

A számítógépek építésének fizikai korlátai^{*}

Az emberi természettől elválaszthatatlan környezetére vonatkozó szüntelen és egyre pontosabb megismerési kényszer. Megfigyeléseit az idők folyamán különbözőképpen értelmezte, értékelte, és más-más célra használta fel megszerzett tapasztalatait, ismereteit, miközben folyton tökéletesítette módszereit. Modellezés, kísérlet, elemzés – e folyamatok eredményeképpen jutottunk el a mai kor „intelligens” eszközeihez, köztük a számítógéphez. A számítógép mára túlnőtte a megálmodói által neki szánt feladatkörét, és a mindennapos szórakozási, audio-vizuális, kommunikációs célokra való felhasználáson túlmenően a kutató laboratóriumokban modellez, kísérleteket szimulál, kísérleti eredményeket elemez egyre hatékonyabban. Nevezzük e tevékenységek háttérében húzódozó műveleteket együttesen (és sok mást is természetesen, amit most nem említettünk) számítási folyamatoknak.

Első, naív megközelítésben, a számítógépek működési elveire vonatkozó kérdésünket megfogalmazhatjuk úgy is, mint: hogyan modellezik a modellezőt? A számítógép maga is része a tanulmányozott fizikai világnak, rá is vonatkoznak a természettörvényekből adódó általános érvényű szabályok, sok esetben kényszerek, ezért nem elegendő csupán matematikai modellek alapján finomítani a struktúrát, növelni a számítások hatékonyságát stb.

A számítási folyamatok a fizika törvényeivel írhatók le, ezért a számítógép technikai fejlesztése csak akkor valóságorientált, ha komolyan vesszük azokat a feltételeket, határokat, korlátokat is, amelyek a matematikai elméleti modellalkotás alkalmával nem merülnek fel.

Fizikusok a számítástechnika jövőjéről

A számítási folyamatok és a fizika kapcsolatával részletesen foglalkoztak kiváló fizikusok és számításeméleti szakemberek egyaránt, köztük olyan ismert egyéniségek is, mint *Szilárd Leó*, aki az információ fizikai természetét feltárva adott magyarázatot és lehetőséget a „Maxwell-démon” paradoxon feloldására.

Richard P. Feynman, akit a számítástechnika Nostradamusaként is emlegetnek, 40 évvel a Nagasakit ért atomtámadás után Japánban egy békés témájú előadás keretében a jövő számítógépeinek technikai lehetőségeit, a gépek energiafogyasztásának problémáját fejtegette. A Feynman által megfogalmazott kérdésre – mennyire csökkenthetjük a számítógépek méretét összhangban a természet törvényeivel – ma is keresik a téma szakértői az optimális választ.

De nem csak Feynman mutatott élénk érdeklődést a számítógépek fejlődése iránt. 1985-ben a *Scientific American* hasábjain folytak élénk viták a témában. A júliusi számban tette közzé tanulmányát *Charles H. Bennett* és *Rudolf Landauer* *A számítástechnika fizikai korlátai* címmel, amelyben olyan kérdésekre keresik a választ, mint: mekkora energiára van szükség egy adott számítási feladat elvégzéséhez? Mennyi időre van szükség hozzá? Tartozik-e például az egyes logikai lépésekhez minimálisan szükséges energia? Más szóval: melyek a számítási folyamatok fizikai korlátai? Különböző, számítások elvégzésére alkalmas modellek bemutatásával törekednek a kérdésekre adandó válaszok megtalálására. Így például megmutatják, hogy ideális, súrlódásmentes biliárdgolyók ütköztetésével is végezhetőek számítási feladatok. A szükséges energia tetszőlegesen kicsivé tehető egy-

^{*} Átvéve a *Fizikai Szemle* 2007/2-es számából.

szerűen a műveletek lassú elvégzésével. Tehát semmiféle számítási feladat elvégzéséhez sem tartozik egy szükséges minimális energia.

A tanulmányban adott válaszok nem győzték meg egyértelműen a tudományos közösséget. *Dávid F. Mayer* például a cikke reagálva az említett folyóirat augusztusi számában éppen *Neumann János* e témában közzétett eredményeire hivatkozik: „A gépi számítások energiaszükségletének kérdését Neumann János vetette fel és oldotta meg, több mint harminc évvel ezelőtt. Elemzése röviden a következő: minden anyag mozgásban van, a részecskék mozgási energiája kT , ahol k a Boltzmann-állandó és T az abszolút hőmérséklet. Hogy a számítás minden lépésében információt kapjunk az *előző* lépés eredményéről, egy jelet kell továbbítani. Hogy ezt a jelet meg tudjuk különböztetni a *báttérzajtól*, energiájának nagyobbnak kell lennie, mint $\log_2 kT$...”

