

Dr Marek KALINOWSKI

Na pograniczu fizyki, informatyki, inżynierii komputerowej i elektroniki powstała niedawno nowa dziedzina zwana fizyką komputerową. Czym ona się zajmuje?

Obszar zainteresowań fizyki komputerowej możemy podzielić na dwie wyraźnie odróżniające się części, tak jak i samą naukę o komputerach (tzw. *computer science* w języku angielskim). Podział ten, jak prawdopodobnie każdy zgadnie, związany jest z podziałem na „hardware” i „software”, czyli na konstrukcję komputera i jego oprogramowanie.

Zajmijmy się najpierw tą częścią fizyki komputerowej, która dotyczy „hardware”. Realizacja procesu obliczeniowego jest procesem fizycznym, wymagającym energii, zachodzącym w czasie rzeczywistym i w związku z tym podlegającym prawom fizyki. Dlatego też fizyka bada wydajność energetyczną procesu obliczeniowego i daje wskazówki projektantom, jak obniżyć wydatek energii związany np. z elementarnym dodawaniem czy mnożeniem. Jest to bardzo ważne, bo energia ta ulega dyssypacji na ciepło i może stać się przyczyną zaburzeń prowadzących nawet do zniszczenia układu wykonującego obliczenia. Innym istotnym problemem jest badanie fizycznych granic szybkości obliczeń wynikających ze skończonej prędkości przesyłania informacji (prędkość światła) i zasady nieoznaczoności Heisenberga. Centralny zegar komputera wyznacza nam cykl pracy całego procesora. W zależności od jego „tik-tak” zmieniają się zawartości rejestrów, przerzutników i elementów pamięci. Zatem każde „tik” lub „tak” musi dojść do każdej części procesora jednocześnie. Jest to możliwe tylko wtedy, gdy rozmiar procesora jest mały w porównaniu z odległością, jaką przechodzi sygnał świetlny w czasie pojedynczego cyklu zegara. Dla czasu rzędu nanosekund ( $10^{-9}$  s) odległość ta jest już względnie mała i wynosi tylko 30 cm. Zatem procesor o częstotliwości 1 GHz musi już być bardzo mały. Zmusza to konstruktorów do miniaturyzacji i gęstego upakowania wszystkich elementów hardware. Gęste upakowanie powoduje zwiększone wydzielanie mocy (dyssypacja energii) na jednostkę objętości, tak, że w pewnym momencie procesor może zostać zniszczony. Należy więc dążyć do obniżania poboru mocy i obniżenia temperatury procesora, np. umieszczając go w ciekłym azocie lub helu.

Pojedyncze składniki procesora stają się coraz mniejsze i zaczynają zbliżać się do rozmiarów molekularnych. Pojawiają się ograniczenia wynikające z praw mechaniki kwantowej — zaczyna odgrywać rolę zasada nieoznaczoności. Czas przerzutu, to jest zmiany stanu przerzutnika np. z logicznego 1 do logicznego 0, nie może być mniejszy niż stała Plancka dzielona przez nieoznaczoność energii. Niech stanowi logicznemu 0 odpowiada stan podstawowy układu kwantowego, a stanowi 1 stan wzbudzony i niech różnica energii między tymi poziomami wynosi  $\Delta E$ . Różnicę energii stanów możemy określić (rozpoznać) z dokładnością  $\Gamma$ . Mamy ograniczenie  $\Gamma < \Delta E/2$ , w przeciwnym razie nie będziemy mieli dostatecznie ostrej różnicy między logicznym 0 i 1. Z drugiej strony wiemy, że czas przeskoku do stanu podstawowego  $\Delta t$  i dokładność wyznaczenia energii  $\Gamma$  spełniają nierówność (zasada nieoznaczoności)

$$\Delta t \cdot \Gamma \geq \hbar.$$

Otrzymujemy więc ograniczenie na  $\Delta t$  — czas przełączania układu logicznego

