

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 AudioCD i starej, analogowej płyty winylowej). Zatem metodzie analogowej trzeba by przypisać przewagę w dokładności w jakimś idealnym świecie, w którym 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 w.

Odkrycie bozonu Higgsa w Wielkim Zderzaczu Hadronów

Najłatwiej rolę komputera, jako urządzenia umożliwiającego współczesne badania eksperymentalne można prześledzić na przykładzie największego laboratorium fizyki cząstek elementarnych, jakim jest CERN, i na przykładzie prac badawczych prowadzonych tam w drugiej dekadzie XX w.[7] Czwartego lipca 2012 r. na seminarium w CERN w Genewie przedstawiono wyniki poszukiwań bozonu Higgsa w eksperymentach przeprowadzanych na akceleratorze LHC (ang. *Large Hadron Collider* — LHC)[8]. Zaprezentowane wyniki oparte są na danych zebranych w latach 2011–2012 (do 18 czerwca 2012 r.).

[7] Wybrałem przykład laboratorium CERN, gdyż badania tam prowadzone zakończyły się spektakularnym sukcesem (odkryciem bozonu Higgsa). Jednakże praktycznie wszystkie eksperymenty fizyczne prowadzone w XXI w. są, w mniejszym lub większym stopniu, wspomagane cyfrowo. Analiza dowolnego innego współczesnego eksperymentu fizycznego doprowadziłaby do podobnych wniosków jak, prezentowane w niniejszym artykule.

[8] LHC jest akceleratorem, w którym zderzają się przeciwbieżne wiązki cząstek (przyspieszeniu poddawane są hardony — protony i jony). Każda wiązka protonów biegnąca wokół LHC w roku 2012 miała energię 7 TeV, więc podczas zderzenia uzyskiwano łączną energię 14 TeV. Wiązki jonów ołowiu miały energię zderzenia 1150 TeV.

Celem eksperymentów prowadzonych na LHC w latach 2011–2012 była m.in. odpowiedź na pytanie, dlaczego niektóre cząstki mają masę spoczynkową, a inne takiej masy nie mają w ogóle. Najbardziej prawdopodobną odpowiedzią na nie jest tzw. mechanizm Higgsa (cała przestrzeń wypełniona jest tzw. polem Higgsa, przez oddziaływanie z nim 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 było jednym w ważniejszych oczekiwań eksperymentów z LHC. Innym celem tego eksperymentu było odkrycie najlżejszych cząstek supersymetrycznych (chodziło o potwierdzenie supersymetrii — teorii unifikującej wszystkie cztery oddziaływania) będących przypuszczalnie składnikami ciemnej materii. LHC miał pomóc także w badaniu nierównej ilości materii i antymaterii 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.

W eksperymentach CMS (ang. *Compact Muon Solenoid*)[9] i ATLAS (ang. *A Toroidal LHC ApparatuS*)[10] 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). Wyznaczone do tej pory własności tej cząstki wskazują, że jest to poszukiwany w wielu eksperymentach bozon Higgsa[11].

Idea takiej nowej cząstki pojawiła się w artykule Petera Higgsa opublikowanym w 1964 r.[12] W artykule tym pojawiło się teoretyczne wyjaśnienie pochodzenia masy cząstek elementarnych. Zaproponował w nim istnienie w próżni pola skalarnego, które na początku istnienia Wszechświata było nieaktywne. Dopiero, gdy Wszechświat zaczął się rozszerzać i ochładzać, pole to zaczęło działać i nadało masę nieważkiej dotychczas materii[13].

D. Lincoln, *Kwantowa granica. LHC — Wielki Zderzacz Hadronów*, przeł. E.L. Łokas, B. Bieniok, Prószyński i S-ka, Warszawa 2010, s. 50-105.

[9] Pierwszy koncepcyjny projekt eksperymentu CMS powstał w roku 1992. Budowa gigantycznego detektora (średnica 15 metrów, długość prawie 29 metrów i waga 14 000 ton) pochłonęła 16 lat starań jednej z największych grup badawczych w historii świata: 3 275 fizyków (w tym 1 535 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 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).