Ugyanebben a számban *John H. Mauldin* az alábbi megállapításokat teszi: „Egy fizikus számára az a gondolat, hogy az információfeldolgozás (elméletileg) nem fogyaszt energiát, elfogadhatatlannak látszik... minden olyan szerkezetnek, amely pontos beállítást vagy kalibrációt igényel, bizonyára szüksége van egy további, energiaigényes részre, amely biztosítja a kívánt feltételeket.”

Most *Tomaso Toffoli*t szeretném idézni, aki a továbbiakban tárgyalásra kerülő reverzibilis, illetve kvantumszámítás egyik jeles képviselője:

„A számítás – akár ember, akár gép végzi – fizikai tevékenység. Ha gyorsabban, jobban, hatékonyabban és intelligensebben akarunk számításokat végezni, akkor többet kell megtudnunk a természetről. Bizonyos értelemben a természet évmilliárdokon keresztül folyamatosan számolja a Világegyetem »következő állapot«-át; csupán azt kell tennünk, hogy »felkérdzünk« erre a hatalmas, állandóan folyó számításra, és megpróbáljuk kideríteni, hogy mely részei haladnak éppen arra, amerre mi is menni akarunk.”

Napjaink számítógépeinek fejlődési üteméről, a fejlesztendő területek technológiai újdonságairól, a szoftverekben rejlő lehetőségekről, a piacot uraló konkurens cégek termékeinek összehasonlításáról e helyen nem célunk beszélni, ezzel nagyon sokan foglalkoznak, és naprakészen közlik az új információkat mind a nyomtatott, mind az elektronikus szakfolyóiratokban.

A cikk szempontjából napjaink számítógépeire jellemző releváns adatok közül az alábbiakat emeljük ki:

- Tranzisztorok $\sim 0,03 \mu\text{m}$ szélesek, vastagságuk megegyezik 3 atoméval
- 10 milliárd kapcsolat /s
- processzor kapacitás: ~ 20 millió művelet /s.
- chipek mérete ~ 70 nm.

A számítógépek fejlődésének ütemét követve óhatatlanul megfogalmazódnak bennünk a kérdések:

- Meddig lehet a logikai áramkörök sebességet fokozni?
- Mekkora a legkisebb méretű tároló cella?
- Mekkora a számításokhoz szükséges energia?

Amikor a számítógépek fizikai korlátairól beszélünk, a továbbiakban azokra a fizikai folyamatokra gondolunk, amelyeknek az ismert természettörvények valamilyen értelemben határt szabnak.

A számítások fizikai korlátai

Információátvitel sebességének növelése

Mai ismereteink szerint, akár a relativitáselméletet, akár a kvantumelméletet véve alapul, sebességhatárnak a fény vákuumbeli terjedési sebességét fogadjuk el. Informá-

cióátvitel szempontjából, bármilyen közeget is tekintünk az információ hordozójának, az átviteli sebesség nem haladhatja meg a jól ismert $c = 3 \cdot 10^8$ m/s határértéket.

Egyetlen gondolat erejéig talán érdemes kitérni a kvantumelméletből ismert távolhatás problémájára, az EPR-párokra, amelyekről csak hosszas vita- és kísérletsorozat után sikerült bizonyítani, hogy mégsem képesek fénysebességet meghaladó információcserére. A segítségükkel megvalósított teleportáció, (amely kvantumállapotok átvitelét jelenti), sem sérti az említett határértéket.

Összefoglalva: a terjedési, információátviteli sebességnek csak a fénysebesség szab határt, vagyis legfeljebb $c = 3 \cdot 10^8$ m/s sebességű információtovábbítás lehetséges.

Információsűrűség-korlát

A számítógépes számításokat korlátozó másik tényező a tárolható információmennyiségre vonatkozik egy adott térrészben, mint például a számítógép memóriájában. Ilyen korlát nyilvánvalóan létezik, de a számítástechnika mai állása szerint még közelítőleg sem bocsátkoznak a szakértők jóslásokba erre vonatkozóan. A következőket mindenképpen állíthatjuk: létezik egy felső határ egy rendszer által tárolt információmennyiségre (entrópiára) vonatkozóan, amely a rendszer fizikai kiterjedésének és energiájának függvénye. Egy rendszer által tárolható információmennyiségen a rendszer által elfoglalt összes állapotok számának logaritmusát értjük.