$$\Delta t \geq \Delta t_{min} = \frac{2\hbar}{\Delta E}.$$

Biorąc  $\Delta E$  rzędu elektronowolta — odpowiadającą procesom molekularnym — otrzymujemy  $\Delta t_{min}$  rzędu  $10^{-15}$  s, zaś dla energii charakterystycznych dla oddziaływań jądrowych ( $\sim 1$  MeV) otrzymujemy  $10^{-21}$  s. Mamy więc drugie ograniczenie na szybkość działania komputera. Ciekawe, że dzięki bardzo szybkiemu postępowi technologii zbliżamy się już do tych ograniczeń. Niedługo już będziemy budować komputery o częstotliwości zegara  $10^3$  GHz i czasie przełączania bramek logicznych wynoszącym ułamki pikosekund. W tym momencie będziemy zmuszeni zmienić zasady projektowania hardware i zacząć używać przy tym formalizmu mechaniki kwantowej. Tego zdania jest wielu wybitnych fizyków, m.in. R. Feynman, który poczynił już pierwsze kroki w tym kierunku tworząc zaczątki teorii kwantowo-mechanicznego hardware, używającej formalizmu tzw. drugiej kwantyzacji. Również wielu fizyków z ośrodków badawczych firmy IBM pracuje nad tym problemem. Czasy przełączania pojedynczych bramek w tego typu procesorze będą rzędu  $10^{-15}$  —  $10^{-14}$  s. Będzie to możliwe dzięki wykorzystaniu zjawiska Josephsona, a nawet, co jest bardziej prawdopodobne, zjawiska fal spinowych w magnetykach.

Do fizyki komputerowej zalicza się również metody numeryczne wypracowane przez fizyków wykorzystujących komputery np. do rozwiązywania równań ruchu punktów materialnych, ciał sztywnych czy też płynów. Zadając postać równań możemy symulować w komputerze realny świat fizyczny, czyli niejako wykonywać doświadczenia w komputerze. Jest to bardzo wygodne, ponieważ często nie jesteśmy w stanie zrealizować w laboratorium ekstremalnych stanów materii lub z powodu zbyt długiego czasu doczekać końca doświadczenia. Dotyczy to np. procesów ewolucji gwiazd, powstawania galaktyk lub ewolucji Wszechświata jako całości. Dzięki dużej mocy obliczeniowej komputera można prześledzić w kilka minut proces fizyczny zachodzący normalnie w czasie milionów lat. W ten sposób jesteśmy w stanie porównać konsekwencje założeń naszych modeli z danymi obserwacyjnymi. Jeżeli nie są one zgodne z tym, co rzeczywiście obserwujemy, to możemy je zmienić i sprawdzić jeszcze raz. W przypadku ewolucji gwiazd zmieniając parametry protogwiazdy (to jest masę i skład chemiczny) możemy prześledzić drogę ewolucji każdego typu gwiazdy obserwowanej na niebie. Nieocenioną pomocą jest taka symulacja w przypadku wczesnych stadiów ewolucji Wszechświata. Sprawdzamy wtedy, czy otrzymany w wyniku symulacji rozkład galaktyk i gromad galaktyk odpowiada temu, co rzeczywiście widzimy na niebie. Bardzo pomocny jest również komputer w badaniu własności skomplikowanych molekuł chemicznych. Dzięki wykonanej symulacji możemy prześledzić ewolucję molekuly i jej zachowanie, a potem porównać to z wynikami np. analizy za pomocą promieni Roentgena. Przeprowadzone porównanie pozwoli nam zrozumieć, co zaszło w molekule, jak grupy atomów ewoluowały w czasie. Symulacje tego typu, nieocenione w biologii molekularnej, wykonuje się używając metody zwanej metodą dynamiki molekularnej.