[10] 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 ton).

[11] 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 TeV with the ATLAS detector at the LHC*; *Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC*; *Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC*.

[12] Por. P.W. Higgs, *Broken symmetries and the masses of gauge bosons*, „Phisical Review Letters" 1964, vol. 13, no. 16, s. 508-509.

[13] Por. I. Sample, *Peter Higgs. Poszukiwania boskiej cząstki*, przeł. B. Bieniok, E.L. Łokas, Prószyński Media, Warszawa 2012, s. 10-11.

Mechanizm Higgsa odegrał decydującą rolę w opracowaniu teorii oddziaływania elektrosłabego przez Weinberga w 1967 r.[14] Bez tego mechanizmu unifikacja oddziaływania elektromagnetycznego i jądrowego słabego byłaby niemożliwa. Z teorii elektrosłabej wynikało wiele przewidywań, które można było zweryfikować eksperymentalnie. Były to chociażby dwa nowe rodzaje cząstek, wuony i zetony odpowiedzialne za przenoszenie oddziaływań słabych. Odkryto je w 1983 r., w akceleratorze SPS (ang. *Super Proton Synchrotron*) działającym w CERN-ie od roku 1976. Warto podkreślić, że uzyskanie tego wyniku nie byłoby możliwe bez komputerowego wspomagania sterowania tym eksperymentem i bez numerycznej analizy uzyskanych danych empirycznych.

W roku 2008, w tym samym laboratorium, uruchomiono Wielki Zderzacz Hadronów. Jednym z detektorów zamontowanych w tym urządzeniu jest, wspomniany już, detektor CMS. Zaobserwowano w nim 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 LEP (ang. *Large Electron-Positron Collider*) działający uprzednio w CERN. W ramach statystycznych i systematycznych błędów[15], wyniki uzyskane w różnych kanałach poszukiwań są zgodne z oczekiwaniami dla bozonu Higgsa w ramach modelu standardowego[16]. Do końca roku 2012 w eksperymencie CMS ponad 3-krotnie powiększono zebraną próbkę danych i dokładniej zbadano naturę obserwowanej nowej cząstki[17]. Następnie przeanalizowano także wszystkie konsekwencje istnienia nowej cząstki dla standardowego modelu cząstek elementarnych[18].

Po sukcesie, jakim było odkrycie bozonu Higgsa, nastąpił okres przebudowy LHC mający na celu osiągnięcie pełnej świetlności 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-ie zaczęto intensywniej badać również inne ważne problemy z zakresu fizyki dotyczące

[14] Por. S. Weinberg, *A Model of Leptons*, „Phisical Review Letters" 1967, vol. 19, s. 1264-1266.

[15] Szczegółową analizę błędów doświadczalnych znaleźć można w: M. Czarnocka, *Doświadczenie w nauce. Analiza epistemologiczna*, Instytut Filozofii i Socjologii PAN, Warszawa 1992, s. 133-155. Autorka proponuje typologię błędów powszechną w metodyce nauki, dzieląc błędy na: grube, systematyczne i przypadkowe. Omawia także problemy epistemologiczne związane z tego typu błędami doświadczalnymi.

[16] Por. B. Grządkowski, *Cząstka Higgsa istnieje?*, „Postępy Fizyki" 2012, t. 63, z. 3, s. 103-104.

[17] Por. M. Nowina-Konopka, *Bozon Higgsa zarejestrowany w eksperymencie ATLAS i CMS*, „Postępy Fizyki" 2012, t. 63, z. 3, s. 98-99.

[18] Por. P.C. Bhat, *Observation of a Higgs-like Boson in CMS at the LHC*, „Nuclear Physics B" 2013, no. 234, s. 7-14.

m.in.: kaonów, promieniowania kosmicznego, supersymetrii, ciemnej materii oraz antymaterii[19].

