

**UNIVERSITATEA DE VEST DIN TIMIȘOARA**

**DOCTOR HONORIS CAUSA  
SCIENTIARUM**

**Domnului Academician  
GHEORGHE PĂUN**



**Timișoara  
8 Decembrie 2016**



CUVÂNT  
la deschiderea ceremoniei de acordare a titlului de  
*Doctor Honoris Causa Scientiarum*  
al Universității de Vest din Timișoara  
**Domnului**  
**Academician Gheorghe Păun**

*Stimate Domnule Academician GHEORGHE PĂUN,  
Stimați membri ai comunității academice,  
Stimați invitați,  
Dragi studenți,  
Onorat auditoriu,*

Comunitatea Academică a Universității de Vest din Timișoara este preocupată constant de promovarea și recunoașterea meritelor științifice ale marilor personalități ale lumii științifice și ne simțim onorați ca astăzi să avem alături de noi pe domnul Academician Gheorghe Păun, personalitate marcantă a vieții științifice și culturale din România, figură reprezentativă a Școlii de Informatică la nivel național și internațional.

Titlul onorific conferit astăzi, cel de Doctor Honoris Causa Scientiarum, reprezintă modalitatea prin care Universitatea de Vest din Timișoara recunoaște public și pe deplin meritele deosebite ale domnului Academician Gheorghe Păun, care, în impresionanta sa carieră de cercetător și de om de cultură, întinsă pe aproape o jumătate de secol, a contribuit cu pasiune, eleganță și energie inepuizabilă la dezvoltarea științei în domeniile: teoria limbajelor formale și teoria automatelor, sisteme de gramatici, calculabilitate pe bază de ADN, calcul membranar / celular, combinatorică pe cuvinte, cercetări operaționale, semiotică, inteligență artificială, lingvistică computațională.

Academicianul Gheorghe Păun a văzut lumina zilei pe meleaguri argeșene, în Cicănești, lângă Curtea de Argeș, un spațiu încărcat de istorie, pe care dumnealui îl consideră, pe bună dreptate, unul dintre cele mai reprezentative pentru devenirea nației române. A absolvit Liceul „Vlaicu Vodă” din Curtea de Argeș (1965-1969), apoi Facultatea de Matematică a Universității din București (1969-1974). A obținut doctoratul în matematică la Universitatea din București în anul 1977, cu lucrarea „Simularea unor procese economice cu ajutorul teoriei limbajelor formale”, având drept coordonator pe regretatul matematician român Solomon Marcus. Din 1978 a fost cercetător la Universitatea din București, iar din 1990 a lucrat, ca cercetător, la Institutul de

Matematică al Academiei Române. În 1997 a devenit membru corespondent al Academiei Române, iar din 2012 este membru titular. Din 2006 este membru al Academiei Europei (Academia Europaea, Londra).

A petrecut mult timp în Andaluzia, din 2003 până în ianuarie 2013 fiind cercetător la Universitatea din Sevilla. Aici s-a bucurat de un prestigiu imens, contribuind decisiv la activitatea de cercetare din Universitate, alături de personalitățile științifice locale.

A rămas totuși atașat de meleagurile natale, de Cicănești, de Curtea de Argeș, locurile unde se simte acasă și unde s-a implicat în numeroase proiecte locale menite să sporească zestrea istorică a provinciei.

Rezultatele cercetărilor Domniei Sale sunt materializate într-un număr impresionant de publicații. A publicat cinci monografii de informatică teoretică în limba română și alte șase în limba engleză. Patru dintre acestea au fost realizate în colaborare (la Springer-Verlag, 1989 și 1998, Gordon and Breach, 1994, Taylor and Francis, 2000), cea de a cincea la Kluwer Academic Publ., 1997, și a șasea la Springer-Verlag, 2002. A publicat peste 550 de articole științifice (aproape 250 dintre acestea în reviste indexate ISI) în domeniul informaticii teoretice (în special teoria limbajelor formale, calculul bazat pe ADN și calculul membranar). O parte dintre aceste articole sunt scrise în colaborare, academicianul Gheorghe Păun având peste 100 de colaboratori, între care sunt nume importante pentru domeniul informaticii, precum A. Salomaa, G. Rozenberg, A. Ehrenfeucht, S. Marcus, J. Dassow, M. Novotny, E. Csuhaj-Varju, J. Kelemen, M. Ito, T. Yokomori, R. Freund, T. Head, G. Mauri, P. Mussio, F. Levis, V. Manca, M.J. Perez-Jimenez, A. Di Nola, N. Krasnogor etc.

Academicianul Gheorghe Păun a fost citat în peste 17.000 de lucrări (în jur de jumătate dintre ele fiind publicate în reviste indexate ISI) ale unor autori români (peste 190 la număr) și străini (peste 1.700 la număr), mulți dintre ei fiind foarte cunoscuți în informatica teoretică. Lucrarea în care se introduce calculul membranar are peste 2.000 de citări și a fost consemnată ca „fast breaking paper” de către ISI în 2003.

În 2007, în pagina web a ISI, la rubrica „Highly cited papers (last 10 years)”, au fost menționate 4 lucrări ale domnului Academician Gheorghe Păun. Pe această bază, în „Scientist rankings in computer science” autorul apărea pe poziția 83 (din 2.101 de informaticieni luați în seamă de ISI), cea mai înaltă poziție ocupată de un român, din țară sau din străinătate, din această listă.

În 2009, Academicianul Gheorghe Păun a fost inclus de ISI în categoria Highly Cited Scientists, ceea ce înseamnă situarea între cei mai citați 0.5% dintre toți autorii de lucrări de informatică din lume, fiind singurul informatician român inclus în această categorie (și al doilea român în general, alături de un chimist).

Activitatea științifică și profesională a Academicianului Gheorghe Păun a fost recunoscută printr-un număr impresionant de premii și distincții, dintre care amintim: Premiul „Gheorghe Lazăr” al Academiei Române, în anul 1983; Ordinul Național „Steaua României” în grad de Cavaler, 1 Decembrie 2016; Membru al Consiliului de conducere al Asociației Europene de Informatică Teoretică (EATCS) în 1991, reales în 1994, 1997 și 2000; Doctor Honoris Causa al mai multor universități din țară și străinătate; Honorary professor al Universității Xihua, din Chengdu, China, din 2016.

Domnul Academician Gheorghe Păun a fost invitat la numeroase universități și institute de cercetare din peste 20 de țări și a susținut peste 120 de conferințe invitate la universități importante din lume. Printre acestea se numără și Universitatea de Vest din Timișoara, în cadrul căreia a susținut prezentări invitate la două ediții ale simpozionului internațional SYNASC

organizat de către Departamentul de Informatică. O ediție a workshopului de P sisteme a fost organizată la Timișoara în cadrul aceleiași simpozion. Ca membru al comitetului de program al acestui simpozion, domnia sa a răspuns întotdeauna cu promptitudine solicitărilor și a oferit un sprijin necondiționat tinerilor cercetători interesați de domeniile în care domnia sa excelează. De asemenea, a fost prezent la seminarii științifice și în comisii de doctorat.

*Stimate Domnule Academician Gheorghe Păun,*

Universitatea de Vest din Timișoara, întreaga noastră comunitate academică, este onorată de prezența dumneavoastră, astăzi, la Timișoara. Prin acordarea titlului de Doctor Honoris Causa Scientiarum, Universitatea de Vest din Timișoara recunoaște public meritele dumneavoastră și este convinsă că, prin alăturarea Domniei Voastre comunității academice pe care o reprezintă, prestigiul instituției noastre, instituție din care de acum faceți parte, se va consolida.

Vă urez multă sănătate și putere de muncă, pentru a putea continua cu aceeași pasiune activitatea dumneavoastră de cercetător de elită în domeniul informaticii teoretice, precum și pe cea de om de cultură.

**Prof. univ. dr. Marilen-Gabriel Pirtea**



**Rectorul Universității de Vest din Timișoara**

## LAUDATIO

*în onoarea Domnului Academician*

*Gheorghe Păun*

*Onorat Prezidiu,  
Stimate Domnule Rector,  
Stimate Domnule Președinte de Senat,  
Doamnelor și Domnilor Senatori,  
Distinși Membri ai Comunității academice,  
Stimați invitați,  
Doamnelor și Domnilor,*

Cu prilejul dezvelirii unui bust al lui Eminescu la Sânnicolaul Mare, cel mai vestit oraș din România, la câțiva ani după Marea Unire de la 1918, Octavian Goga a rostit acolo o cuvântare pe care a încheiat-o cu cuvintele „Granițele unei țări le apără soldații și poeții”. Rolul elitei intelectuale în „apărarea granițelor”, apărare care are evident înțelesul de afirmare a identității naționale, de statornicire a spațiului pe care destinul istoric l-a hărăzit pentru o națiune, este covârșitor.

Dl academician Gheorghe Păun aparține elitei intelectuale actuale a României. În această perioadă în care, din păcate, valorile culturale și criteriile de valoare sunt extrem de volatle și nimeni nu mai știe ce este valoros și ce nu, d-sa ne dă un exemplu de ceea ce înseamnă cultura autentică. Cu o creație științifică și culturală de o amploare rar întâlnită, cu rezultate științifice fundamentale în domeniul informaticii teoretice, cu un număr impresionant de articole, cărți, diverse publicații în cele mai prestigioase reviste și edituri din țară și din străinătate, cu o implicare remarcabilă în acțiuni de cultură menite să repună valorile la locurile lor, dl academician Gheorghe Păun ocupă un loc de onoare în panoplia personalităților științifice și culturale ale României și nu numai. Beneficiează de o recunoaștere internațională impresionantă, de respect și admirație în cele mai importante medii academice din țări cu o mare tradiție culturală sau cu o dezvoltare actuală impetuoasă.

Principalele sale domenii de cercetare sunt teoria limbajelor formale și aplicațiile sale, lingvistica computațională, calculul bazat pe ADN și calculul celular/membranar. Calculul membranar (engl. Membrane Computing) a fost inițiat de d-sa, în 1998, prin introducerea unor modele formale ce poartă numele de *sisteme P* (engl. P Systems, cu P de la Păun). Autor extrem de prolific și complex, a publicat peste 550 de articole științifice și peste 90 de cărți: 11 cărți de matematică și informatică, 49 de volume colective editate, 5 cărți de popularizare a științei, 10

cărți despre jocuri logice, 17 cărți de literatură (SF, romane, memorii, eseuri și poezie). Multe dintre cărțile sale au fost traduse în limbile japoneză, chineză, rusă, engleză, maghiară, italiană. A ținut conferințe la peste 100 de universități și a avut numeroase invitații la conferințe internaționale.

Este sau a fost membru în colectivele editoriale peste 25 de reviste internaționale și este implicat în comitetele de program și organizare ale mai multor conferințe internaționale și workshop-uri. În prezent, este redactorul-șef al revistei lunare de cultură *Curtea de la Argeș*. În 1997 a fost ales membru corespondent, iar în 24 octombrie 2012 a fost ales membru titular al Academiei Române. Din 2006 este membru titular al *Academiei Europei*.