Jacob Bekenstein vállalkozott egy ilyen korlát megadására, amelyet a termodinamika második főtételeként a fekete lyukak fizikájára való kiterjesztése kapcsán írt fel, és a fekete lyukak eseményhorizontjára alkalmazta első ízben. A *holografikus elv* néven ismert állítás szerint a Bekenstein-korlát kiterjeszthető tetszőleges, fekete lyukaktól különböző felületekre is.¹

¹ J.D. Bekenstein, Generalized second law of thermodynamics in black hole physics. *Physical Review D9* (1974)

A Bekenstein-korlát:²

² J.D. Bekenstein, A universal upper bound on the entropy to energy ratio for bounded system. *Physical Review D23* (1982)

$$S < 2 \cdot \pi \frac{ER}{hc}$$

ahol S a rendszer entrópia- vagy információtárolási kapacitása termé-

szetes alapú logaritmus skálán, E a rendszer összenergiája, R pedig a sugara. A fekete lyukak esetében a tömeg/energia hányados a sugár egyenes arányában változik, vagyis az entrópia a Bekenstein-korlát esetében a fekete lyuk felületével arányos. Ha valóban ez a helyzet, akkor a fekete lyuk eseményhorizontján az információsűrűség hatalmas, a számítások szerint $2,21 \cdot 10^{70}$ bit/m². Nyilván bátran állíthatjuk, hogy a DRAM-ok ezt a sűrűséget még jó ideig nem fogják elérni. A fenti összefüggés elemzése során kimutatták, hogy javításra szorul a magas hőmérsékletek tartományában, – határértékként 1000 kelvint adták meg. Ugyanakkor egy adott anyagmennyiség esetében, ha a nyomás/hőmérséklet normál értékekkel jellemezhető (nem extrém alacsony vagy magas), szintén további korrekciók szükségesek.

Az *1. táblázat* különböző anyagokra, fizikai rendszerekre számított maximális entrópiásűrűséget tartalmazza feltüntetve azokat a nehézségeket is, amelyek a mai technológiák mellett egyelőre lehetetlenné teszik a számított maximális értékek elérését.

1. táblázat

Maximális	entrópiasűrűség különböző fizikai rendszerekre	
anyag	maximális entrópiasűrűség	problémák
fekete lyuk	$4,14 \cdot 10^{39}$ bit/Å ³	~ Szaturnusz-tömegnyi anyag
nem fekete lyuk	$1,53 \cdot 10^{22}$ bit/Å ³	előbbi tömegmennyiség
normál anyagsűrűség	$\sim 3 \cdot 10^5$ bit/Å ³	hőmérséklet - milliárd fok
atomnyi anyagmennyiség	- 1-10 bit/Å ³	becsült érték, alkotó atomok függvénye

Információfluxus

Igen fontos fizikai mennyiség a számítástechnika fizikai korlátainak vizsgálatánál a maximális információfluxus, vagyis az egységnyi felületre számított információáramlási sebesség (a hírközlélelméletben információütemnek nevezik). Ez a korlát az előzőekben vizsgált korlátok következményeként értelmezhető.

Tegyük fel, hogy az adott anyag entrópiasűrűsége ρ_s . Az F_s információfluxus az adott anyag ρ_s entrópiasűrűségének és a v terjedési sebességnek a szorzata:

$$F_s = \rho_s v.$$

Az entrópiasűrűség korlátja az alábbi képletből adódik, míg a terjedési sebességnek a fénysebesség szab határt:

$$\rho_s \equiv \frac{S}{V} = \frac{16 \sqrt{\pi}}{3 \cdot 60^{1/4}} \left(\frac{c M}{\hbar V} \right)^{3/4},$$

ahol M/V az energiasűrűség tömeg egységben (a szokásos térfogati energiasűrűséget c^2 -tel elosztottuk).