Cyfrowe badania eksperymentalne na przykładzie Wielkiego Zderzacza Hadronów

Warto zapytać, czy tego typu przełomowe odkrycia empiryczne w fizyce cząstek elementarnych mogłyby mieć miejsce bez systemów komputerowego wspomagania badań eksperymentalnych? Odpowiedź na to pytanie wydaje się oczywista: bez wspomagania komputerowego większości współczesnych eksperymentów nie można byłoby przeprowadzić. Jednakże pojawia się kolejne pytanie, dlaczego byłoby to niemożliwe? W tego typu eksperymentach mamy bowiem 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: ALICE[20], ATLAS, CMS, LHCb[21], LHCf[22] oraz TOTEM[23]. 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

[19] Por. M. Nowina-Konopka, *CERN — poszukiwania antymaterii*, „Postępy Fizyki" 2014, t. 64, z. 1-6, s. 30-34.

[20] 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 ton.

[21] 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 szereg poddetektorów, które wykrywają głównie cząstki lecące do przodu. Pierwszy poddetektor zbudowany jest wokół punktu zderzenia, następne umieszczone jeden za drugim na odległości około 20 m (detektor ma w sumie 21 m długości, 10 m wysokości i 13 m szerokości, a waży 5 600 ton).

[22] W eksperymencie LHCf badane są cząstki emitowane 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.

[23] W eksperymencie TOTEM mierzone są efektywne rozmiary protonu. W eksperymencie stosuje się 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 ton.

ich położenia w przestrzeni, pomiar ładunku, prędkości, masy i energii. Aby to osiągnąć detektory, mają wiele warstw lub poddetektorów, w których każdy spełnia szczególną rolę w rekonstrukcji zderzenia[24].

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 energię.

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 fizykom z wcześniejszych prac badawczych) uzyskuje się około 100 interesujących zderzeń na sekundę. Szybkość przesyłania danych ze wszystkich eksperymentów 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 są przez nich analizowane. Zadaniem Sieci Komputerowej LHC (*LHC Computing Grid*) jest zbieranie oraz archiwizacja danych oraz dostarczanie infrastruktury, a także 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. Tak więc bez wspomagania komputerowego nie jest możliwe pobieranie danych empirycznych we współczesnych eksperymentach naukowych. Bez takiego wspomagania 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.

[24] 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.

Chodzi m.in. o to, aby system sterowania wiązką w LHC był na tyle precyzyjny i szybki, aby możliwe było uzyskanie nominalnej liczby około 11 245 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 kinetycznej pociągu ważącego 400 ton jadącego z prędkością 150 km/h). Wiązka musi być zatem bardzo precyzyjnie sterowana, gdyż niekontrolowana utrata wiązki 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 (około 0,0002 sekundy) układ magnesów powinien usunąć wiązkę z LHC. Wiązka skierowana zostaje wówczas specjalnym tunelem do bloku zatrzymującego wiązkę składającego się ze stosu płyt grafitowych o różnych gęstościach.

Tak precyzyjne sterowanie złożonym eksperymentem nie byłoby możliwe bez systemu komputerowego wspomagania badań doświadczalnych. Bez tego systemu nie byłoby także możliwe uzyskanie jakichkolwiek ważnych wyników badań eksperymentalnych, jakimi niewątpliwie są te, o których wspomniałem na początku poprzedniego rozdziału. Wyniki świadczące o odkryciu bozonu Higgsa były możliwe do uzyskania podczas długotrwałych badań eksperymentalnych prowadzonych przy użyciu LHC w CERN.

Uzyskanie tak ważnych wyników było możliwe dzięki temu, że w CERN-ie istnieje odpowiednia aparatura badawcza (LHC), przeprowadza się tam bardzo skomplikowane eksperymenty fizyczne (opisane wcześniej) 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 PB[25] pamięci dyskowej) jednak stanowią one tylko około 20% potrzebnej mocy obliczeniowej.

