Komputery i nauka

Zdzisław Pawlak
Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej PAN
44-100 Gliwice, ul. Bałtycka 5
E-mail: zpw@ii.pw.edu.pl

Motto:
*"Komputery są bezużyteczne.
One nie stawiają pytań".*
Pablo Picasso

1. WSTĘP

Rola komputera jako narzędzia współczesnej nauki jest powszechnie znana. Mniej znana jest natomiast szerszemu ogółowi druga rola komputerów w nauce - a mianowicie rola jako czynnika inspirującego nowe kierunki badań w wielu dziedzinach. Tej właśnie tematyce chciałbym poświęcić swoje wystąpienie. Oczywiście nie pretenduję do całkowitego omówienia tematu, a ograniczę się jedynie do wąskiego jego fragmentu, związanego z niektórymi problemami matematyki, dziedziny "odpornej" na "uroki" komputerów.

Powstanie współczesnych komputerów zapoczątkowało powrót do postawienia pytania czym jest matematyka, logika etc. Są to pytania nie tylko ważne metodologicznie, ale mają one swoje głębokie praktyczne uzasadnienie na gruncie informatyki. W szczególności pojęcia zbioru i wnioskowania okazały się ważne nie tylko dla matematyków, logików czy filozofów, ale badania nad nimi dostały nowego impulsu dzięki informatyce i jej zastosowaniom.

Zagadnienia te chciałbym krótko omówić w swym wystąpieniu. Nim jednak przystąpię do głównego tematu swych rozważań parę słów chciałbym poświęcić komputerom jako narzędziu nauki, gdyż oba te zagadnienia są ze sobą ściśle związane.

2. KOMPUTERY JAKO NARZĘDZIE W BADANIACH NAUKOWYCH

Prawie we wszystkich dyscyplinach naukowych i technicznych komputery są nieodzownym narzędziem, spełniającym różnorakie role. Poniżej podaję kilka, jak sądzę najważniejszych, kierunków w tej dziedzinie:

- obliczenia w dużej skali (zastąpienie eksperymentu obliczeniem)
  - fizyka i chemia
  - genetyka i biologia molekularna

  - aero i hydrodynamika
  - inżynieria materiałowa
- wyszukiwanie informacji (bazy danych)
  - nauki społeczne
  - nauki humanistyczne
  - inne
- współdziałanie
  - internet
  - projektowanie współbieżne
- wspomaganie wnioskowania
  - uczenie maszynowe
  - eksploracja danych
  - wspomaganie decyzji

3.KOMPUTERY A PODSTAWY MATEMATYKI

Podstawowym pojęciem matematyki jest pojęcie zbioru. Wszystkie konstrukcje matematyczne odwołują się do tego pojęcia.

Sformułowanie tego pojęcia oraz stworzenie teorii zbiorów zawdzięczamy matematykowi niemieckiemu Georgowi Cantonowi (1845-1918), który przed około 100 laty stworzył podwaliny współczesnej teorii mnogości. Oryginalna, intuicyjna definicja pojęcia zbioru Cantora [2] podana jest poniżej:

“Unter einer “Manningfaltigkeit” oder “Menge”verstehe ich nämlich allgemein jedes Viele,welches sich als Eines denken lässt, d.h. jeden Inbegriff bestimmter Elemente, welcher durch ein Gesetz zu einem Ganzen verbunden werden kann.”

Jej tłumaczenie według [4] jest następujące

“Pod pojęciem *rozmaitości* czy *zbioru* rozumiem mianowicie ogólnie każdą wielość, która może być pomyślana jako jedność, tj. każdy ogół określonych elementów, które na mocy pewnego prawa mogą być złączone w jedną całość”,

lub w nieco prostszym sformułowaniu

“Pod pojęciem *zbioru* rozumiemy każde zebranie w jedną całość *M* określonych dobrze odróżnionych przedmiotów *m* naszego oglądu czy naszych myśli (które nazywane są *elementami M*)” [4].

Jak widać jest to pojęcie bardzo intuicyjne i proste.