Acad. Gheorghe Păun se bucură de o excepțională vizibilitate și recunoaștere internațională, opera sa având peste 17.000 de citări. Este inclus de Thompson Institute for Scientific Information, ISI, în categoria „highly cited scientists”.

Este potrivit să inserăm aici opiniile despre Gheorghe Păun a doi titani în domeniul informaticii teoretice, Academician Arto Salomaa, Universitatea Turku, Finlanda, Membru al Academiei Finlandeze și al Academiei Europaea, și Prof. Dr. Grzegorz Rozenberg, Universitatea Leiden, Olanda, și Universitatea Colorado, SUA, Membru al Academiei Europaea.

*„I have had the privilege of working with Gheorghe Paun when he was several years in Turku in the 90's. His flow of new ideas and unbelievable working capacity gave us numerous strong results in the area of formal language. Then Gheorghe went his own ways and invented the area of computing with membranes, now known as P systems, where P stands for Paun. By now Gheorghe Paun is undoubtedly a giant in biological motivated computer science. The worldwide success of membrane computing, with numerous research groups and conferences, is amazing and unparalleled.”*

*Arto Salomaa*

*„Meeting Gheorghe Paun more than 30 years ago was one of the fortunate events of my long scientific life. Since then we have coauthored papers and books, and edited collective volumes and special issues of journals. I have witnessed his development from a very promising young researcher to a world level research leader. Initially, his main research area was classic theory of computation, in particular formal languages and automata theory. Then in 1998 he initiated the new area of research called Membrane Computing and since then it was the main focus of his research. This area, where various models of membrane computing are called P systems (with P standing for 'Paun') has quickly developed into a major strand of research. It became enormously successful and by today it is an established area of natural computing.*

*His success in science is based on his exceptional talents that combine the technical competence to solve hard mathematical problems with the ability to invent interesting research problems and even create new research areas. This combined with his contagious enthusiasm (which also fuels his amazing efficiency) explains why he has such a big number of devoted scientific followers. Scientific communities are formed, and then thrive, because they include exceptional scientists such as Gheorghe Paun.*

*His creativity is truly interdisciplinary, it extends to his literary and cultural activities. He wrote novels, poetry, popular science books, and books on games. He also edits a cultural magazine of high reputation and runs a culture club.*

*Bestowing a honorary doctorate upon Gheorghe Paun by the West University of Timisoara establishes a two-way relationship. First of all, I am convinced that Gheorghe Paun is very proud to be associated now with this university. On the other hand, the West University of Timisoara must feel privileged to have now among its doctors such an outstanding scientist – I congratulate the university on this choice.”*

*Grzegorz Rozenberg*

Gheorghe Păun a lucrat foarte mult cu Arto Salomaa și Grzegorz Rozenberg, lideri ai informaticii teoretice europene și mondiale, de multe decenii. Echipa celor trei se autonumea PRS (de la Păun, Rozenberg, Salomaa) = Pure Research Society.

Academicianul Gheorghe Păun are remarcabile contribuții în sfera informaticii teoretice. După 20 de ani de cercetare în teoria limbajelor formale, a avut inspirația, în anul 1998, să introducă un nou concept teoretic, care se numea la început sistem membranar și care a fost de fapt punctul de pornire a unei teorii recunoscută sub numele de Calcul Membranar. Acest sistem membranar reprezintă o mașină abstractă, un formalism de calcul inspirat din structura și funcționalitatea celulelor vii și pentru că autorul este Dl Gheorghe Păun, cel care a introdus pentru prima dată acest formalism, în literatura de specialitate îl găsim sub denumirea de P sistem.

Din punct de vedere informatic, aceste sisteme pot fi văzute și ca modele de calcul paralel și distribuit, cu ajutorul cărora s-au încercat găsirea unor soluții eficiente pentru unele probleme complexe. Aceste lucruri sunt susținute de caracteristicile unei celule, așa cum Gheorghe Păun preciza: „Distribuția, paralelismul, nedeterminismul, descentralizarea, (ne)sincronizarea, coordonarea, comunicarea, robustețea, scalabilitatea sunt doar câteva caracteristici” întâlnite în natură și de la care putem să ne inspirăm pentru a crea modele fiabile pentru rezolvarea unor probleme reale, unele chiar de o complexitate ridicată.

Gheorghe Păun susținea el însuși în primele sale prezentări: „calculul membranar se bazează pe observația generală că o celulă este cel mai mic element viu și, în același timp, este o minunată mașinărie minusculă, cu o structură complexă, cu o activitate proprie complicată și într-o relație extraordinară cu mediul – inclusiv cu celulele învecinate. Astfel, provocarea constă în a găsi în structura și funcționalitatea unei celule acele elemente folosite pentru calcul.”

Primul articol, „Computing with membranes”, al calculului membranar l-a scris Gheorghe Păun în 1998, dar a apărut în *Journal of Computer and System Sciences* (vol. 61, 2000, pp. 108-143) abia în 2000, și a acumulat până în prezent circa 2000 de citări. Un al doilea moment important în istoria calculului membranar a fost cartea *Membrane Computing. An Introduction*, Springer-Verlag, Berlin, 2002, care a fost citată de peste 1820 de ori până în prezent. Ambele lucrări îl au ca unic autor pe același Gheorghe Păun, care de atunci au produs o explozie de lucrări științifice și manuscrise de valoare.

Valoarea domeniului Calculului Membranar a fost dată și de cercetătorii care au fost interesați de domeniul propus de Dl Gheorghe Păun; dintre aceștia putem aminti pe primii colaboratori ai dânsului, Arto Salomaa (Finlanda), Grzegorz Rozenberg (Olanda), sau, ulterior, Oscar H. Ibarra (SUA), Sheng Yu (Canada), Kamala Krithivasan (India), Takashi Yokomori (Japonia), Mario J. Pérez-Jiménez (Spania), Jürgen Dassow (Germania), Erzsébet Csuhaj-Varjú (Ungaria), Jozef Kelemen (Cehia), Rudolf Freund (Austria), Gheorghe Marian și Gabriel Ciobanu (România), Yurii Rogozhin (Republica Moldova), Linqiang Pan (China), care la rândul lor au creat grupuri de cercetare dedicate calculului membranar.



Ne-ar fi foarte greu, dacă nu imposibil, să listăm toți cercetătorii cu care a colaborat direct sau pe cei care doar au fost inspirați de teoria calculului membranar, dar putem să observăm că puterea de calcul promisă încă de la început de un P sistem a făcut ca în decursul a 18 ani teoria calculului membranar să explodeze în idei și probleme cu remarcabilă valoare științifică. Teoria calculului cu membrane sau teoria P sistemelor cum i s-a spus ulterior, a adus peste 2.500 de lucrări științifice, peste 85 de teze de doctorat, peste 40 de cărți și peste 50 de conferințe care au avut ca temă acest subiect. Toate aceste rezultate științifice s-au născut din ideea genială a Acad. Gheorghe Păun, fără de care nu le-am fi avut.

Regretatul academician Solomon Marcus spunea în 2014: „Gheorghe Păun a evitat sistematic să lucreze în învățământ, să profeseze de la catedră. S-a dedicat total cercetării. Dar de îndată ce cucerea un teritoriu al cunoașterii, simțea nevoia să împărtășească și altora bucuriile trăite, să-i contamineze cu preocupările sale, prin expuneri invitate, prin ceea ce scria și publica, prin dezbateri și discuții personale.” Mai spunea despre dânsul că „a reușit să seducă numeroși cercetători, să-i atragă la preocupările sale”.

Unul dintre doctoranzi (de la Universitatea de Vest) interesat de teoria P sistemelor, prezent la conferința anuală de la Sevilla, într-una din pauze a pus o întrebare D-lui Păun: „Este adevărat că un P sistem poate să calculeze în timp polinomial soluția unei probleme de complexitate exponențială?”, la care dânsul a răspuns cu mare convingere: „Adevărat nu știu dacă este, de adevăr se ocupă religia și filosofia, noi aici suntem matematicieni și trebuie să demonstrăm că este sau nu așa!”

Academicianul Gheorghe Păun a adus contribuții multiple și importante în domeniul limbajelor formale și a aplicațiilor acestei frumoase discipline oarecum teoretice, aflată la granița dintre algebră, combinatorică și informatică.

Și în acest domeniu d-sa a dovedit aceleași calități de cercetare remarcabile, spirit pătrunzător de o ascuțime rară, energie creatoare debordantă, cultură specifică imensă, corectitudine și rigurozitate extremă, curaj în abordarea celor mai actuale teme în domeniu. A realizat numeroase lucrări științifice publicate în cele mai prestigioase publicații din țări cu o mare tradiție în domeniu, multe dintre ele în colaborare cu cele mai importante personalități, Salomaa, Rozenberg, Pérez-Jiménez, Solomon Marcus. Rezultatele d-sale au avut ecouri numeroase în medii academice din multe țări, existând aprecieri, dezvoltări și aplicații legate direct de descoperirile d-lui Gheorghe Păun.

Dintre multiplele teme abordate de Gheorghe Păun în domeniul limbajelor formale dorim să ne referim pe scurt la contribuțiile d-sale la limbajele și gramaticile contextuale. Acest tip de gramatici, introduse de Solomon Marcus în 1969, au la bază operația lingvistică fundamentală de inserție a unor „cuvinte” într-o frază dată, în concordanță cu anumite dependențe contextuale. Pornind de la o frază dată, operația de inserție se poate repeta de un număr de ori, obținându-se astfel un „limbaj contextual” specific. Studiul acestor procedee de generare și a limbajelor astfel generate a constituit un subiect de studiu interesant și a fost abordat de numeroși matematicieni sau chiar lingviști. Gh. Păun a publicat primele lucrări relative la acest subiect încă pe vremea când era student în anul V al Facultății de Matematică, cu o monografie în limba română în 1982, apoi o monografie în engleză în 1997. O anumită clasă de gramatici contextuale (gramatici cu utilizare maximală a selectorilor) are proprietatea importantă din punct de vedere lingvistic, de interes și pentru limbaje de programare, de a putea genera anumite structuri care nu sunt independente de context (de exemplu,  $\{xcx \mid c \in \{a, b\}^*\}$ ,  $\{a^n b^n c^n \mid n \geq 1\}$  etc.).

În colaborare cu alți cercetători sau ca singur autor, Gheorghe Păun a intuit numeroase conjecturi în domeniul limbajelor contextuale și a dat soluții (matematice) ingenioase pentru o serie de fapte remarcabile. Este relativ dificil de a selecta cele mai importante contribuții ale lui Gheorghe Păun, chiar și numai într-un domeniu mai restrâns, cum este cel al limbajelor contextuale. Dintre contribuțiile d-sale ne permitem să menționăm pe cele referitoare la capacitatea generativă a gramaticilor contextuale, introducerea unei structuri de arbore în șirurile generate de gramaticile contextuale cu utilizarea maximală a selectorilor, situarea limbajelor contextuale în ierarhia Chomsky și multe altele.