Zasoby centrum komputerowego CERN (stanowiące tzw. Tier-0) służą jedynie do zapisu danych eksperymentalnych, podstawowej obróbki danych empirycznych (kasowaniu znanych przypadków standardowych) oraz dystrybucji danych do kolejnych poziomów rozległej sieci służącej do przechowywania i analizowania danych uzyskiwanych w LHC (tj. Tier-1 oraz Tier-2). Tier-1 to 11 centrów obliczeniowych w Europie i USA, 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 przeprowadzanych przez ponad 8 000 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 programów komputerowych[26], całej mocy obliczeniowej Tier-0, siedmiu centrów obliczeniowych Tier-1 i 50 centrów Tier-2[27]. Przeanalizowano w sumie około 30 PB danych empirycznych, używając do tych analiz mocy obliczeniowej 300 000 procesorów oraz zużywając 170 PB przestrzeni dyskowej. Dane te uzyskało i analizowało ponad 2 800 naukowców ze 178 ośrodków naukowych[28].

Warto przypomnieć, że 1 PB danych empirycznych, to jest 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[29], 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 tak wielkim i złożonym układem eksperymentalnym, który nie mógłby funkcjonować bez wspomagania komputerowego. Bez użycia komputerów nie można byłoby dojść do doniosłych poznawczo wyników uzyskanych w CERN-ie w latach 2011–2012.

[25] 1 PB (petabajt), tj. 1024 TB (terabajta), tj. 1024*1024 GB (gigabajta), tj. około 1 048 576 GB.

[26] Por. *Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC*, s. 2.

[27] *Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC*, „Physics Letters B", 716 (2012), s. 31.

[28] 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", 716 (2012), s. 17-28.

[29] Samo przeczytanie 30 PB danych zajęłoby człowiekowi około 510 mld lat przy założeniu, że będzie w stanie czytać 100 stron standardowego maszynopisu A4 dziennie.

Podsumowanie

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 (zastosowań w różnych dziedzinach). Jednym z bardzo ważnych zastosowań komputerów jest wspomaganie prac badawczych w naukach empirycznych.

W ogólności w badaniach doświadczalnych mamy do czynienia z trzema wzajemnie na siebie oddziałującymi czynnikami: eksperymentatorem, czyli podmiotem P przeprowadzającym eksperyment i interpretującym jego wyniki, badanym obiektem O, czyli przedmiotem badań doświadczalnych, oraz tym, co między nimi pośredniczy — z systemem automatyzacji badań doświadczalnych (ABD)[30]. Cel wprowadzenia takiego ogniwa pośredniczącego może być wieloraki.

> 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.[31]

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.[32]

---

[30] Por. J.L. Kulikowski, *Komputery w badaniach doświadczalnych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993, s. 7-10.

[31] *Ibidem*, s. 8.

[32] *Ibidem*.

Warto podkreślić, że bez wprowadzenia systemu wspomagania komputerowego badań doświadczalnych wielu doniosłych współczesnych eksperymentów naukowych nie można byłoby przeprowadzić i to z dwóch bardzo ważnych powodów. Po pierwsze, mamy do czynienia ze zbyt dużą ilością danych empirycznych napływających jednocześnie ze zbyt wielu urządzeń pomiarowych, co najlepiej widać na przykładzie Wielkiego Zderzacza Hadronów. Po drugie, przeprowadzenie współczesnych badań eksperymentalnych związane jest z koniecznością użycia bardzo precyzyjnych systemów sterowania skomplikowanymi urządzeniami wykonawczymi, co także najlepiej widoczne jest na przykładzie LHC.

