

Fizyczne uwarunkowanie obliczeń

Każde (niekwantowe) obliczenie wymaga użycia serii nieodwracalnych operacji logicznych, w których dwa stany wejściowe dają jeden stan końcowy. Przykładem takiej operacji jest zerowanie komórki pamięci. W 1961 roku Rolf Landauer wykazał, że minimalna ilość ciepła, porównywalna z kT (gdzie k jest stałą Boltzmana, a T temperaturą w skali bezwzględnej), jest do tego niezbędna [1]. Ograniczenie $kT \ln 2$ jest obecnie nazywane granicą Landauera, która określa nieprzekraczalne fizyczne ograniczenie minimalnej ilości ciepła rozpraszane podczas pojedynczej nieodwracalnej operacji logicznej dowolnego dwójkowego urządzenia.

Jednakże, pomimo zasadniczego znaczenia dla rzeczywistych implementacji obliczeń informatycznych, ta podstawowa zasada nie została, do niedawna [2], doświadczalnie sprawdzona. Głównym powodem były techniczne trudności eksperymentowania z pojedynczą komórką pamięci w tak niskim zakresie rozpraszanej energii, ale nie mniej istotne były wątpliwości co do poprawności oraz użyteczności ograniczenia. Przecież rozpraszanie energii w obecnie używanych krzemowych układach cyfrowych jest trzy rzędy wielkości ponad ograniczenie Landauera. Z drugiej strony jednak, osiągnięcie tego limitu jest spodziewane wraz z postępującą miniaturyzacją układów scalonych.

Doświadczalne potwierdzenie realności ograniczenia Landauera w przykładowym modelu jednobitowej pamięci zostało uzyskane [2] dla pojedynczej koloidalnej cząstki uwięzionej w podwójnej studni potencjału o regulowanych parametrach. Zostało wykazane, że średnia rozpraszana energia zmniejsza się wykładniczo z wydłużającym się czasem operacji, asymptotycznie zbiegając do granicy Landauera.

Daya Bay – najefektywniejszy eksperyment neutrinowy

Neutrino są najbardziej tajemniczą i najtrudniej wykrywalną formą materii. Od ponad pół wieku zbierane są doświadczalne dowody ich oscylacji. Ponieważ oddziałują tylko słabo (za pomocą masywnych bozonów pośredniczących W^+ , W^- i Z^0), a stany własne oddziaływania (rodzaje: elektronowy, mionowy oraz taonowy) są, jak widać, różne od stanów masowych (numerowanych 1, 2 i 3), więc neutrino zmieniają swój rodzaj w trakcie lotu.

Dla dwóch rodzajów neutrin oscylacja może być opisana przez prawdopodobieństwo przetrwania

$$P(L, E) = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2(1,267\Delta m^2 L),$$

gdzie θ jest tzw. kątem mieszania, Δm^2 jest różnicą kwadratów mas (mierzoną w eV^2), L jest długością lotu (w metrach), a E jest energią neutrina (w MeV).

Mieszanie trzech rodzajów neutrin może być opisane przez trzy kąty mieszania θ_{12} , θ_{23} , θ_{13} , dwie różnice kwadratów mas Δm_{12}^2 , Δm_{23}^2 , oraz łamiącą kombinowaną parzystości CP fazę δ (o której jeszcze nie wiadomo, czy

jest różna od zera). Dwa z kątów mieszania ($\sin^2(2\theta_{23}) = 0,97$; $\sin^2(2\theta_{12}) = 0,86$) są dobrze zmierzone, głównie dzięki powolnej „słonecznej” oscylacji (powodowanej przez małą $\Delta m_{12}^2 = 7,59 \cdot 10^{-5} eV^2$), w której obserwuje się zanikanie neutrin elektronowych pochodzących ze Słońca, oraz dzięki szybkiej „atmosferycznej” oscylacji (powodowanej przez dużą $\Delta m_{23}^2 = 2,32 \cdot 10^{-3} eV^2$), w której obserwowane jest zanikanie neutrin i antyneutrino mionowych produkowanych w atmosferze przez promieniowanie kosmiczne.

Trzeci rodzaj oscylacji jest dużo trudniejszy do zaobserwowania, bo $\sin^2(2\theta_{13})$ okazuje się ograniczony do mniej niż około 0,1. Został on niemal wykryty przez eksperyment T2K (Japonia) za pomocą wiązki neutrin mionowych wysyłanych z Tokai, a rejestrowanych w Kamioce jako neutrino elektronowe, ale zbieranie danych zostało przerwane przez trzęsienie ziemi w ubiegłym roku. W rywalizacji pozostawało kilka grup doświadczalnych rejestrujących zanikanie antyneutrino produkowanych przez reaktory, ale przekonującego wyniku nie udawało się uzyskać.

Beniaminkiem w tej rywalizacji jest eksperyment Daya Bay. Zestaw doświadczalny składa się z trzech istniejących elektrowni jądrowych (każda z EJ ma dwa reaktory o mocy 2,9 GW) zlokalizowanych nad zatoką (o właśnie takiej nazwie) niedaleko Hongkongu oraz z trzech specjalnie wydrążonych jaskiń eksperymentalnych wyposażonych w (łącznie) sześć detektorów neutrin. Trzy z nich są tzw. bliskimi detektorami, a trzy są zlokalizowane w średniej odległości od EJ około 1650 m (tzw. dalekie detektory), odpowiadającej pierwszemu maksimum prawdopodobieństwa zanikania neutrin o średniej energii 3 MeV.

Dzięki temu specyficznemu zestawowi doświadczalnemu (oraz kilku innym dobrym pomysłom) większość błędów systematycznych kasuje się i już po dwóch miesiącach zbierania danych oraz po około miesiącu analizy (prowadzonej częściowo „na ślepo”) opublikowano wynik

$$\sin^2(2\theta_{13}) = 0,092 \pm 0,016 \text{ (stat)} \pm 0,005 \text{ (syst)}.$$

Został on uzyskany dzięki odpowiedniemu porównaniu liczby oddziaływań rejestrowanych w bliskich oraz dalekich detektorach. Odkrycie, że najmniejszy z kątów mieszania jest znacząco różny od zera, pozwala mieć nadzieję na przeprowadzenie badań naruszania CP w sektorze neutrin i, być może, odpowiedzenie na pytanie, czy obserwowana asymetria między materią i antymaterią może być wyjaśniona bez odwoływania się do nieznanych zjawisk.

Piotr ZALEWSKI

- [1] R. Landauer, *Irreversibility and heat generation in the computing process*, IBM J. of Research and Development **5**, 183–191 (lipiec 1961).
- [2] A. Béru, A. Arakelyan, A. Petrosyan, S. Ciliberto, R. Dillenschneider & E. Lutz, *Experimental verification of Landauer's principle linking information and thermodynamics*, Nature **483**, 187–189 (8 marca 2012).
- [3] F.P. An *et al.* (The Daya Bay Collaboration), *Observation of electron-antineutrino disappearance at Daya Bay*, submitted to Phys. Rev. Lett. (7 marca 2012)
http://dayabay.ihep.ac.cn/docs/DYB_rate-pr1.APS.pdf.