Într-o epocă în care științele sociale din România erau puțin conectate la realitățile științifice internaționale, domnul Gheorghe Păun, împreună cu colaboratorii academicianului Solomon Marcus, a întreprins cercetări interdisciplinare de mare originalitate, înaintea timpului în care au fost publicate și cu certitudine în afara contextului social în care au fost create:

- În cartea *Mecanisme generative ale proceselor economice*, publicată la Editura Tehnică din București în 1980, Gheorghe Păun schițează o abordare bazată pe complexitate gramaticală pentru modelarea și simularea mai multor procese din domeniul economiei. Tema este actuală și a fost reluată, mai târziu, independent, în literatura de specialitate americană în domeniul modelării raționalității mărginite cu automate finite, contribuția originală a lui Gheorghe Păun netrecând, din păcate, barierele existente la timpul respectiv.

- Gheorghe Păun a fost atras, de asemenea, de problematica *alegerii sociale*, în special de problemele conexe celebrei teoreme a lui Arrow. În volumul *Paradoxurile clasamentelor*, publicat la Editura Științifică și Enciclopedică în anul 1987, Gheorghe Păun oferă, în contextul unei prezentări de popularizare a metodelor de agregare a clasamentelor și problemelor cu care acestea se confruntă, date experimentale privind probabilitatea de existență a unui ciclu în cazul agregării folosind diferite metode. Această problemă avea să fie revizitată în anii noștri în literatura de specialitate de vârf din domeniul informaticii teoretice, folosind (de către Gil Kalai de la Hebrew University din Ierusalim și alți cercetători de vârf) metode avansate de tip analiză Fourier pe corpuri finite pentru caracterizarea probabilității de apariție a ciclurilor în teorema lui Arrow. Cum remarcă profesorul Solomon Marcus în articolul *Games of His Life* (publicat într-un volum omagial dedicat lui Gheorghe Păun apărut la editura Springer în 2001), volumul *Paradoxurile clasamentelor* ar merita tradus în engleză. Am spune, de asemenea, că problematica respectivă merită reabordată cu mijloace moderne.

- Gheorghe Păun a fost unul dintre puținii cercetători români implicați (încă din anii comunismului) în proiecte internaționale de cercetare. Astfel, în cadrul proiectului *Goals, Proceses and Indicators of Development* (GPID), coordonat de Universitatea Națiunilor Unite și care implica figuri binecunoscute precum Johann Galtung și Solomon Marcus, Gheorghe Păun publică mai multe studii privind problema *agregării indicatorilor economici*. Astfel, într-un articol publicat în anul 1983 în revista *Fuzzy Sets and Systems* (Elsevier), Păun oferă (pe urmele lui Kenneth Arrow) o *teoremă de imposibilitate a agregării indicatorilor economici*: un indicator economic este, de multe ori, subiectul unor cerințe naturale, care funcționează drept restricții asupra claselor de indicatori demni de luat în seamă. Gheorghe Păun arată imposibilitatea existenței unui indicator simultan sensibil, non-catastrofic și non-compensatoriu. Prin urmare, indicatorii existenței (produsul intern brut este doar cel mai cunoscut exemplu) suferă de problema de a agrega (într-o măsură care inevitabil

conduce la pierdere de informații) caracteristici importante ale unei economii, punând pe același plan situații care diferă în mod semnificativ.

- Amintim, de asemenea, pe scurt, lucrările privind probleme de decizie multicriterială, pe cele privind ambiguități sintactice în limbajele de programare, sau pe cele privind aplicațiile teoriei automatelor în cibernetică.

Dincolo de preocupările științifice, Gheorghe Păun este un avid popularizator în domeniul jocurilor. Prin volumele sale *Introducere în GO și 250 de probleme de GO*, fondarea Federației Române de GO și neobosita activitate de popularizare în acest domeniu, Gheorghe Păun poate fi numit, fără a exagera, unul dintre părinții (dacă nu *părintele*) GO-ului românesc. În cuvintele lui Radu Baci, „Nimic din ceea ce a urmat nu ar fi fost posibil dacă atunci, în anii ‘80, nu ar fi existat el. Atât în București cât și (mai ales) în Timișoara se juca GO cu mult înainte de apariția lui Păun; în ambele locuri însă extinderea jocului nu depășise dimensiunile unor mici cercuri de prieteni. În ambele locuri se făcuseră încercări pentru crearea unor cluburi de GO, toate având însă parte de o existență relativ scurtă – nereușindu-se cooptarea a prea mulți alți jucători. Din punct de vedere al răspândirii jocului, toate încercările de până atunci rămăseseră deci fără vreun rezultat notabil.”

GO-ul nu este singurul joc căruia Gheorghe Păun i-a acordat atenție: volume precum *Între matematică și jocuri* (Ed. Albatros, 1986) sau *Jocuri și matematică* (Editura Tehnică, trei volume) îl prezintă drept un extraordinar comunicator al metodelor matematice și al modului de gândire bazat pe logică, pornind de la aspectele probabil cele mai îndrăgite de publicul larg: cel al jocurilor de strategie.

Pe de altă parte, activitatea de popularizare a matematicii pe care a întreprins-o Gheorghe Păun cuprinde numeroase volume, precum *Din spectacolul matematicii* (Editura Albatros, 1983), *Matematica? Un spectacol!* sau *Modelul matematic – instrument și punct de vedere*, scrisă împreună cu colegul și prietenul Cristian Calude (Editura Științifică și Enciclopedică, 1982), care oferă cititorului obișnuit un acces prietenos și plin de învățăminte la o serie de rezultate din literatura științifică de specialitate.

Nu putem incheia această prezentare fără a aminti activitatea de scriitor și om de cultură a lui Gheorghe Păun: autor a 21 de cărți, cuprinzând eseuri, povestiri și romane, din care *O mie nouă sute nouăzeci și patru: schimbarea care nu schimbă nimic*, roman cu un titlu-replică la celebrul volum *1984* al lui George Orwell, a fost tradus în engleză și maghiară, editor al revistei *Curtea de la Argeș*, Gheorghe Păun s-a autodefiniț prin activitatea depusă în această zonă drept un promotor al dimensiunii culturale a științei, al dialogului între aceasta și umanioare, precum și al promovării adevăratelor valori culturale și spirituale, model de seninătate, raționalitate și toleranță pentru puncte de vedere opuse, la o scară greu întâlnită azi în societatea românească.

Fiind convinși de valoarea și prestigiul științific al Domnului Academician Gheorghe Păun, acordarea titlului de **Doctor Honoris Causa Scientiarum** onorează nu numai mediul academic al Universității de Vest din Timișoara, respectiv al Facultății de Matematică și Informatică, cât și întreaga comunitate a informaticienilor și matematicienilor din centrul universitar timișorean și din vestul României.

De asemenea, suntem pe deplin convinși că prin personalitatea științifică a Domniei Sale și vasta experiență, Domnul Academician Gheorghe Păun va continua să aibă un rol hotărâtor în dezvoltarea cercetării științifice de informatică.

**Comisia de *Laudatio* pentru acordarea titlului *Doctor Honoris Causa Scientiarum***

Președinte,

**Prof. dr. Marilen Gabriel Pirtea**, Rectorul Universității de Vest din Timișoara

**Membri:**

Prof. dr. Viorel Negru, Universitatea de Vest din Timișoara

Prof. dr. Arto Salomaa, Universitatea Turku, Finlanda

Prof. dr. Mărușter Ștefan, Universitatea de Vest din Timișoara

Prof. dr. Grzegorz Rozenberg, Universitatea Leiden, Olanda

Conf. dr. Gabriel Istrate, Universitatea de Vest din Timișoara

Lector dr. Cosmin Bonchiș, Universitatea de Vest din Timișoara

## Alocuțiunea domnului Academician Gheorghe Păun cu ocazia decernării titlului onorific de Doctor Honoris Causa Scientiarum

### Dintre mirările unui bio-informatician

Acad. Gheorghe Păun

1. Titlul acestor rânduri își ia anumite precauții – vizibile, dar țin să le subliniez.

În primul rând, caracterul autobiografic. Ultimele două decenii – pentru rigoare, ultimii douăzeci și doi de ani – am fost total dedicat bio-informaticii, aș putea spune chiar *confiscat* de această arie de cercetare fascinantă, promițătoare, nelimitată în posibilități, de la dezvoltări teoretice la aplicații. Începutul se plasează prin primăvara anului 1994, când am citit o lucrare a lui Tom Head, un american înțelept, prieten și colaborator ulterior, care, deja în 1987, propusese un model de teoria limbajelor formale pentru operația de recombinație a ADN-ului, sub influența enzimelor restrictive și a ligazelor. A numit-o operație de *splicing*. O voi descrie pe scurt mai târziu. Îmi amintesc precis, eram la Graz, în Austria, la o conferință. Am fost, pe de o parte, cucerit de idee – veneam după exact două decenii de cercetare în limbaje formale, căutam, subconștient, domenii de aplicare a lor, pe de alta, ușor nemulțumit, pentru că formalizarea rămăsese inoperant de aproape de realitatea biologică. Chiar atunci, în hotelul din Graz, am imaginat o definiție mai aproape de stilul cu care eram obișnuit, l-aș numi *stilul Salomaa-Marcus*, în care mă formasem, iar apoi, patru ani n-am mai părăsit domeniul. Până în 1998, când am avut un al doilea frison, după ce am definit un model de calcul inspirat din structura și funcționarea celulei, primul dintr-o familie de modele care încă mai crește. M-am identificat de atunci cu *calculabilitatea membranelor*, încercare de traducere pentru *membrane computing*, domeniu care m-a transformat într-o inițială și care va fi teritoriul principal prin care îl voi invita pe cititor în cele ce urmează. Voi folosi prescurtarea MC, pentru a evita atât sintagma românească greoaie cât și folosirea mai neutrului anglicism.

Revin la precauțiile din titlu. Mirări-uimiri, nu modele-rezultate-aplicații, deși primele se leagă de celelalte. Locuri în care matematicianul care sunt prin educație și informaticianul cu douăzeci de ani de teorie – am absolvit Facultatea de Matematică în 1974 – rămâne pe loc și face ochii mari. Fie nu înțelege, fie se aștepta la altceva, fie se află în fața unor *obiecte* venite dinspre biologie și care, privite prin ochelarii matematicianului-informatician, sugerează idei-modele de calcul cu totul inedite pentru informatica teoretică și, cu atât mai mult, pentru cea practică, pe care o știm din cărți sau din implementările propriu-zise. În evoluția sa de milioane de ani (ader la premisa evoluționistă, nu este nici locul pentru o discuție despre creaționism versus evoluționism, nici nu avem nevoie, în cele ce urmează, de vreo ipoteză creaționistă, cum se spune că ar fi spus Laplace și, după el, alte nume mari, mai ales din fizică), viața a pus la punct

procese și suporturi pentru aceste procese de o subtilitate și eficiență remarcabile, care pot fi transferate, cel puțin teoretic, pe hârtie, informaticii. Cum să facem asta, se întreabă matematicianul-informatician? Cu ce folos, se întreabă informaticianul cu privirea îndreptată spre aplicații? De ce atât de multe aspecte ale informaticii, așa cum o avem, par *nenaturale*, departe de „realitatea reală”, cea de natură biologică? Unele întrebări se apropie mult de marginea dinspre *science fiction* a științei, dar nu le voi evita, în măsura în care știința nu le respinge ca total neplauzibile. Ne plasăm aici sub semnul posibilului, nu al probabilului.