W obu przypadkach (obliczeń astronomicznych i chemicznych) do komputera wprowadzamy informacje o znanych nam prawach fizycznych, dane liczbowe określające występujące wielkości oraz nasze założenia dotyczące badanego procesu. Komputer pozwala nam sprawdzić, jak wyglądałby proces zachodzący zgodnie z podanymi informacjami. Takie postępowanie nie może, oczywiście, zastąpić prawdziwego doświadczenia fizycznego. Często jednak wykonana symulacja pozwala ograniczyć liczbę doświadczeń, które rzeczywiście należy przeprowadzić, eliminując hipotezy błędne, których sprawdzenie na drodze eksperymentalnej byłoby kosztowne i czasochłonne.

Komputer jest używany również jako narzędzie symulacji dla problemów opisywanych przez układy nieliniowych równań

różniczkowych, np. w hydrodynamice lub aerodynamice. Równania te, najczęściej bardzo skomplikowane, rzadko potrafimy rozwiązać ściśle w postaci analitycznej. Jedyną możliwością jest wówczas znalezienie dużej liczby rozwiązań numerycznych i próba wyciągania wniosków o charakterze analitycznym. Czasami się to udaje i można pokusić się o znalezienie rozwiązania analitycznego lub analitycznego przybliżonego. W innych przypadkach komputer może przyjść z pomocą pokazując załamanie się naszego zdroworozsądkowego rozumowania, które często zawodzi w dziedzinie zjawisk nieliniowych. Koronnym przykładem jest tak zwany problem Fermiego-Pasty-Ulana. Polegał on na rozwiązaniu równań ruchu 32 punktów materialnych połączonych nieliniowymi sprężynkami (takimi, których wychylenie nie jest proporcjonalne do siły) i ograniczonych ściankami, od których mogły się odbijać. Punkty te wychyleno i badano ich ruch (w komputerze oczywiście). Zdrowy rozsądek fizyka przewidywał, że po dostatecznie długim czasie nastąpi równomierny rozkład energii na wszystkie stopnie swobody (zasada ekwipartycji). Nastąpi on zawsze, gdy sprężynki są liniowe i będzie tym lepiej obserwowany, im więcej mamy punktów materialnych (32 to już dostatecznie dużo).

Doświadczenie przyniosło jednak zupełnie inny wynik. Po 30 000 cykli układ wrócił do położenia pierwotnego. Warto zauważyć, że ten problem był jednym z pierwszych problemów fizyki komputerowej. Rachunki zostały wykonane na komputerze MANIAC w Los Alamos w USA, a sam Stanisław Ulam, jeden z autorów problemu, polski matematyk ze szkoły lwowskiej, jest uważany za ojca *computer science*.

Warto wspomnieć, że komputer sprawdził się również jako „numeryczny tunel aerodynamiczny”, testujący nowe typy skrzydeł i samolotów. (Oczywiście przed zabraniami pasażerów samoloty były sprawdzane w lotach próbnych.)

Komputer jest dziś narzędziem fizyka tak, jak akcelerator, teleskop, mikroskop czy detektor promieniowania i tak też należy go traktować. Na zakończenie warto wspomnieć, że nowe metody informatyki, takie jak: sztuczna inteligencja i systemy eksperckie znalazły już zastosowanie w fizyce komputerowej. Służą one jako narzędzia do sterowania eksperymentem fizycznym oraz do automatycznej analizy danych, np. z akceleratora. Grafika komputerowa, a szczególnie animowane filmy komputerowe, są znakomitą metodą wyprowadzania wyników obliczeń. Fizyka komputerowa jest już dobrze wyodrębnioną dziedziną fizyki.

## Patrz w niebo

Pogodne noce w czerwcu czy lipcu wcale nie są odpowiednim czasem do przeprowadzania optycznych obserwacji astronomicznych. Przede wszystkim są one krótkie — znacznie krótsze (o około 10 godzin) od nocy zimowych. Ponadto nie są dostatecznie ciemne na to, aby można dostrzec słabsze obiekty niebieskie. Można powiedzieć, że w obserwacjach przeszkadza wtedy ... Słońce. Jest ono w tym czasie na tyle płytko schowane pod horyzontem, że rozproszone w atmosferze ziemskiej promieniowanie znacznie rozjaśnia nocne niebo.