W 1902 roku wybitny filozof angielski Bertrand Russell (1872-1930) zauważył, że teoria mnogości jest sprzeczna, tj., prowadzi do antynomii (sprzeczności) logicznych (istnieją też inne rodzaje antynomii, których tu nie będziemy rozważać). Antynomia logiczna, dla krótkości zwana w dalszym ciągu po prostu antynomią, powstaje wtedy gdy prowadząc poprawne rozumowanie logiczne dochodzimy do sprzeczności, tj. do zdań A i nie-A. Podważa to istotę rozumowania logicznego.

Dla przykładu omówimy tzw. antynomię Russella. Rozważmy zbiór X złożony ze wszystkich zbiorów Y, które nie są własnymi elementami. Jeżeli przyjmiemy, że X jest swoim własnym elementem to X, z definicji, nie może być swoim elementem; jeżeli zaś przyjmiemy, że X nie jest swoim elementem to zgodnie z definicją zbioru X musi on być swoim elementem. A więc przy każdym założeniu otrzymujemy sprzeczność.

Antynomia ta jest często ilustrowana przykładem fryzjera który otrzymał zarządzenie, iż może golić tylko wszystkich tych, którzy nie golą się sami. Powstaje pytanie czy może on golić się sam czy też nie. Jeżeli przyjąć, ze fryzjer goli się sam to zgodnie z zarządzeniem nie może się golić. Jeżeli zaś przyjąć, że nie goli się sam to na podstawie zarządzenie powinien się golić sam. A więc mamy sprzeczność.

Antynomia Russella świadczy o tym, że elementami zbioru nie mogą być dowolne obiekty, tak jak sobie to wyobrażał Cantor.

Mogłoby się wydawać, że antynomie to niewinne igraszki logiczne, jednakże tak nie jest. Podważają one istotę rozumowania logicznego. Dlatego też przez ponad sto lat próbowano "naprawić" teorię Cantora, lub zastąpić ją inną teorią zbiorów, jednakże rezultaty te, jak dotąd nie doprowadziły do pomyślnych rezultatów. Czy więc cała matematyka jest oparta na wątpliwych podstawach?

Jednocześnie, niezależnie od badań matematyków i filozofów, pojęcie zbioru zainteresowało inżynierów. Okazało się bowiem, że wiele problemów praktycznych nie da się sformułować i rozwiązać używając klasycznego, cantorowskiego pojęcia zbioru.

W 1965 roku prof. Lotfi Zadeh, z Uniwersytetu w Berkely zaproponował inne pojęcie zbioru, w którym elementy mogą należeć do zbioru w pewnym stopniu, a nie definitywnie, jak to ma miejsce w klasycznej teorii zbiorów. Propozycja ta znalazła bardzo wiele zastosowań i zapoczątkowała lawinę badań na temat "teorii zbiorów rozmytych" (*fuzzy set theory*), jak nazwano teorię Zadeha [7]. Jednocześnie teoria ta wzbudziła wiele krytyki, głównie wśród matematyków. Do tej pory nie rozstrzygnięto pytania czy jest ona alternatywą dla teorii Cantora.

Inne jeszcze podejście do tego zagadnienia zostało zaproponowane przez autora w postaci "teorii zbiorów przybliżonych" (*rough set theory*) [5]. Niezależnie od wielu zastosowań, zainteresowała ona licznych logików na świecie. Istotny wkład do tej teorii wniósł prof. Roman Słowiński wraz ze swoimi uczniami i współpracownikami.

Czy jest ona alternatywną dla klasycznej teorii mnogości, do dzisiaj nie udało się rozstrzygnąć. W tym kontekście warto zwrócić uwagę na pracę profesorów Petera Apostoli i Akiro Kanda z Wydziału Filizofii Uniwersytetu w Toronto [1] w której dowodzą, że teoria zbiorów przybliżonych uwalnia teorię Cantora od sprzeczności. Co więcej pokazują, że jednocześnie teoria ta rozwiązuje antynomie pomiaru w mechanice kwantowej, twierdząc, że źródłem antynomii w teorii mnogości jak i mechanice kwantowej jest brak pojęcia nierozróżnialności - stanowiącego podstawę teorii zbiorów przybliżonych.

4. KOMPUTERY A WNIOSKOWANIE

Podobnie jak w przypadku pojęcia zbioru, komputery spowodowały istotne przyśpieszenie i rozszerzenie badań w logice.