Vor apărea și alte întrebări-mirări-uimiri, mai precise, mai localizate... O parte doar dintre cele de care am avut parte, cu atât mai puține în raport cu posibilele mirări ale altor colegi de preocupări bio-informatică. E rostul lui *dintre* din titlu...

Câteva precizări de stil. Deși voi face referiri la numeroase noțiuni, din biologie sau din informatică, deși la finalul textului voi aduna o bibliografie destul de acoperitoare (și aceasta, preponderent autobiografică), discuția va fi informală, fără referințe și note de subsol care să îngreuneze textul (dându-i un „caracter științific”, așa cum se crede uneori despre „aparatură critic”).

Apropo de bibliografie: unul dintre titluri este cel al Discursului de Recepție în Academia Română, rostit pe 24 octombrie 2014, cu privilegiul unui răspuns dat de regretatul Solomon Marcus, Profesorul, totdeauna cu inițială majusculă. Paginile de față pot fi privite ca o continuare ceva mai personal-coloquială a acestui Discurs, o completare, dar și ca un omagiu adus Profesorului, care promova mirarea, prezumția de nedumerire.

Peste toate, acest text este o invitație pentru cititor la a ne mira împreună...

**2.** Înainte de orice prilej-pretext de mirare, ar fi însă folositor să precizăm cât de cât cadrul: cam ce/câtă biologie, cam ce/câtă informatică ne sunt necesare în continuare?

Biologia celulei mai ales, la nivel general: membrane care delimitează compartimente, „reactoare protejate” în care au loc reacții biochimice specifice, între „chimicale” (de la ioni la macromolecule de mari dimensiuni) care plutesc în soluție apoasă sau sunt fixate de membrane sau de citoscheletul intern, canale proteice care fac posibilă comunicarea între compartimente. Foarte multe altele ar putea fi adăugate, foarte multe știu biologii despre celulă. Monografia scrisă de Alberts, Johnson, Lewis, Raff, Roberts, Walter, *Molecular Biology of the Cell*, are peste 1.500 de pagini de format mare. Un univers – nanometric. Cea mai mică entitate despre care nu există dubii că este *vie* (despre viruși părerile sunt împărțite). O „uzină” complexă, rezistentă și fragilă în același timp, foarte precis și eficient organizată.

Apare deja aici o uimire, dar mai degrabă de tip biologic: ce face diferența dintre viu și neviu? Fizica și chimia nu sunt în stare să dea un răspuns convingător. Frontiera ține cumva de organizare, de informație, de un *altceva* pe care nu-l putem încă percepe, pricepe și nici modela; putem să-l numim *suflet*, *suflet vital*, doar pentru a scăpa de o obsesie, amânând întrebarea. Reținem un detaliu important: biologia, chimia, fizica actuală sunt mult avansate în a studia ceea ce au ele de studiat la nivel substanțial și al energiei, fiind mult în urmă cu studiul informației. Nu detaliez, direcția ridică nenumărate alte întrebări, pornind cu însăși definiția noțiunilor de informație, de organizare, de complexitate. Putem concepe informația fără suport, liberă de celelalte două componente a ceea ce numim în general *materie*, adică substanța și energia?

Două remarci, în context: (1) și biologia și fizica se pregătesc să treacă la „o nouă vârstă” – pentru biologie s-au și propus nume actualizate: *infobiologie*, *infobiotică*, și (2) informatica este parte a teoriei informației, în accepțiune foarte largă, iar abordarea computațională, algoritmică, pare a fi una dintre căile prin care biologia și fizica vor evolua în viitorul imediat.

Calculabilitatea cuantică este un prim pas pentru fizică (Gruska), bio-informatica pare a fi o jumătate de drum pentru biologie.

Revin la celulă, cu o „ecuație”-slogan pe care Solomon Marcus a lansat-o la una dintre primele întâlniri de MC, de la Curtea de Argeș, 2001:

*Viața = software ADN + hardware membranar.*

Se subliniază astfel rolul membranelor în viața celulei, justificând cumva relativ neinspirata denumire pe care am dat-o domeniului, de *membrane computing*, o mai bună alegere fiind probabil *cellular computing*.

Desigur, după celula individuală, voi mai invoca, incidental, populații de celule, țesuturi, organe, colonii de bacterii și, în cele din urmă, „celula gânditoare”, neuronul.

Detalii, în paragrafele care urmează, acum, plasarea în informatică. Calculabilitate Turing în primul rând. Cadrul standard la care sunt raportate mai toate cercetările de profil. Prin teza Turing-Church, nivelul maxim de calculabilitate algoritmică. Genialul Turing, la numai 24 de ani, dădea răspuns întrebării lui Hilbert privind ceea ce se poate *calcula mecanic*, cu particularizări privind decidabilitatea în aritmetică, introducând în teza sa de doctorat ceea ce acum este numită *mașină Turing*, definiția cea mai convingătoare (pentru contemporanii care de mai mulți ani făceau eforturi să răspundă provocării lui Hilbert: Church, Kleene, Gödel etc.) și cea mai generală a noțiunii de algoritm. Prin definiția *mașinii Turing universale* (o mașină capabilă să simuleze orice mașină Turing particulară, pentru orice input al acesteia, imediat ce un cod al mașinii particulare și inputul ei sunt introduse ca input în mașina universală) și prin teorema de existență a unei asemenea mașini, Turing semna și certificatul de naștere al calculatoarelor de azi: la începutul anilor '40 ai secolului trecut, John von Neumann a folosit explicit ideile lui Turing în proiectarea primelor calculatoare (programabile, așa cum universalitatea mașinii Turing facea posibil). De aici, numele de calculatoare Turing-von Neumann, de aici caracterul lor secvențial, vulnerabilitatea principială la viruși (programele stau alături de date, în memorie, și pot fi afectate, la fel ca datele, de alte programe).

La extrema maximă, mașina Turing, la pragul de jos al calculabilității, automatul finit, o formă restricționată până la limită a mașinii Turing. Aceștia sunt cei doi poli ai calculabilității la care bio-calculabilitatea se raportează în mod constant.

Cei doi poli ai *competenței*, al puterii de calcul. În practică, cel puțin la fel de importantă este *performanța*, eficiența. Astfel, intră în scenă teoria complexității, cu faimoasa distincție între clasa problemelor care pot fi rezolvate în timp polinomial (în raport cu dimensiunea datelor de intrare) și clasa problemelor pentru care nu sunt cunoscuți algoritmi polinomiali, dar, dacă cineva ne propune o soluție (dacă o „ghicim” cumva), putem verifica în timp polinomial dacă ea este corectă. Celebrele clase **P** și **NP**, celebra problemă dacă **P = NP**, prima din lista „problemelor mileniului”, pentru soluția căroră Institutul Clay din SUA oferă un milion de dolari.

Vor mai fi invocate și gramatici (Chomsky mai ales), vor mai apărea detalii, atunci când va fi nevoie de ele.

### 3. Să începem cu ADN-ul, cronologic primul teritoriu explorat și un bun studiu de caz.

*Astăzi învățăm limba în care Dumnezeu a creat viața*, declama istoric Bill Clinton, la încheierea citirii genomului uman, în vara anului 2000. Sintaxă, la modul cel mai propriu. Patru „litere”, A (adenină), C (citozină), G (guanină), T (timină), așezate de-a lungul a două șiruri/catene, cu perechi bine precizate stând față în față, așa-numitele perechi complementare Watson-Crick (Premiul Nobel în 1962, pentru descoperirea structurii ADN-ului, la începutul anilor '50): A totdeauna în pereche cu T și C totdeauna în pereche cu G. Aceasta este structura

primară – singura care ne interesează aici. Structura secundară, elicoidală, sau cea ternară, împachetarea uriașei molecule, nu sunt relevante pentru ce urmează. Dacă ridicăm temperatura (soluției în care sunt plasate moleculele de ADN), cele două catene se separă. Dacă scădem temperatura, nucleotidele își caută perechea complementară și refac dubla catenă. Apar apoi enzimele restrictive – cineva le numea cele mai inteligente unelte pe care natura le-a dat biochimistului genetician. Niște proteine care recunosc un șir scurt de nucleotide, un *pattern*, putem să-l numim, mai lingvistic, un *context*, și taie apoi molecula de ADN, de cele mai multe ori, în interiorul șirului recunoscut, de cele mai multe ori, lăsând în urmă *capete lipicioase*: o catenă e tăiată într-un loc, cealaltă la câteva nucleotide distanță; șirurile simple de nucleotide sunt *lipicioase*, dacă-și găsesc complementarele, aderă la ele, refăcând dubla catenă.

Multă altă biochimie se află în jur (de pildă, ligazele, alte enzime, care ajută la refacerea dublei catene, sau faptul că șirurile de nucleotide au o orientare, capetele le sunt notate cu 3' și 5', biochimistii știu de ce, orientarea este opusă pe cele două catene ale unei molecule și se păstrează după separarea prin încălzire), dar și multă calculabilitate. La fel de multă lingvistică se află în jur – a semnalat-o Solomon Marcus încă din 1974, într-o lucrare apărută prea devreme, nu a avut ecoul pe care îl merita.

Acum, un prim exemplu, o primă surpriză.

Un rezultat de teoria limbajelor formale, publicat în 1980 de Engelfriet și Rozenberg, spune că orice limbaj care poate fi recunoscut de o mașină Turing (echivalent: care poate fi generat de o gramatică Chomsky), deci un limbaj de tipul cel mai general dintre limbajele *calculabile*, poate fi obținut plecând de la un anume limbaj *fixat*, independent deci de limbajul-țintă, prin folosirea unui traducător secvențial, cel mai simplu tip de traducător, un automat finit cu ieșire (se citește șirul de intrare, de la stânga la dreapta, fără revenire, și la fiecare simbol citit se scrie un simbol sau mai multe la ieșire, în funcție și de *starea* traducătorului, una dintr-o mulțime finită). Limbajul unic de plecare, cel în care sunt „ascunse” toate limbajele calculabile, se obține în felul următor: se iau simbolurile 0 și 1, se consideră „complementarele” lor 0' și 1', se ia un șir de simboluri 0, 1, se consideră șirul-geamăn (*twin*) de simboluri 0', 1', se amestecă/intercalează cele două șiruri, precum cărțile de joc, în toate modurile posibile, păstrând ordinea simbolurilor din fiecare șir (în engleză, operația se numește *shuffle*), se colectează toate șirurile rezultate, pentru toate șirurile de plecare posibile peste alfabetul 0, 1, iar mulțimea de șiruri obținută este limbajul căutat. Se numește limbaj *twin shuffle* peste 0, 1.

Patru litere, 0, 0', 1, 1'. Probabil aceasta este coincidența care le-a sugerat lui Rozenberg și Salomaa următoarea operațiune: luăm o moleculă de ADN și o parcurgem de la stânga spre dreapta, pe cele două catene, cu viteze aleatoare, scriind 0 dacă întâlnim A sau T pe catena superioară, 0' dacă le întâlnim pe catena inferioară, 1 dacă întâlnim C sau G pe catena superioară și 1' dacă le întâlnim pe catena inferioară. Făcând acest lucru pentru toate moleculele posibile de ADN, obținem... exact șirurile limbajului *twin shuffle* peste 0 și 1! Conform teoremei lui Engelfriet și Rozenberg, dacă mai aplicăm și un traducător secvențial, obținem orice limbaj calculabil Turing. Altfel spus, tot ce se poate calcula se află „codificat” în molecula de ADN, trebuie doar să citim moleculele în modul schițat mai devreme, apoi să rescriem citirile cu ajutorul unui traducător secvențial. O concluzie cu totul neașteptată, greu de imaginat (dacă nu ar fi existat rezultatul teoretic din 1980).

