



Do czego może doprowadzić gra w pasjansa, czyli o metodach Monte Carlo w fizyce reaktorów jądrowych

Mikołaj Oettingen

*AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw,
Katedra Energetyki Jądrowej*

Artykuł nagrodzony I nagrodą w konkursie popularnonaukowym „Forum Akademickiego” dla młodych badaczy.

2 grudnia 1942 roku o godzinie 15.52 na nieużywanym korcie do squasha Uniwersytetu Chicagowskiego został uruchomiony pierwszy w historii ludzkości reaktor jądrowy, nazwany CP1 (Chicago Pile One), o mocy elektrycznej 0,5 wata. 16 lipca 1945 roku o godzinie 5.29.45 pustynią Alamogordo w Nowym Meksyku oświetlił intensywny blask, do tej pory obserwowany jedynie w świetle gwiazd – pomyślnie zakończyły się prace nad pierwszą bombą atomową. W listopadzie tego samego roku dokonano pierwszych na świecie obliczeń za pomocą maszyny elektronicznej o wdzięcznej nazwie ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer), co zapoczątkowało erę komputerów. Rok później Stanisław Ulam układał pasjansa.

Pierwsze trzy wydarzenia miały kolosalny wpływ na rozwój współczesnej nauki i techniki, czego skutki, po prawie 70 latach, wciąż odczuwamy w codziennym życiu. Ale czwarte? Co wspólnego ma z tym polski matematyk pochodzący ze Lwowa, a tym bardziej jego zamiłowanie do układania pasjansa i do gier hazardowych? Czy miało ono wpływ na kształtowanie się współczesnej cywilizacji? Co wiąże osławionego „ulamowskiego” pasjansa z moją pracą naukową?

Za mną, czytelniku, poczuj się jak Tezeusz szukający wyjścia z labiryntu Minotaura, a niech ten artykuł będzie twoją nicią Ariadny i niech prowadzi cię do rozwiązania zagadki!

Pierwsza rozgrywka

Gdzież w tej układance miejsce dla doktoranta? Poszedłem „ulamowską drogą”. Moim głównym obszarem badawczym jest dział fizyki reaktorów jądrowych, określane jako neutronika lub analiza neutronowa. Zajmuje się on zagadnieniami transportu cząstki elementarnej zwanej neutronem w rdzeniu reaktora jądrowego. Przez ostatnie pięć lat badałem zachowanie wielu reaktorów jądrowych różnego typu za pomocą metod Monte Carlo – chwila cierpliwości, wyjaśnię je dalej.

Moja przygoda zaczęła się podczas pisania pracy magisterskiej. Przygotowałem ją w ramach międzynarodowego projektu, a dotyczyła ona analizy bezpieczeństwa jądrowego reaktora wysokotemperaturowego, przeznaczonego do produkcji ciepła przemysłowego dla szerokiego spektrum procesów technologicznych. Tutaj pierwszy raz otrzymałem dostęp do komputerów wysokiej mocy obliczeniowej i spotkałem się z pasjonującym światem symulacji numerycznych. Otworzyła się przede mną możliwość uczestniczenia w czymś niepospolitym, niezwykle ważnym, po prostu – innym, przecież nie każdy dostaje szansę zaprojektowania reaktora jądrowego.

Postanowiłem iść za ciosem i w niedługim czasie zdałem pomyślnie egzaminy na studia doktoranckie w dziedzinie technicznej fizyki jądrowej. Przez pierwsze dwa lata szlifowałem swoją wiedzę z zakresu metod Monte Carlo. W tym czasie brałem udział w kolejnym międzynarodowym programie badawczym, mającym na celu zaprojektowanie innowacyjnego reaktora jądrowego, tym razem chłodzonego ciekłym ołowiem. Pierwowzorem tego systemu były reaktory napędzające rosyjskie łodzie podwodne. Pracowałem nad zamianą technologii o wojskowych korzeniach na technologię zapewniającą energię elektryczną tysiącom gospodarstw domowych. Wtedy myślałem, że prawdopodobnie osiągnąłem szczyt marzeń każdego doktoranta. Czy jednak na pewno?

Prolog

W 1942 roku, na polecenie prezydenta F.D. Roosevelta, rozpoczęto amerykański program mający na celu opracowanie bomby jądrowej – projekt Manhattan. Jednym z głównych obszarów badań naukowych, nad którymi pracowali najlepsi fizycy i matematycy świata, były zagadnienia związane z transportem promieniowania w systemach jądrowych, takich jak rdzeń reaktora jądrowego. Naukowcy poszukiwali metody rozwiązania równania transportu promieniowania dla neutronów. Dlaczego neutrony, a nie inne cząstki elementarne? Interakcje neutronów z jądrami pierwiastków ciężkich, takich jak uran, powodują proces rozszczepienia, czego skutkiem jest uwolnienie względnie dużej ilości energii. W przypadku reaktora jądrowego energia ta jest następnie odbierana przez chłodziwo i najczęściej przetwarzana na energię elektryczną.