Maximális számítási sebesség

Norman Margolus és Lev B. Levitin *The maximum speed of dynamical evolution* című publikációjukban az izolált fizikai rendszer dinamikai fejlődésének sebességét vizsgálták, vagyis a rendszer által felvett különböző állapotok számát adott időintervallum alatt. A kvantummechanikai definíció szerint két állapotot különbözőnek nevezünk, ha ortogonálisak egymásra. (Az ortogonalitás és információfeldolgozás kapcsolatával L.B. Levitin részletesen foglalkozott.³⁾

³⁾ L.B. Levitin, Physical limitations of rate, depth and minimum energy in information processing. *Theoretical Physics* 21 (1982) 299-309

Számításaik szerint – az olyan rendszerek esetében, ahol a kvantummechanika törvényei érvényesülnek – az a maximális érték, amely az átmenetet biztosítja az ortogonális állapotok közt E_0 átlagenergia mellett, az alábbi összefüggéssel adható meg:

$$v_1 \leq 4 \frac{E - E_0}{\hbar}.$$

Bizonyították, hogy amennyiben egy számítási művelet megkívánja a számítást végző rendszer valamely részének egy megkülönböztetett állapotból másikba való átmenetét, úgy az említett összefüggés abszolút felső korlátot szab a számítógépnek az adott számítás elvégzésére.

Ha egy elektront 1 V potenciállal gerjesztünk, akkor valamely számítási lépést képtelen nagyobb sebességgel elvégezni, mint $4 eV/h = 9,67 \cdot 10^{14}$ Hz ~ 1 művelet / femtoszekundum.

Tovább finomítva a részleteket, Margolus⁴ megemlíti, hogy amennyiben nem áll rendelkezésre a rendszer teljes energiája a számítási folyamat során (pl. az energia egy része hő formájában van jelen), a rendszer szabad energiája az, amely befolyásolja az egyes állapotok közti átmeneteket, ezáltal a számítások sebességét is.

⁽⁴⁾ N. Margolus, Physics-like models of computation. *Physica D10* (1984) 81-95)

Összehasonlítva az említett korlátokból származó eredményeket napjaink számítógépeinek kapacitásával, érdekes eredményekre jutottak. Ahhoz, például, hogy a jövő számítógépei – kihasználva a fizika törvényeiből adódó maximális lehetőségeket – 10^{31} bit információt legyenek képesek tárolni a mai $\sim 10^{10}$ értékhez képest, olyan memóriával kell rendelkezzenek, amelyek több billió kelvin hőmérsékleten működnek, egy termionukleáris robbanáshoz hasonlóan. Valószínűtlennek tűnik egy olyan memóriával rendelkező számítógép vezérlésének és stabilizációjának technológiai kivitelezése, amelyben „Big Bang”-szerű folyamatok játszódnak le.

A tárgyalt korlátok és napjaink számítógépeinek összehasonlító elemzése során jutottak el a kutatók arra a következtetésre, hogy csak a reverzibilitást kihasználó számítógépmoდეlek lesznek képesek arra, hogy megközelítsék a fent vázolt korlátokat. Ezek a számítógépek gyakorlatilag energiavesztés nélkül működnek majd, és reverzibilis (megfordítható) logikai kapukból épülnek föl, amelyekre az jellemző, hogy a kimeneten kapott értékekből egyértelműen azonosíthatóak a bemenő bitek értékei. A klasszikus számítógépek logikai kapui közül egyetlen ilyen létezik, a tagadó, NOT kapu, amely a bemeneten levő bit értékét az ellenkezőjére konvertálja a kimenetén.

Átfogalmazva a konklúziót: ha társadalmi igény mutatkozik olyan számítógépek iránt, amelyek kapacitásának, hatékonyságának csak a „természettörvények szabhatnak határt”, akkor mindenképpen paradigmaváltásra van szükség. Talán átélhetjük ezt a „forradalmat”, amely az elektronikus, kontra mechanikus számítógépek megjelenését követő korszakot idéző módon világgépünk átalakulását is maga után vonja.

Irodalom

1. J.D. Bekenstein, Limitations on quantum information from black hole physics. <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0110005>
2. J.F. Costa, *Physics and Computation: Essay on the unity of sci-ence through computation*. <http://fgc.math.ist.utl.pt/papers/unity.pdf>
3. N. Margolus, L.B. Levitin, *The maximum speed of dynamical evolution*. <http://people.csail.mit.edu/nhm/max-speed.pdf>
4. S. Lloyd, Ultimate physical limits to computation. <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9908043>
5. W.D. Smith, *Fundamental Physical Limits on Computation*. www.cise.ufl.edu/research/revcomp/physlim/PhysLim-CiSE/PhysLim-CiSE-5.ps
6. Borbély É., *A kvantuminformáció megszületése*. <http://www.sulinet.hu/tart/cikk/ae/0/18509/1>
7. Borbély É., *Reverzibilis számítás*, <http://www.sulinet.hu/tart/ncikk/ae/0/19634/index.html>

Borbély Éva
BME TMIT Doktori Iskola