Într-o carte pe care am scris-o împreună cu Rozenberg și Salomaa, apărută la Springer în 1998, există două rezultate care completează această observație: pe de o parte, putem considera numai trei simboluri-nucleotide, 0, 0' și 1, acesta de pe urmă fiind propriul său „complement” (natura obișnuiește să fie redundantă, natura iubește și simetria), în plus, putem ține seama și de



orientarea diferită a celor două catene, în sensul că putem citi una de la stânga la dreapta și pe cealaltă în sens invers. În ambele cazuri, rezultatul este același, caracterizarea puterii de calcul a mașinii Turing.

Vincenzo Manca a demonstrat ulterior că structura moleculei de ADN este, într-un anumit sens, *necesară* pentru a asigura universalitatea computațională.

Deja, o frumoasă uimire – și un reconfortant exemplu de utilizare a unui rezultat „pur teoretic” într-un cadru nou, mult mai apropiat de realitate.

4. Să trecem însă la operația de *splicing*, a lui Tom Head (introdusă în 1987, deci, la nivel teoretic, calculabilitatea pe bază de ADN a apărut înaintea celei practice, declanșată de experimentul din 1994 al lui L.A. Adleman). Recombinare, *cut-and-paste*, iarăși, cu o formulare sintactică, formală. Dacă două enzime restrictive, fiecare cu *patternul* ei, taie două molecule de ADN astfel încât produc capete lipicioase identice, atunci fragmentele de molecule se pot recombină, prefixul uneia cu sufixul celeilalte. În felul acesta, se trece de la două molecule de plecare, la două molecule noi.

Lucrurile se pot simplifica, fără a pierde prea mult din semnificațiile biochimice. Mai întâi, complementaritatea Watson-Crick permite trecerea de la dubla catenă la șiruri obișnuite de simboluri. În asemenea termeni, fiecare enzimă recunoaște un subșir și taie la mijlocul acestuia, la o poziție precizată. Două enzime care produc capete lipicioase identice conduc la o *regulă de splicing*, care se poate scrie ca un cvadruplu de șiruri, prima pereche indicând *patternul* recunoscut de prima enzimă și locul unde aceasta taie șirul, analog a doua pereche pentru a doua enzimă. Versiunea simplificată a fost mult studiată în calculabilitatea pe bază de ADN. În teorie, pentru că este punctul de plecare al unui model de calcul pe care l-am numit, împreună cu Rozenberg și Salomaa, *sistem H*, omagiu lui Tom Head. Se dau o mulțime finită de șiruri-axiome și o mulțime de reguli de *splicing*, se aplică regulile axiomelor, apoi șirurilor obținute astfel și așa mai departe, iterativ, se selectează eventual numai anumite șiruri și în felul acesta generăm un limbaj. Ca într-o gramatică Chomsky.

Două sunt rezultatele de bază – între ele, mirarea! Pe de o parte, o caracterizare a limbajelor regulate, cele recunoscute de automatele finite (rezultat cu mai multe demonstrații, complicate la început), pe de altă parte, o caracterizare a puterii de calcul a mașinii Turing (rezultat care-mi aparține, cu demonstrația, oarecum surprinzător, mai simplă decât a primului rezultat). Diferența: în primul caz, mulțimea de reguli este finită, în al doilea este infinită (dar ea poate fi codificată sub forma unui limbaj regulat). Mulțimea de reguli poate fi finită și pentru al doilea rezultat, dacă aplicarea regulilor este controlată în diverse moduri, sugerate de biologie sau de teoria limbajelor formale: promotori, inhibitori, o relație de prioritate, impunerea unei dependențe în timp a regulilor utilizate și altele.

Detaliile tehnice nu ne interesează aici, important este că fie calculăm la nivelul unui pol al calculabilității, fie la celălalt pol. Totul sau nimic, fără a egala alte niveluri intermediare – și sunt multe, în termeni de automate și de gramatici. Interesant este că și în alte contexte, de pildă, în MC, obținem rezultate similare. Putem de aici conchide că nivelurile intermediare nu sunt *naturale*? Într-un anume sens, da, pentru că, dacă ne gândim la automatele care corespund limbajelor independente de context și celor dependente de context în sensul lui Chomsky, automatele push-down și cele liniar mărginite, primele au definiții destul de ad-hoc, cele din a doua categorie sunt inspirate de teoria complexității, iar clasa e definită printr-o proprietate observată în timpul funcționării, nu folosind o proprietate statică, aparținând arhitecturii automatului.

5. Discuția se poate generaliza: ce înseamnă a calcula în mod natural? Folosind ce structuri de date și ce operații cu acestea?

Informatica teoretică se ocupă mai ales cu procesarea de șiruri de simboluri, preponderent prin *rescrierea (rewriting)*, înlocuirea unui subșir, scurt în raport cu întregul șir aflat în procesare, cu un alt șir. Pe banda automatelor de orice fel, de la mașina Turing la automatul finit, este scris un șir de simboluri. Gramaticile Chomsky, sistemele Lindenmayer, gramaticile contextuale Marcus, sistemele Post, algoritmi Markov, toate acestea procesează șiruri. La fel face Thue, cu morfismele sale iterate, corespunzătoare de altfel sistemelor Lindenmayer deterministe.

Prin comparație, ce găsim în biologie? Dubla catenă în cazul ADN-ului, iar ca operații recombinarea, splicing-ul lui Tom Head, separarea și realipirea celor două catene, abia rareori mutațiile punctuale, iar acestea la nivel de nucleotidă. Apoi, în compartimentele celulei, *multisetul*, mulțimea cu multiplicități asociate elementelor. În biochimie, la fel ca în chimie, *numerele contează*. Dacă ADN-ul este un șir, deci am putea considera că pe moleculă avem informație pozițională, ca în cazul numerelor arabe, în soluția apoasă din celulă numerele sunt exprimate unar. Baza unu este exponențial mai puțin eficientă decât baza doi – și totuși aceasta este aleasă de biologie. O reacție biochimică poate fi însă interpretată ca operație de rescriere a unui multiset: un submultiset este înlocuit cu un alt multiset. Dar, în funcționarea celulei apar și alte operații, cum sunt cele de *simport* și *antiport* – voi reveni la acestea, pentru că merită o discuție mai detaliată, sau operații prin care membranele însele evoluează (divizare, dizolvare, creare de membrane, exo- și endocitoză etc.). La fel, în ceea ce privește funcționarea neuronilor și a rețelelor neurale (mă feresc să spun „funcționarea creierului”, pentru că, chiar dacă neurologii știu totul despre fiziologia creierului, nimeni nu poate spune cum devine creierul *minte*, organ al gândirii, simțirii, sentimentelor, conștiinței; ipoteze, propuneri, speculații există, certitudini mai puține).

Cu toate aceste suporturi de date și operații asupra lor se pot defini modele de calcul, majoritatea echivalente cu mașina Turing, deci complete computațional, calculând tot ce se poate calcula algoritmic (luăm ca adevărată teza Turing-Church). Demonstrațiile sunt cel mai adesea, dacă nu totdeauna, constructive: se pleacă de la o mașină Turing sau de la un model echivalent (forme normale pentru gramaticile Chomsky, clase de gramatici cu restricții în derivare folosind reguli independente de context, mașini cu regiștri) și se construiește un sistem H echivalent sau un sistem P echivalent, în cadrul MC. Pornind demonstrația de la o mașină Turing (sau un model echivalent) universală, mecanismul de calcul inspirat din biologie va fi implicit universal, deci programabil. În teorie, totul este minunat. *In info*. La nivel practic, apar însă două probleme: implementarea efectivă, *in vitro*, a modelului teoretic, lucru deloc trivial, și întrebarea dacă un asemenea bio-calculator ar avea și o altă motivare decât dovedirea faptului că se poate calcula și astfel. Este el util, mai bun decât un calculator obișnuit, electronic, măcar dintr-un punct de vedere? Iar puncte de vedere sunt multe. Posibilitatea de a rezolva probleme de dificultate **NP** în timp polinomial este prima și cea mai atractivă dorință, dar mai sunt și altele: consumul de energie, posibilitatea de a învăța, de a evolua în timp, posibilitatea de a se repara singur, de a lucra cu date imprecise etc. Toate acestea sunt visuri greu de atins pentru informatica pe suport electronic, dar sunt realități curente în viața unei celule, în biologie în general. Punctez un singur aspect – paralelismul masiv, întâlnit la tot pasul în biologie. Electroniștii, chiar dacă nu ar egala paralelismul din biologie, ar putea pune alături un mare număr de procesoare, dar, pe de o parte, apar probleme cu încălzirea lor, pe de alta, cu sincronizarea, coordonarea lor. Intră în scenă așa-

numita complexitate de comunicare (*communication complexity*): numărul de biți necesari pentru coordonarea procesoarelor ajunge să concureze numărul de biți folosiți în calculul propriu-zis. Cum rezolvă natura aceste două probleme, nu știm precis. Cum să imităm soluțiile naturii, cu atât mai puțin.

6. Să revenim însă la operațiile de *simport* și *antiport*. Membranele care dau structura celulei sunt formate din așa-numite molecule fosfolipidice, care au un „cap” polarizat și o „coadă” nepolarizată, constând din doi acizi grași, hidrofobi. Plasate în apă, asemenea molecule se organizează spontan, formând o sferă cu două straturi, ferind acizii grași de contactul cu apa, opunând acesteia, în interiorul și exteriorul sferei, capetele polarizate. „Inamicul” comun și sarcina electrică țin laolaltă moleculele, într-o structură numită *mozaic fluid*, model atribuit lui Singer și Nicolson – abia în 1972 deplin conturat și acceptat. Moleculele se mișcă unele în raport cu celelalte, dar nu lasă să treacă printre ele nici moleculele mari, din cauza mărimii lor, și nici ionii, din cauza sarcinii lor electrice. Natura a rezolvat însă problema comunicării dintre interiorul și exteriorul unei vezicule astfel formate într-un mod foarte ingenios: printre moleculele fosfolipidice sunt intercalate proteine care funcționează ca niște canale transmembranare – important de menționat, selective. Canale pentru apă (acvaporinele acad. Gheorghe Benga, pentru care în 2003 a fost acordat și un Premiu Nobel, dar nu compatriotului nostru...), pompe sodiu-potasiu, sodiu-calciu etc.

Două tipuri speciale de asemenea canale sunt cele care realizează procesele pe care biologia le-au numit *simport* și *antiport*. În primul caz, două molecule, să le identificăm prin M1 și M2, nu pot trece separat prin canalul *simporter*, dar, împreună, pot, fie ieșind din, fie intrând în „reactorul” interior. În cazul al doilea, M1 și M2, aflate de o parte și de cealaltă a membranei, nu pot trece prin canalul proteic, o moleculă într-o direcție, cealaltă în direcția opusă, dar simultan pot s-o facă, proteina se deschide, pentru trecerea lor, apoi se închide la loc.