Ojcem współczesnej logiki jest matematyk niemiecki Gottlob Frege (1848-1925). Uważał on, że matematyka powinna być oparta nie na pojęciu zbioru, a na pojęciach logiki. Stworzył on pierwszy aksjomatyczny system logiki, jednakże przez współczesnych nie był on zrozumiały.

W latach trzydziestych ubiegłego stulecia nastąpił gwałtowny rozwój logiki, w czym duży udział mieli logicy polscy, a w szczególności Alfred Tarski (1901-1983).

Rozwój komputerów i ich zastosowań ożywił badania logiczne i rozszerzył ich zakres.

Mówiąc o logice mamy na ogół na myśli *logikę dedukcyjną*. Daje ona narzędzia służące do wyprowadzania zdań prawdziwych z innych zdań prawdziwych. Wnioskowanie dedukcyjne prowadzi zawsze do konkluzji prawdziwych. Teoria dedukcji posiada dobrze ugruntowane powszechnie przyjęte podstawy teoretyczne. Wnioskowanie dedukcyjne jest głównym narzędziem stosowanym w rozumowaniach matematycznych i poza nią nie znalazło zastosowania.

Logicy i informatycy próbowali używać komputerów do dowodzenia twierdzeń, jednakże w istocie nie przyniosło to pożądanych rezultatów.

Najlepszym argumentem za tym stwierdzeniem jest fakt, że w największym osiągnięciu w matematyce XX wieku, jakim jest udowodnienie przez Andrew Wiles'a (W. Brytania) w 1994 roku Wielkiego Twierdzenia Fermata (1601-1665) komputery nie odegrały żadnej roli. Twierdzenie brzmi:

"Nie istnieją liczby naturalne x, y, z i $n>2$ takie, że $x^n + y^n = z^n$".

Mimo, że twierdzenie to wydaje się niezwykle proste, jego dowodu, mimo licznych prób, nie udało się znaleźć przez około 350 lat. Dowód podany przez Wiles'a zajmuje blisko 200 stron druku i wymagał znajomości wielu odległych, zaawansowanych dziedzin matematyki. Potwierdza to znany fakt, że znalezienie dowodu twierdzenia matematycznego to nie tylko sprawne posługiwanie się metodami formalnymi, ale również - a może przede wszystkim - wszechstronna wiedza, skojarzenia oraz głęboka intuicja. Tej ostatniej cechy, jak dotąd, komputery nie posiadają. Dlatego też wydaje się, że w dającej się przewidzieć przyszłości komputery nie odegrają istotnej roli w dowodzeniu twierdzeń.

Mimo nieprzydatności komputerów do dowodzenia twierdzeń matematycznych informatyka odegrała znaczną rolę w badaniach logicznych, inspirując powstanie wielu nowych logik, a w szczególności teorii złożoności obliczeniowej. Można ją uważać za rozszerzenie koncepcji rozstrzygalności, podstawowego pojęcia współczesnej logiki.

W naukach przyrodniczych (np. w fizyce) podstawową rolę odgrywa *wnioskowanie indukcyjne*. Cechą charakterystyczną tego typu wnioskowań jest to, że nie wychodzą one jak w logice dedukcyjnej, od aksjomatów, lecz punktem wyjścia tego typu rozumowań są pewne fakty częściowe o badanej rzeczywistości (przykłady), które następnie są uogólniane, tworząc wiedzę o szerszym świecie, niż ten który stanowił punkt wyjścia wnioskowań. W przeciwieństwie do wnioskowania dedukcyjnego, wnioskowanie indukcyjne nie prowadzi do wniosków prawdziwych a jedynie do wniosków prawdopodobnych (możliwych). Również w przeciwieństwie do logiki dedukcji, logika indukcji nie ma jednolitych, ogólnie przyjętych, podstaw teoretycznych.

Rozstrzyganie prawdziwości hipotez w logice indukcji odbywają się nie, jak w logice dedukcji, drogą formalnego rozumowania, a na podstawie experymentu. Fizyka jest tu najlepszą ilustracją.

Badania nad logiką indukcyjną mają długą kilkusetletnią historię, a za jej ojca uchodzi wybitny filozof angielski John Stuard Mill (1806 - 1873).