Warto także zauważyć, że w kontekście zastosowania komputerowych systemów wspomagania badań doświadczalnych pojawiają się nie tylko zmiany ilościowe (komputer jako szybkie i precyzyjne narzędzie służące do rejestracji pomiarów oraz przeprowadzania obliczeń), ale również jakościowe[33]. Komputer, jako część systemu eksperymentalnego, umożliwia bowiem coś, co bez jego użycia byłoby niemożliwe do zrobienia:

- całkowanie numeryczne krzywych empirycznych — nowa metoda porównywania danych empirycznych z teorią (analitycznie niewykonalne)[34];
- metody numeryczne stosowane np. przy zagadnieniu wielu ciał w astronomii, tzn. uzasadnianie numeryczne (analitycznie niewyko-nalne)[35];
- analizowanie ogromnych baz danych empirycznych w celu znalezienia jakichś prawidłowości — tzn. odkrycie numeryczne; np. aby odkryć bozon Higgsa należało przeanalizować 30 PB danych (1 GB = 600 000 stron tekstu); analiza 30 PB danych bez systemów komputerowych jest niemożliwa (praktycznie niewykonalna, gdyż trwałaby ponad 500 mld lat);
- sterowanie najnowszymi eksperymentami z fizyki cząstek elementarnych (np. LHC w CERN); bez sterowania komputerowego najnowszych eksperymentów nie dałoby się przeprowadzić;

[33] Zmiany ilościowe i jakościowe można rozumieć na różny sposób. Na potrzeby niniejszego artykułu przyjmuję następujący sposób ich rozumienia:

- zmiany ilościowe — za pomocą nowej metody badawczej można coś zrobić szybciej, lub w większym zakresie;
- zmiany jakościowe — przy zastosowaniu nowej metody badawczej pojawia się nowa jakość, tzn. można zrobić coś, czego wcześniej, z różnych przyczyn, nie można było zrobić (tj. znaczenie tytułowego „umożliwienie").

[34] Por. S. Leciejewski, *Status eksperymentatora w naukach empirycznych a współczesne techniki informatyczne*, [w:] D. Sobczyńska, P. Zeidler (red.), *Homo experimentator*, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Filozofii UAM, Poznań 2003, s. 168-176.

[35] Por. *ibidem*, s. 176-183.

- postawienie konkretnych problemów badawczych, np. problem wartości energii bozonu Higgsa (bez systemu KWBD, tj. tylko *stricte* analitycznie np. na bazie standardowego modelu cząstek elementarnych, nie można tego problemu postawić, tzn. wyznaczyć na podstawie teorii wartości energii bozonu Higgsa);
- bez komputerów nie można byłoby uzasadnić hipotezy egzystencjalnej dotyczącej istnienia bozonu Higgsa.

Tak więc d0 prowadzenia dzisiaj poznawczo ważnych badań eksperymentalnych nieodzowny jest komputer jako bardzo ważna część układu eksperymentalnego. Jego zadaniem jest m.in. precyzyjne sterowanie przebiegiem eksperymentu oraz szybkie pobieranie danych empirycznych z wielu urządzeń pomiarowych. Komputer zatem umożliwia współczesne badania eksperymentalne[36], co uzasadniłem w niniejszym artykule na przykładzie Wielkiego Zderzacza Hadronów działającego w CERN.

Sławomir Leciejewski

Computer as a Tool for Modern Experimental Research (Large Hadron Collider Example)

Abstract

On the example of the Large Hadron Collider I try to justify the main thesis of the article according to which the computer enables modern experimental research. It is a necessary research device within the framework of empirical research conducted in the 21st century.

Keywords: philosophy of science, methodology of empirical research, experimentalism, computer aided research, computer-aided experiments.

[36] Można także wykazać, że komputer jest również bardzo ważnym elementem determinującym zmianę stylu badań eksperymentalnych. We współczesnych badaniach naukowych (a tym samym także eksperymentalnych) dominuje komputerowy styl badań naukowych, bowiem większość prac eksperymentalnych prowadzona jest przy użyciu systemów wspomagania komputerowego. Ta radykalna zamiana sposobu pracy większości naukowców, którzy do niemalże wszystkich wykonywanych przez siebie procedur badawczych używają wspomagania komputerowego, jest zmianą rewolucyjną.

Powyżej zasygnalizowane rozszerzenie rozważań zawartych w niniejszym artykule znaleźć można w monografii: S. Leciejewski, *Cyfrowa rewolucja w badaniach eksperymentalnych. Studium metodologiczno-filozoficzne*, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań 2013, s. 94-136.