Avem în felul acesta un mod de „comunicare” între compartimentele unei celule – cu mențiunea că numesc aici *comunicare* trecerea de *obiecte* (molecule, la modul cel mai general) dintr-o parte în cealaltă a membranei. Plecând de la multiseturi de obiecte plasate în compartimentele unei celule și folosind reguli date de simport și antiport (perechi (M1, M2) asociate membranelor, cu specificarea direcției în care fiecare moleculă se deplasează), putem calcula – aplicăm iterat regulile, până ajungem la o configurație în care nicio regulă nu se mai poate aplica. Surprinzător la prima vedere, dar mai puțin la a doua, obținem din nou o caracterizare a puterii mașinii Turing. (Pentru că numărul obiectelor nu poate fi modificat prin regulile de simport/antiport, presupunem că mediul participă la calcul, ca furnizor nelimitat de obiecte.)

Calcul universal prin comunicare!, aici este surpriza. Calculăm, nu prin rescriere de șiruri sau de multiseturi, ci prin mutare de obiecte peste granițe definite de membrane. Ar avea rost să (încercăm să) construim un calculator bazat pe operațiile de simport și antiport? Nu ca putere de calcul (teza Turing-Church), poate că da, din punctul de vedere al eficienței (dacă reușim să implementăm un nivel semnificativ de paralelism), da, dintr-un punct de vedere mai puțin urmărit de tehnologia electronică, deși se referă la un detaliu important: consumul de energie, disiparea de căldură. În informatică se spune că disiparea de energie apare la *ștergerea* de informație. Rescrierea înseamnă mai întâi ștergere și apoi scriere. Operațiile de simport și antiport nu presupun ștergere, ci doar mutare, schimbare a locului. Vor elimina ele pierderea de energie din timpul unui calcul? E o ipoteză atrăgătoare (chiar dacă biologia ne avertizează că

multe canale proteice au nevoie de energie chimică obținută cu ajutorul ATP – adenozintrifosfat, „acumulatorul de energie al celulei”).

De ce, la o privire mai atentă, universalitatea calculului bazat pe operațiile de simport și antiport nu este, totuși, o mare surpriză? Ne ajută iarăși informatica teoretică, rezultate vechi din teoria limbajelor și automatelor. Există mai multe teoreme de caracterizare a limbajelor recunoscute de mașina Turing de felul următor: orice limbaj calculabil Turing se poate obține plecând de la un limbaj dependent de context (recunoscut de un automat liniar mărginit), aplicându-i o operație anume (un morfism, un cât la stânga/dreapta și altele). Sintetizând: dependență de context plus ștergere. Două caracteristici pe care operațiile de simport/antiport le au: faptul că două molecule evoluează împreună înseamnă dependență de context, iar prin „aruncarea” unor molecule în mediu sau prin „depozitarea” și ignorarea lor într-un colț al celulei, avem ștergere. Singura dificultate, pentru teoretician, este demonstrația, simularea unui mecanism de calcul echivalent cu mașina Turing cu ajutorul unor operații de simport și antiport relative la compartimentele unui aranjament celular de membrane. Există multe asemenea demonstrații în MC – *in info*, deci, și nicio implementare *in vivo* sau *in vitro*.

7. Rămânând aproape de biologie, să aruncăm o privire asupra modului în care comunică între ei neuronii, prin impulsuri electrice identice, *spike*-uri. Ca orice celulă, neuronul are un „corp” (*soma*), din care pleacă un „fir”, axonul, de-a lungul căruia circulă impulsuri electrice identice unul cu altul. Și pe corpul neuronului și la capătul axonului apar filamente, prin unirea cărora se realizează *sinapsele*, legăturile între neuroni. Ignorăm aici o mulțime de amănunte de arhitectură și funcționare (unele au fost prinse în modele de MC): axonul este înconjurat de un înveliș protector de mielină, este marcat-segmentat de așa-numitele noduri Ranvier, un fel de relele amplificatoare, sinapsele corespund unor operații de simport/antiport, există încă o clasă de celule, astrocitele, care ajută/controlază activitatea neuronilor, în funcție de traficul de *spike*-uri pe axoni și așa mai departe. Reținem doar că avem de a face cu un singur „obiect”, impulsul electric, și că fluxul de impulsuri, frecvența lor, distanța în timp între două impulsuri consecutive sunt foarte importante. Evident, funcționarea unui neuron, emisia de *spike*-uri, depinde de conținutul său. Abstractizând toate acestea, se poate defini un model de calcul de tipul următor: considerăm mai mulți neuroni, plasați în nodurile unui graf ale cărui arce reprezintă (axonii și) sinapsele. Pornim cu un număr de *spike*-uri plasate în fiecare neuron. Neuronii au și *reguli de spiking*: în funcție de conținut, un număr de *spike*-uri sunt consumate și un alt număr de *spike*-uri sunt produse și trimise tuturor neuronilor la care ajunge o sinapsă care pleacă din neuronul în care s-a aplicat regula. Se obține ceea ce s-a numit *sistem P neural (spiking neural P system* în engleză, sistem SNP pe scurt). În cei zece ani de la introducerea acestor sisteme, s-au publicat în jur de 300 de articole despre ele, de la teorie (putere și eficiență de calcul) la aplicații (în decizii ingineresti chiar, cu o combinație de mecanisme ca mai devreme și modele de raționament bazate pe logici fuzzy – subiectul este frecventat mai ales în China).

Ca în multe alte locuri în biocalculabilitate, și de data aceasta se obține fie o caracterizare a puterii de calcul a automatelor finite, fie a celei a mașinii Turing. Clasele intermediare de calculabilitate nu sunt „naturale” nici în acest cadru.

Dincolo de observația anterioară, alte două motive de mirare-uimire apar în acest context.

Primul ține de modul în care se codifică informația prin intermediul *spike*-urilor, în *distanța dintre două impulsuri consecutive*. Timpul ca suport de informație... Cam ca în alfabetul Morse, doar că acolo scopul este numai comunicarea de informație, aici avem de a face cu un calcul, ba chiar cu unul la nivelul mașinii Turing. Se poate folosi această observație pentru a

construi calculatoare? Dacă datele sunt codificate în timp, prin intervale, cum mai funcționează clasică tranzație spațiu-timp în acest cadru? Soluții polinomiale la probleme **NP**-grele se obțin, în teorie, dar și în experimentele din calculabilitatea pe bază de ADN, prin folosirea unui spațiu de lucru exponențial; aici, spațiul și timpul se „suprapun”, eficiența în timp pare compromisă.

Un al doilea motiv de mirare ține de un rezultat neașteptat, cel puțin la prima vedere, anume că există sisteme SNP universale în sensul definiției mașinii Turing universale, care au un număr relativ mic de neuroni, cel mult de ordinul sutelor (am obținut primul rezultat de acest tip împreună cu Andrei Păun). Rezultatul depinde mult de tipul regulilor de spiking pe care le folosim în neuroni, de numărul acestor reguli prezente în fiecare neuron în parte. Pe scurt, numărul de neuroni depinde de complexitatea lor, ceea ce e total de așteptat, dar faptul că putem obține un „calculator programabil”, universal, cu o sută și ceva de neuroni pare suspect, în raport cu miliardele de neuroni din creierul uman sau chiar cu ideea de calculabilitate algoritmică. Evident, creierul nu are ca obiectiv numai să calculeze ceea ce se poate calcula algoritmic (folosirea creierului ca model pentru calculatoare și folosirea metaforei calculatorului în studiul creierului sunt utile, dar cu limitări ușor de identificat), dar atingerea atât de rapidă a limitelor calculabilității nu este la fel de ușor de explicat. Sunt „neuronii” din teoria noastră prea complecși, prea puternici, sau, pe de altă parte, calculabilitatea Turing, algoritmică, nu este prea cuprinzătoare? Probabil că ambele ipoteze sunt adevărate. A doua presupunere este sprijinită și de numeroasele alte caracterizări ale calculabilității Turing în termeni bio-informatici, folosind modele simple ca formă sau dimensiune; prima ridică întrebarea cum să simplificăm neuronii încât să nu pierdem universalitatea, chiar dacă aceasta este obținută cu un număr mai mare de neuroni. Există în MC cercetări de acest tip.

**8.** Pe cât este de ușor să atingem, în calculabilitatea pe bază de ADN sau celulară, nivelul maxim de calculabilitate algoritmică/Turing, pe atât este de greu să trecem dincolo de „bariera Turing”. Obiectivul acesta îl are o ramură a informaticii numită *hipercalculabilitate*, cu publicații, conferințe, autori devotați, dar și cu contestatari și sceptici. Pe de o parte, se spune/speră că trecerea peste „bariera Turing” ar avea consecințe practice mai importante decât o eventuală demonstrație, fie ea și constructivă, a egalității  $P = NP$  (de altfel, puțin creditată ca fiind plauzibilă), pe de alta, până acum, ideile prin care se pot defini modele capabile de hipercalculabilitate nu sunt nici prea multe și nici prea realiste. Există în literatură cam o duzină de asemenea idei, dar Martin Davis le consideră pe toate *trucuri*, în sprijinul unui *mit*. De fapt, Turing însuși a propus o variantă a mașinii sale, capabilă să calculeze dincolo de puterea mașinii Turing, bazată pe chestionarea unui oracol (care poate eventual să răspundă la întrebări care depășesc competența mașinii Turing)! Multe alte idei se bazează pe introducerea infinitului, eventual a unui număr real în arhitectura sau în funcționarea mașinii. Cum numere reale sunt „mai multe decât numere calculabile” (ceva mai precis: mulțimea numerelor calculabile este numărabilă, cardinalul mulțimii numerelor reale este strict mai mare), necalculabilul este astfel introdus dinainte în model, deci nu este nicio realizare că modelul este mai puternic decât o mașină Turing.

La fel cu introducerea infinitului, cu o mențiune de interes pentru discuția noastră. Experimentul lui Adleman, de rezolvare a problemei existenței unui drum hamiltonian într-un graf, decurge în următorii pași mari: se generează *toate* drumurile din graf, apoi se elimină drumurile care nu trec prin exact atâtea noduri câte noduri are graful, apoi se elimină pe rând drumurile care nu trec prin nodul 1, nodul 2 etc. Ce rămâne, sunt molecule de ADN care codifică drumuri hamiltoniene. Dacă nu rămâne nicio moleculă, înseamnă că asemenea drumuri nu există.