Prawdziwą długość dnia określa się pojawianiem i znikaniem górnego brzegu tarczy słonecznej za horyzontem. Nie tak proste jest określenie nocy, gdyż między dniem a nocą trwa krótszy lub dłuższy zmierzch i brzask. Długość trwania zmierzchu zależy od szerokości geograficznej miejsca obserwacji i od deklinacji Słońca. W życiu codziennym koniec zmierzchu (tzw. zmierzchu cywilnego) określa się koniecznością zapalenia sztucznego oświetlenia dla bezpieczeństwa ruchu ulicznego. Słońce znajduje się wtedy  $6^\circ$  pod horyzontem. Jest to, oczywiście, określenie teoretyczne, bowiem w praktyce nierzadko podczas złych warunków atmosferycznych sztuczne oświetlenie jest włączane znacznie wcześniej.

Jeśli na danym obszarze Słońce przez całą noc nie schodzi głębiej niż  $6^\circ$  pod horyzont, tj. — gdy na obszarze tym przez całą noc panuje co najwyżej zmierzch cywilny — mówimy, że występują tam „białe noce”. Warunek występowania „białych nocy” jest więc następujący:  $h_d \geq -6^\circ$ , gdzie  $h_d$  jest wysokością dołowania Słońca, tj. jego najniższego położenia w ciągu doby. Ponieważ  $|h_d| = 90^\circ - \varphi - \delta_\odot$ , gdzie  $\delta_\odot$  — deklinacja Słońca,  $\varphi$  — szerokość geograficzna miejsca obserwacji (patrz rysunek), graniczna wartość szerokości geograficznej, w której występują „białe noce”, określona jest przez warunek:  $\varphi \geq 84^\circ - \delta_\odot$ . Rzecz jasna, najdogodniejszym momentem na półkuli północnej jest przesilenie letnie — wtedy bowiem deklinacja Słońca osiąga największą wartość:  $23^\circ 27'$ . Dla tej maksymalnej wartości  $\delta_\odot$  otrzymujemy  $\varphi_{min} = 60^\circ 33'$ . Analogicznie, graniczna szerokość geograficzna, w której mogą występować „białe noce” na półkuli południowej, ma wartość  $\varphi_{max} = -60^\circ 33'$ .

Wysunięte najbardziej na północ obszary Polski leżą poniżej równoleżnika  $55^\circ$  szerokości geograficznej północnej. Wobec tego nawet tam nie mogą występować „białe noce”. Jednak w okolicach przesilenia letniego, przy dobrej pogodzie, nad morzem przez całą noc widać jasną poświatę nad północnym widnokregiem świadcząca o stosunkowo małej głębokości Słońca pod horyzontem. W wyjątkowo sprzyjających warunkach atmosferycznych poświatę taką widać nawet w środkowej Polsce.

Inaczej definiuje się koniec zmierzchu astronomicznego — następuje on, gdy Słońce obniży się o  $18^\circ$  pod horyzont. Moment ten charakteryzuje się szybkim zwiększeniem widzialności słabych gwiazd. Obliczenia analogiczne jak dla zmierzchu cywilnego prowadzą do następującego wyniku na graniczną wartość szerokości geograficznej, przy której w momencie przesilenia letniego zmierzch astronomiczny trwa przez całą noc:  $\varphi_{min} = 48^\circ 33'$ . Widać stąd, że na obszarze Polski w tym czasie przez całą noc trwa zmierzch astronomiczny i przez to warunki obserwacyjne nie są zbyt dobre. Od początku czerwca do połowy lipca w naszych szerokościach geograficznych Słońce nie schodzi głębiej niż  $18^\circ$  pod horyzont, a więc obserwacji astronomicznych lepiej dokonywać, o ile to możliwe, w innym terminie.