Praca naukowców nie poszła na marne. Równanie udało się rozwiązać za pomocą tzw. metod deterministycznych. W najprostszej formie sprowadzają się one do bezpośredniego analitycznego rozwiązania naszego równania dla uśrednionego zachowania neutronów w danym systemie. Metody te nie wymagają komputerów dużej mocy obliczeniowej z powodu relatywnie krótkiego czasu symulacji. Jednak słowo klucz to „uśrednione zachowanie”. Jeżeli coś jest uśrednione, to matematyczny opis tego zjawiska nie uwzględnia wszystkich efektów, lecz przyjmuje, że wykorzystane wartości średnie są reprezentatywne dla całego systemu – może to prowadzić do otrzymania niepoprawnych wyników obliczeń. Alternatywą metod deterministycznych są metody Monte Carlo.

Druga rozgrywka

Podczas trzeciego roku studiów doktoranckich zostałem zaproszony na roczny staż naukowy w Instytucie Energii Komisji Europejskiej, Wydział Bezpieczeństwa Przyszłych Reaktorów Jądrowych. Kolejne marzenie stało się rzeczywistością – po raz pierwszy w życiu rozpocząłem pracę ściśle związaną z działaniem prawdziwego reaktora jądrowego. Moim zadaniem było zbudowanie numerycznego modelu reaktora wysokostrumieniowego, który znajduje się w Petten w Holandii. W reaktorze wykonywano eksperymenty naświetlania innowacyjnego paliwa jądrowego. Kapsułki z paliwem zostały wprowadzone do rdzenia. Symulacje numeryczne miały pokazać wpływ ich obecności na pracę reaktora. Miały one również wykazać, czy wyprodukowane paliwo spełnia kryteria bezpieczeństwa i nadaje się do użycia w komercyjnych reaktorach jądrowych. Z pasją zacząłem opracowywać model numeryczny do symulacji Monte Carlo.

Moja praca nad modelem reaktora i towarzyszące jej obliczenia zostały nagle przerwane 11 marca 2011 roku. Tego dnia 15-metrowa fala tsunami, następstwo potężnego trzęsienia ziemi, przelała się przez mury zaporowe japońskiej elektrowni jądrowej Fukushima. Świat patrzył z trwogą na zmagania Japończyków z nieokiełznanymi reaktorami. Zostałem powołany do grupy roboczej, mającej na celu określenie potencjalnego wpływu awarii na środowisko naturalne. Zadanie zostało wykonane po niespełna tygodniu nieustannej pracy. Może nie uratowałem świata, ale wniosłem nieznaczny wkład do oszacowania skutków awarii. Niezapomniana satysfakcja.

Mistrz

Stanisław Ulam, przedstawiciel lwowskiej szkoły matematycznej, był jednym z uczonych pracujących nad rozwojem broni jądrowej w ramach projektu Manhattan. Pewnego razu, układając pasjansa, zadał sobie proste pytanie: jaka jest szansa ułożenia pasjansa z rozdanych kart? Szansę tę można oczywiście określić za pomocą zaawansowanych obliczeń kombinatorycznych, lecz czy nie istnieje prostszy sposób? Można przecież rozłożyć karty np. 100 razy i po prostu policzyć, ile razy udało się ułożyć pasjansa. W ten właśnie sposób powstała idea opisu zagadnień transportu neutronów poprzez proces statystyczny, składający się wyłącznie z szeregu zdarzeń losowych. Podejście to stanowiło alternatywę metod deterministycznych. Nowa metoda charakteryzowała się prostymi podstawami teoretycznymi, zrozumiałymi praktycznie dla każdego i co najważniejsze nie wymagała żadnych uśrednień i uogólnień w matematycznym opisie systemu. Została nazwana Monte Carlo przez analogię z mekką hazardzistów, dzielnicą Monako.