La fel se procedează și în alte experimente – se pleacă adică de la o mulțime cuprinzătoare, din care se elimină treptat elemente care nu pot fi soluții. Altfel spus, nu se construiește o soluție, ci se elimină non-soluții. „Sculptură!” *Computing by carving!* În termeni de limbaje, plecăm de la o mulțime generală de șiruri, eventual limbajul total pentru un alfabet dat, și eliminăm repetat din ele. Eliminăm complementara limbajului pe care dorim să-l identificăm. Nu generare, ca în gramatici, nu acceptare, ca la automate, ci rejectare a șirurilor pe care nu le dorim. Familia limbajelor calculabile Turing nu este închisă la operația de luare a complementarei; prin „sculptare”, putem, deci, „calcula” limbaje care nu sunt calculabile Turing! Da, dar pentru asta trebuie să eliminăm o mulțime infinită de șiruri. Dacă la fiecare pas eliminăm o mulțime finită sau una care formează un limbaj regulat, într-un număr finit de pași nu ieșim din familia limbajelor regulate, ca urmare, fie există un pas la care eliminăm un limbaj complex, fie „calculul” durează o infinitate de pași. Hipercalculabilitate, dar, de acord cu Martin Davis, procedura nu arată ca un algoritm implementabil...

Interesant este însă că fizicienii nu resping ca total hazardate ipotezele hipercalculabilității. Iată un scenariu SF, din care fizicienii nu-l elimină pe S: să presupunem că timpul este doi-dimensional, chiar dacă noi, oamenii, îl percepem unidimensional; să presupunem că un utilizator uman folosește un calculator care, după un număr de pași făcuți de-a lungul unicei dimensiuni a timpului pe care utilizatorul o percepe, pornește perpendicular, calculează atât cât are nevoie pe această dimensiune ortogonală invizibilă utilizatorului, apoi revine și continuă pe dimensiunea „ceasului” utilizatorului. Indiferent cât a durat calculul în timp perpendicular, utilizatorul primește rezultatul într-un timp care pentru el este principial mai scurt.

Ne-am îndepărtat de biologie, să revenim la celulă. Natura creează membrane cu două scopuri principale: pentru a localiza reacțiile și reactanții (pentru a crea „reactoare protejate”) și pentru a crea reactoare de mici dimensiuni, în care reactanții să fie suficient de aproape, pentru a se întâlni, ajutați de mișcarea browniană, și reacționa. Mai mic înseamnă, deci, mai rapid. Să generalizăm și să exagerăm puțin, presupunând că într-o membrană interioară altei membrane biochimia funcționează de două ori mai repede decât în membrana de deasupra. Să creăm membrane în membrane, în mod repetat. (În MC există reguli de acest tip pentru schimbarea arhitecturii de membrane.) Reacțiile se accelerează exponențial înspre interior. Asta corespunde automatelor accelerate, de multă vreme studiate: primul pas de calcul se face într-o unitate de timp, al doilea într-o jumătate, fiecare pas care urmează, în jumătate din durata pasului dinaintea lui. În felul acesta, în două unități de timp exterioare automatului, se efectuează o infinitate de pași de calcul. Întregul calcul se termină în cel mult două unități de timp exterior (măsurate pe „ceasul utilizatorului”). Mașini de genul acesta, accelerate, pot rezolva probleme care depășesc puterea mașinii Turing (de pildă, problema opririi, pe care Turing însuși a dat-o ca exemplu de problemă nerezolvabilă algoritmic). Exact același lucru îl poate face un sistem P accelerat – rezultatul apare într-o lucrare scrisă împreună cu colegul Cristian Calude, din Noua Zeelandă. Motivare biologică, hipercalculabilitate, dar Martin Davis are iarăși dreptate: ierarhia de membrane trebuie să fie arbitrar de adâncă, pentru a asigura o accelerare arbitrar de puternică...

**9.** Să lăsăm *hipercalculabilitatea* și să ne ocupăm de... *fipercalculabilitate!* Termenul a apărut, ca un joc cu litere-cuvinte, înlocuind *h* cu *f*, de la *fast*, la începutul lui *hypercomputing*. Este principala așteptare de la bio-calculabilitate, pentru că este una dintre principalele „bariere” în fața calculatoarelor „de tip Turing-von Neumann”: imposibilitatea de a rezolva probleme **NP**-grele, ca să nu mai vorbim de cele cunoscute a fi și **NP**-complete (o problemă este **NP**-completă dacă orice problemă **NP**-grea se poate reduce la ea în timp polinomial; prin urmare, dacă o

problemă **NP**-completă s-ar putea rezolva în timp polinomial, atunci *toate* problemele **NP**-grele s-ar putea rezolva astfel, adică am avea **P = NP**).

Dar, cu exponențialele nu e de glumă... Iată un exemplu simplu, însă cu mare impact didactic: să presupunem că avem o problemă, de pildă, de teoria grafurilor, de complexitate exponențială, să zicem,  $3^n$ , să presupunem că pe calculatoarele existente putem rezolva problema pentru grafuri cu 100 de noduri și că tehnologia ne promite sau chiar ne oferă calculatoare de 1.000 de ori mai rapide. Un progres spectaculos, deloc ușor de realizat. O problemă care este rezolvată acum în 1.000 de secunde va fi rezolvată cu noua tehnologie într-o secundă. Dar, dacă acum putem rezolva în timp rezonabil probleme referitoare la grafuri cu 100 de noduri, cât de mari vor fi grafurile pe care le vom putea aborda cu noua tehnologie? Răspunsul este dezamăgitor – grafuri cu 106-107 noduri – pentru simplul motiv că  $3^7$  este mai mare decât 1.000. Un salt tehnologic semnificativ, care conduce la un progres derizoriu în ceea ce privește creșterea dimensiunii problemelor care ar putea fi rezolvate. Nu tehnologia poate face față complexității exponențiale, trebuie căutat altceva, principial nou. Paralelismul este o cale spre hipercalculabilitate, iar strategii de bază sunt două: folosirea încă de la început a unui spațiu de lucru exponențial (ca în experimentul lui Adleman) sau crearea unui asemenea spațiu în cursul calculului.

În MC, se urmează mai ales a doua strategie: folosind operații biologice, cum ar fi divizarea de membrane sau replicarea de șiruri, se creează un spațiu de lucru exponențial în timp liniar și, cu ajutorul acestui spațiu de lucru, se rezolvă în timp polinomial probleme **NP**-complete. Da, dar un număr exponențial de mare de obiecte se poate obține și fără operația de divizare a membranelor, de pildă, prin folosirea repetată, în mod paralel, a unor reguli de forma  $a \rightarrow aa$ , prin care  $a$  se rescrie, în termeni de multiseturi, prin  $aa$ . Plecând de la o copie a obiectului  $a$ , după  $n$  pași obținem  $2^n$  copii ale lui  $a$ . Cu totul interesant este faptul că acest mod de a obține un spațiu de lucru exponențial nu este suficient pentru a atinge eficiența dorită: așa-numita *Teoremă Milano*, demonstrată de Claudio Zandron în teza sa de doctorat (prima teză de doctorat din Europa susținută în MC, în 2001; prima din lume a fost prezentată, cu câteva luni mai devreme, în India), spune că un sistem P, chiar folosind reguli ca aceea sugerată mai devreme, poate fi simulată în timp polinomial de o mașină Turing, prin urmare, dacă sistemele P ar putea rezolva în timp polinomial probleme **NP**-complete, atunci și mașina Turing ar face acest lucru, ceea ce ar însemna că **P = NP**. Divizarea de membrane este, deci, necesară.

Din nou, apare aici un aspect subtil și surprinzător. Un număr exponențial de mare de obiecte, plasate într-o singură membrană, nu sunt suficiente pentru hipercalculabilitate, dar dacă separăm aceste obiecte în membrane diferite, tot exponențial de multe și acestea, saltul de eficiență este atins. Diferența o face localizarea, aplicarea de reguli diferite în membrane diferite. În felul acesta, apare un paralelism de o natură mai complexă, cu compartimente care evoluează în paralel, procesând fiecare, tot în paralel, obiectele proprii. Nu știu ca această diferență să mai fi apărut și în altă parte – oricum, nu în complexitatea clasică, unde paralelismul nu este prezent, pentru că modelul de lucru este mașina Turing, secvențială.

**10.** De altfel, teoria complexității calculului, în versiunea ei „clasică”, are multe „lacune” din punctul de vedere al bio-calculabilității. Revin la modul în care Adleman a rezolvat problema existenței drumurilor hamiltoniene: a plecat de la un graf dat, deci de la o *instanță* a problemei, a construit un „calculator” ad-hoc, din molecule de ADN direct dependente de grafurile date, eprubete și alte instrumente de laborator și a găsit soluția (în timp liniar, ca număr de operații biochimice, unele de un paralelism masiv). În teoria complexității o asemenea abordare nu este

permisă, trebuie plecat de la problema propriu-zisă, algoritmul-programul trebuie scris în timp polinomial, având ca parametri *mărimea* instanțelor, nu instanțele însele; în algoritmul-programul general (se spune *uniform*) se introduce apoi instanța de rezolvat. Ideea este de a nu introduce soluția unei instanțe particulare în algoritmul care pretinde că rezolvă problema, dar nu face altceva decât să furnizeze răspunsul. Chiar pentru un algoritm uniform, se limitează la un timp polinomial scrierea lui, pentru a nu lucra deja la rezolvarea problemei în timpul scrierii algoritmului care trebuie să rezolve problema. Nimic din acestea la Adleman și în multe dintre experimentele de calcul cu ADN prezentate după aceea.

La începuturile MC, s-a ales o cale de mijloc în lucrările care propuneau soluții polinomiale la probleme NP-complete: soluții nu neapărat uniforme, dar măcar oneste, plecând de la instanțe, dar cu algoritmul construit în timp polinomial. Au fost numite soluții *semi-uniforme*. Dar acum apar problemele: cum arată clasele de complexitate definite semi-uniform și, mai ales, cum se situează ele în raport cu clasele de complexitate clasice? Evident, clasele semi-uniforme sunt mai largi decât cele uniforme. Sunt ele strict mai largi? Interesant este că s-au obținut răspunsuri de ambele tipuri: coincidență sau incluziune strictă, depinzând de definiția claselor avute în vedere. Nu insist, lucrurile devin prea tehnice.

Numai că mai apar multe alte probleme.

Creierul (și ficatul, și alte organe sau țesuturi) are un număr imens de celule, nu toate funcționând în același timp (cel puțin așa se spunea acum o vreme). Când apare o solicitare, o problemă pentru creier, o substanță mai greu de procesat, pentru ficat, sunt mobilizate multe alte celule. Putem folosi o asemenea strategie în informatică, plecând de la resurse pre-calulate, de dimensiuni arbitrare, fără „prea multă” informație stocată, pentru a nu putea ascunde acolo soluția pre-calculată a problemei, activând apoi „calculatorul” pe măsura dificultății problemei de rezolvat? Ideea a fost urmată în contextul sistemelor SNP, unde divizarea de celule/neuroni nu pare a fi biologic prea justificată, dar este natural să plecăm de la o rețea arbitrar de largă de neuroni, dată dinainte, fără spike-uri în interior, introducem problema de rezolvat, codificată adecvat, într-un număr mic de neuroni, iar rețeaua se activează atât cât este necesar pentru rezolvarea problemei și ne furnizează rezultatul. Și aici lipsesc dezvoltările teoretice: când putem spune că resursele de plecare sunt pre-calulate onest, nu conțin prea multă informație, cum ar putea arăta clasele de complexitate aferente, cum se compară ele cu clasele existente? Poate și mai interesant: se poate folosi internetul ca resursă pre-calculată, de mărime arbitrară? Într-un anume sens, el este deja folosit – ca în proiectul SETI și, probabil, în altele.