Powstanie komputerów i nowatorskie ich zastosowania przyczyniły się istotnie do gwałtownego wzrostu zainteresowania wnioskowaniem indukcyjnym. Dziedzina ta rozwija się dzięki informatyce niezwykle dynamicznie. Uczenie maszynowe, odkrywanie wiedzy, wnioskowanie z danych, systemy eksperckie i inne stanowią przykłady nowych kierunków, we wnioskowaniu indukcyjnym [6]. Również badania nad teorią indukcji zawdzięczają informatyce nowe impulsy. Jednakże do sytuacji jaką mamy w logice dedukcji jest jeszcze bardzo daleka droga. Nie widać bowiem na horyzoncie zarysu teorii indukcji mającej taki status jak teoria dedukcji.

Wreszcie, najbardziej interesujące z punktu widzenia informatyki to *wnioskowanie zdroworozsądkowe*. Są to rozumowania, którymi posługujemy się w życiu codziennym, polityce, oraz w wielu naukach humanistycznych.

Punktem wyjścia do takich rozumowań jest wiedza posiadana przez określoną grupę ludzi (*common knowledge*) na jakiś temat, oraz intuicyjne metody wyciągania z niej wniosków. Przykładami tego typu wnioskowań są niemal bez przerwy spotykane w prasie, radio, telewizji dyskusje na tematy polityczne, ekonomiczne bądź artystyczne. Dyskusje parlamentarne na temat budżetu państwa, to klasyczny przykład rozumowań zdroworozsądkowych. Partie rządzące podają argumenty, za przyjęciem budżetu, twierdząc, iż jest on wyśmienity, zaś partie opozycyjne twierdzą przeciwnie. Kto ma rację? Brak tu możliwości rozstrzygnięcia sporu metodami proponowanymi przez logikę dedukcyjną (rozumowanie) bądź logikę indukcji (eksperyment). Dlatego jedynym sposobem rozstrzygnięcia dylematu jest głosowanie. Wynik głosowania wcale nie świadczy o prawdziwości lub nie głoszonej tezy. Oczywiście, metody takie są nie do przyjęcia w matematyce, czy fizyce. Nikt nie będzie rozstrzygał przez głosowanie czy twierdzenie Fermata, bądź równania Newtona są prawdziwe czy też nie.

Rozumowania tego typu są najmniej zbadane od strony teoretycznej i ich struktura nie jest dostatecznie rozumiana, mimo pewnych prac teoretycznych prowadzonych w tym kierunku. Znaczenie rozumowań zdroworozsądkowych, ze względu na ich zakres i wagę w niektórych dziedzinach, jest bardzo duże i informatyka może tu odegrać dużą rolę, pod warunkiem głębszego zrozumienia istoty tych rozumowań, do czego mogą się przyczynić odpowiednie badania teoretyczne.

Reasumując, cechy charakterystyczne trzech wyżej wymienionych wnioskowań podane są poniżej:

- dedukcyjne
  - zastosowania: matematyka
  - pełna teoria
  - wnioskowanie zawsze prawdziwe
  - weryfikacja hipotez - dowód
- indukcyjne
  - zastosowania: nauki przyrodnicze (fizyka)

- częściowe teorie
- wnioski prawdopodobne (możliwe)
- weryfikacja hipotez - eksperyment

- zdroworozsądkowe -
  - zastosowania: nauki społeczne (polityka, ekonomia, medycyna), rozumowanie potoczne
  - brak teorii
  - brak kryterium prawdziwości
  - weryfikacje hipotez - głosowanie (negocjacje, wojna)

5. CO DALEJ?

Jak wiadomo wszelkie prognozy są wysoce ryzykowne. Dla przykładu podaję poniżej kilka prognoz, które świadczą, że prognozowanie jest rzeczą trudną:

- "Telefon ma zbyt wiele wad aby mógł być serio rozpatrywany jako środek łączności. To urządzenie nie ma żadnej wartości" (Western Union, 1876)
- "Uważam, że istnieje rynek światowy na być może pięć komputerów" (Thomas Watson, Prezes IBM, 1943)
- "Komputery w przyszłości mogą ważyć nie więcej niż 1,5 tony" (Popular Mechanics Magazine, 1949)

Prognozy w zakresie postępu technologicznego w informatyce są stosunkowo łatwe. Obserwując postęp w tej dziedzinie w ostatnich latach można przypuszczać, że tendencje podane niżej zachowają się w najbliższej przyszłości.