Dobrze, ale czy nawet najwytrwalszy gracz jest w stanie w szybkim tempie ułożyć 100 partii pasjansa? Po opracowaniu teoretycznych podstaw metody Monte Carlo Stanisław Ulam zdał sobie sprawę, że nadają się one idealnie do

obliczeń na pierwszym komputerze, ENIAC-u. W niedługim czasie metoda została przetransformowana na program komputerowy (w formie perforowanych kart) rozumiany przez pierwszy komputer, symulacje ruszyły i trwają do dnia dzisiejszego. Obecnie metody Monte Carlo są używane nie tylko w modelowaniu zagadnień związanych z transportem neutronów, ale również z ekonomią i finansami, informatyką, matematyką, biologią oraz wieloma działami fizyki i inżynierii. Zaletą metody są jej proste podstawy matematyczne, wymaga ona jednak komputerów wysokiej mocy obliczeniowej.

Trzecia rozgrywka

Po powrocie z Holandii postanowiłem skupić się na przygotowaniu rozprawy doktorskiej. Niestety okazało się to niemożliwe, życie zweryfikowało moje plany. Jako jeden z laureatów rządowego programu stypendialnego zostałem wysłany do „miejsca początku”. Moja podróż zawiodła mnie do słonecznej Kalifornii, na Uniwersytet Kalifornijski Berkeley. Pamiętam, że w momencie otrzymania informacji o wyjeździe czułem się jakbym wygrał główną nagrodę na loterii – czysta euforia. To właśnie naukowcy z Uniwersytetu Kalifornijskiego Berkeley w latach czterdziestych XX wieku odkryli kilka nowych pierwiastków, m.in. neptun i pluton. Odegrali oni również kluczową rolę w projekcie Manhattan.

Obecnie na samym uniwersytecie nie prowadzi się prac związanych ściśle z inżynierią czy fizyką jądrową. Uniwersytet zarządza jednak dwoma laboratoriami nuklearnymi, gdzie takie prace są prowadzone do dnia dzisiejszego: Narodowe Laboratorium Lawrence Livermore i Los Alamos. Pierwsze z nich miałem zaszczyt odwiedzić i zapoznać się z unikatowym reaktorem fuzji termojądrowej, czyli urządzeniem pozwalającym okiełznać energię gwiazd. Poznając inne środowiska naukowe, nie rozstawałem się ze swoim problemem badawczym – metody Monte Carlo nadal mi towarzyszyły.

Wygrana

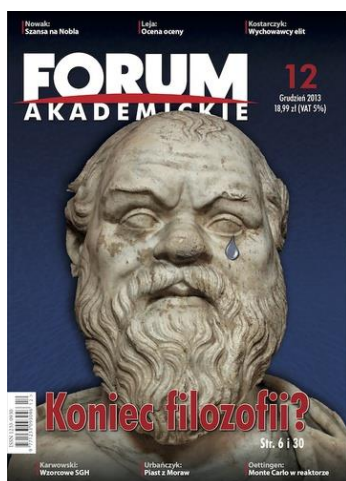
Obecnie pracuję nad dokończeniem rozprawy doktorskiej. Jej tematem jest porównanie składu zużytego paliwa jądrowego otrzymanego na drodze eksperymentu ze składem uzyskanym podczas numerycznej symulacji Monte Carlo. Wyniki są obiecujące. Wieczorami zastanawiam się, co zyskałem podczas pięciu lat poruszania się w pasjonującym świecie metod Monte Carlo. W mojej dotychczasowej pracy naukowej mentalnie i fizycznie podążałem śladami mistrza Ulama. Niewątpliwie jego wygraną było opracowanie metody, która jest obecnie używana do rozwiązywania wielu skomplikowanych problemów z różnych dziedzin nauki i techniki.

Co jednak jest moją wygraną? Może sposobność pracy w dziedzinie naukowej uważanej za szalenie skomplikowaną? Może kontakty, które nawiązałem,

biorąc udział w międzynarodowych projektach badawczych? A może szansa na prowadzenie badań w wiodących ośrodkach naukowych? Myślę, że prawdziwej wygranej należy szukać w samym człowieku. W moim przypadku jest to satysfakcja ze spełnienia marzeń. Jednak każda wygrana obarczona jest pewnym brzemieniem – wyboru dalszej drogi.

Epilog

Do czego zatem może doprowadzić układanie pasjansa? Nie udzielę na to pytanie jednoznacznej odpowiedzi, lecz zacytuję słowa samego mistrza Stanisława Ulama: „Wciąż jest dla mnie źródłem nieustającego zdziwienia, że kilka znaków nagryzmołonych na tablicy lub na kartce papieru może zmienić bieg ludzkich spraw”.



Od Redakcji:

Polecamy książkę Stanisława Ulama *Przygody Matematyka*, Wyd. Prószyński i S-ka. Pasjonująca lektura, dwa wydania zostały jednak już niemal wyczerpane.