- Szybkość mikroprocesorów wzrastała dwukrotnie co 18-24 miesięcy
- Wielkość mikroprocesorów zmalała 30 razy w ostatnich 5 latach.
- Koszt pamięci malał dwukrotnie co dwa lata.

Jednakże zasadniczy paradygmat działania komputerów nie zmienił się w istocie, mimo licznych usprawnień, od początku ich powstania i nadal jest oparty na tzw. koncepcji von Neumanna.

Nie udało się stworzyć teorii algorytmów równoległych, mimo olbrzymiego rozwoju systemów równoległych i współbieżnych.

Poszukiwane są nowe modele komputerów, np. genetyczne (DNA computing) oraz kwantowe (quantum computing).

Warto w tym kontekście wymienić nagrody Nobla przyznane w 1998 roku za prace związane z komputerami:

- z fizyki, za wyniki w badaniu zjawisk kwantowych jako podstawy komputerów (Robert Laughlin, Horest Stoermer, Daniel Tsui)
- z chemii, za rozwój metod obliczeniowych (Walter Kohn, John Pople)

Na koniec możemy się pokusić o krótkie podsumowanie, naszych rozważań.

Niewątpliwie komputery, bądź szerzej, informatyka przyczyniły się istotnie do rozwoju niemal wszystkich dziedzin nauki. Z jednej strony komputery oferując niespotykane poprzednio olbrzymie moce obliczeniowe oraz potężne narzędzia do analizy bardzo dużych zbiorów informacji stworzyły w wielu dziedzinach całkiem nowe możliwości badawcze - z drugiej zaś zainspirowały powstanie nowych dyscyplin, jak np. złożoność obliczeniowa.

Dla dalszego rozwoju wielu dyscyplin jest to jednak nie wystarczające. Np. metreologia, aerodynamika, genetyka czy kryptografia wymagają jeszcze znacznie większych mocy obliczeniowych. Chodzi tu nie tylko po prostu o dalsze zwiększenie szybkości obliczeń ale przede wszystkim o znalezienie nowego paradygmatu obliczeń, gdyż koncepcja von Neumanna, na której oparte są współczesne komputery, zbliża się do kresu swych możliwości. Bez nowych koncepcji obliczeń współbieżnych i równoległych w bardzo dużej skali zadanie to może być bardzo trudne do zrealizowania.

Mimo olbrzymich sukcesów komputerów nauce ich rola jest jednakże ograniczona. W najważniejszych sprawach dla nauki, stawianiu i weryfikowaniu hipotez naukowych komputery jak dotąd nie odegrały istotnej roli. Przykład Wielkiego Twierdzenia Fermata jest tutaj symptomatyczny. Nie rozumiemy bowiem na czym polega istota odkrycia naukowego, rola w nim intuicji, skojarzeń etc. W drastyczny sposób sformułował to ogólnie Picasso (patrz motto).

LITERATURA

[1] Peter Apostoli, Akira Kanda, Parts of the continuum: towards a modern ontology of sciences, The Poznań Studies in Philosophy of Sciences and the Humanities, (ed. Leszek Nowak), w druku

[2] Georg Cantor, Grundlagen einer allgemeinen Mannigfaltigkeitslehre, Leipzig, 1883

[3] Gottlab Frege, Grundlagen der Arithmetik, 2 Verlag von Herman Pohle, Jena, 1893

[4] Roman Murawski, Filozofia matematyki, antologia tekstów klasycznych, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Seria Filozoficzna I, Logika nr 46, Poznań, 1986

[5] Zdzisław Pawlak, Rough sets, Int. J. of Information and Computer Sciences, 11, 5, 341-356, 1982

[6] Roman Słowiński, Od sztucznej inteligencji do sztucznego życia, Biuletyn Inauguracyjny PP, 20-47, 2001-11-30

[7] Lotfi Zadeh, Fuzzy sets, Information and Control, 8, 338-353, 1965