Mai departe: algoritmi considerați în teoria complexității sunt determinați, ceea ce se întâmplă într-o eprubetă sau într-o celulă vie numai determinist nu este. Dar, rezultatul este fie „de încredere”, obținut cu o probabilitate apropiată de 1 (Adleman a folosit suficient de multe molecule de ADN pentru a fi „sigur” că *toate* drumurile din graf sunt generate în prima fază a experimentului), fie calculul, chiar nedeterminist desfășurându-se, este *confluent*, cu două variante: *confluent în sens tare*, adică, după o fază nedeterministă, calculul converge spre o configurație unică, de la care continuă determinist, fie *confluent în sens slab*, logic, adică, indiferent de calea aleasă nedeterminist, toate răspunsurile care pot fi obținute sunt identice. În MC, majoritatea soluțiilor au fost inițial semi-uniforme confluente (în sens tare sau slab), a urmat o perioadă a soluțiilor uniforme și confluente, ajungându-se în cele din urmă la soluții uniforme și deterministe. În orice caz, apare și aici o provocare pentru teoria complexității, clarificarea relației dintre clasele de complexitate definite folosind soluții nedeterministe, confluente (în cele două sensuri) și deterministe.



**11.** Toate acestea sunt provocări pentru teorie – nu lipsite însă de interpretări și de eventuale urmări practice. Să ne referim și la unele aspecte mult mai „terestre”, cel puțin în aparență. Să comparăm programele de calculator, așa cum le concepem de obicei, ca secvențe bine organizate de instrucțiuni, cu o ordine precisă a executării lor, eventual cu ordinea controlată prin etichete, salturi, instrucțiuni condiționale, cicluri. Cu totul altceva decât în desfășurarea „programelor” biochimice dintr-o celulă, unde sunt prezente molecule, sub formă de multiseturi, și care pot reacționa-evolua prin intermediul unor reacții *posibile*. În locul unei secvențe de instrucțiuni, avem de a face cu o *mulțime* de reacții, una neordonată, neorganizată în vreun fel, care se aplică „datelor” (moleculilor) în mod concurențial, o reacție posibilă în competiție cu alte reacții posibile în căutarea de molecule, cu mai multe reacții desfășurându-se simultan, dacă există suficienți reactanți și dacă sunt întrunite anumite condiții (temperatură, aciditate, salinitate, prezența unor catalizatori sau enzime promotoare, absența unor inhibitori etc.). Apar probabilități, coeficienți stoichiometrici, care prezic-controlează frecvența aplicării reacțiilor, în funcție de numărul reactanților și de condițiile de reacție, apare dependența de promotori-inhibitori, dar deloc precisă înlănțuire dintr-un program în Algol-Fortran-Pascal-Basic sau mai din zilele noastre. Într-un anumit sens, funcționarea unei celule este mai apropiată de funcționarea unei gramatici Chomsky decât de funcționarea unui automat, a unei mașini Turing, unde stările controlează ordinea instrucțiunilor folosite, până la identificarea unică, în cazul determinist. Se poate învăța ceva de aici, cel puțin interesant, dacă nu și util, pentru informatică?

La fel, într-un țesut sau organ, cu atât mai mult într-o populație de bacterii, apare un mod de funcționare „în comunitate”, care nu seamănă deloc cu funcționarea unei mulțimi de procesoare puse să lucreze în paralel. Paralelismul din biologie nu este total, procesele nu sunt perfect sincronizate, chiar dacă există „ceasuri” biologice destul de precise, alternanță zi-noapte și ciclul anotimpurilor. Bacteriologii încă nu înțeleg complet modul în care bacteriile realizează așa-numitul *quorum sensing*, comunicarea „tăcută”, premergătoare atingerii unui prag dincolo de care bacteriile devin agresive. Se vorbește în informatică despre calcul asincron, despre calculatoare amorfe, dar natura are pași serioși înainte în aceste direcții.

În încheiere, un alt aspect de tot interesul (practic): cine calculează în experimentul lui Adleman (și în multe altele similare), cine este calculatorul? Moleculele de ADN sau... Adleman însuși, biochimistul, omul? Fără intervenția omului, moleculele nu vor face ceea ce se așteaptă de la ele, nu vor face mai nimic. E adevărat, un sistem robotizat l-ar putea înlocui pe om. „Calculatorul” este, în acest context, un complex, un hibrid, așa cum este plauzibil să arate calculatorul viitorului.

**12.** Desigur, mai sunt și alte mirări-uimiri care ar merita menționate. La ADN nu am trecut de structura primară, nici la canalele proteice nu am amintit că *forma* joacă un rol foarte important, cuplarea potrivită între suprafețe este crucială în multe procese de simport/antiport. De altfel, se pot concepe calcule bazate pe potrivirea unor forme (*computing by shapes*), un fel de joc de puzzle cu anumite reguli și restricții, din nou universal, și care poate avea și „implementări” (pur teoretice deocamdată, de aici ghilimelele) în termeni de biochimia ADN-ului.

La fel, la nivelul creierului mai sunt multe de discutat. O ipoteză veche spune că există două părți ale creierului, una conștientă, controlabilă, și una sub/inconștientă; prima trimite probleme celei de a doua, a doua propune soluții, pe care cortexul le analizează și, dacă sunt satisfăcătoare, problema este rezolvată, dacă nu, este împinsă din nou spre partea subconștientă și așa mai departe. Avem un dialog între o componentă deterministă și una nedeterministă, ceva

iarăși inedit pentru informatică. Se poate măcar modela această presupusă funcționare a creierului, de pildă, în termeni de sisteme SNP? Are informatica ceva de învățat, eventual de folosit, de aici? (Să nu uităm că **NP** este clasa problemelor pentru care putem valida în timp polinomial o soluție propusă nedeterminist, fără a considera vreo durată pentru „ghicirea” soluției, prin urmare, un „bi-automat determinist/nedeterminist”, cu componenta nedeterministă lucrând în *no time*, ar putea fi de mare interes practic.)

Apropo de învățare: adaptarea, evoluția, învățarea sunt locuri comune în biologie, aproape absente din tehnologia hardware, dar cu învățarea, cel puțin, prezentă intim în *calculul neural*, ramură a bio-informaticii. Chiar dacă genul de învățare de aici pare reduționist, limitat la determinarea unor coeficienți numerici (ponderi) pe sinapse între „neuroni” de o formă foarte abstractă, abordarea se dovedește surprinzător de eficientă, însoțind rezultatele neașteptat de bune pe care un alt domeniu al bio-informaticii, calculul evolutiv, le are – fără a se putea sustrage teoremelor de tip *no free lunch*. Iar de curând, calculul neural a reușit un succes istoric: unul dintre cei mai buni jucători de GO din lume a fost învins, în martie 2016, de AlphaGO, un..., un... aici e o problemă, pentru că nu e un program, nu e un calculator (așa cum s-a întâmplat, cu exact 20 de ani în urmă, cu înfrângerea lui Kasparov la șah). De data aceasta, pe mii de calculatoare au fost memorate milioane de partide de GO ale unor jucători umani, un program bazat pe calcul neural a învățat din aceste partide, apoi și jucând cu sine însuși, și l-a învins pe campionul sud-coreean Lee Sedol, 9 dan. Isprava aparține unei echipe de la Google, detaliu semnificativ, pentru că este pus în lucru și un procedeu de căutare rapidă prin miile de calculatoare. Realizarea este remarcabilă, ținând seama că multă vreme s-a spus că GO-ul este provocarea ultimă pentru inteligența artificială. O barieră deja depășită. Mărturisesc că mă așteptam la un entuziasm mai mare în comunitatea informatică în urma acestui eveniment.

Evident, provocarea care urmează este extinderea strategiei folosite de AlphaGO la alte domenii și sunt convins că se lucrează la așa ceva.

Nu mai continui, sunt sigur că și cititorul are mirările-uimirile sale în fața biologiei și a relațiilor ei cu alte discipline, de la inginerie la informatică. În orice caz, progresele în această arie, a colaborării biologiei cu informatica mai ales, nu trebuie subestimate...

## Bibliografie

1. L.M. Adleman: Molecular computation of solutions to combinatorial problems. *Science*, 226 (Nov. 1994), 1021–1024.
2. B. Alberts, A. Johnson, J. Lewis, M. Raff, K. Roberts, P. Walter: *Molecular Biology of the Cell*. 4th Edition, Garland Science, New York, 2002.
3. P. Bottoni, G. Mauri, P. Mussio, Gh. Păun: Computing with shapes. *Journal of Visual Languages and Computing*, 12, 4 (2001), 601–626.
4. C. Calude, Gh. Păun: Bio-steps beyond Turing. *BioSystems*, 77 (2004), 175–194.
5. B.J. Copeland: Hypercomputation, *Minds and Machines*, 12, 4 (2002), 461–502.
6. M. Davis: The myth of hypercomputation. În *Alan Turing: Life and Legacy of a Great Thinker*, C. Teuscher, ed., Springer-Verlag, Heidelberg, 2003, 195–211.
7. J. Engelfriet, G. Rozenberg: Fixed point languages, equality languages, and representations of recursively enumerable languages. *Journal of the ACM*, 27 (1980), 499–518.
8. J. Gruska: *Quantum Computing*. McGraw-Hill, New York, 1999.
9. T. Head: Formal language theory and DNA: An analysis of the generative capacity of specific recombinant behaviors. *Bulletin of Mathematical Biology*, 49 (1987), 737–759.

10. T. Head, Gh. Păun, D. Pixton: Language theory and molecular genetics. Chapter 7 in vol. 2 of *Handbook of Formal Languages*, G. Rozenberg, A. Salomaa, eds., Springer-Verlag, Berlin, 1997, 295–360.
11. A.M. Ionescu, Gh. Păun, T. Yokomori: Spiking neural P systems. *Fundamenta Informaticae*, 71 (2006), 279–308.
12. T.-O. Ishdorj, A. Leporati: Uniform solutions to SAT and 3-SAT by spiking neural P systems with pre-computed resources. *Natural Computing*, 7, 4 (2008), 519–534.
13. V. Manca: On the logic and geometry of bilinear forms. *Fundamenta Informaticae*, 64 (2005), 261–273.
14. V. Manca: *Infobiotics. Information in Biotic Systems*. Springer-Verlag, Berlin, 2013.
15. S. Marcus: Linguistic structures and genetic devices in molecular genetics. *Cahiers de Linguistique Théorique et Appliquée*, 11, 2 (1974), 77–104.
16. L. Pan, T. Wu, Z. Zhang: A bibliography of spiking neural P systems, *Bulletin of IMCS*, 1 (June 2016), 63–78.
17. Ch.P. Papadimitriou: *Computational Complexity*. Addison-Wesley, Reading, Mass., 1994.
18. A. Păun, Gh. Păun: The power of communication: P systems with symport/antiport. *New Generation Computing*, 20, 3 (2002), 295–305.
19. A. Păun, Gh. Păun: Small universal spiking neural P systems. *BioSystems*, 90 (2007), 48–60.
20. Gh. Păun: On the splicing operation. *Discrete Applied Mathematics*, 70 (1996), 57–79.
21. Gh. Păun: Regular extended H systems are computationally universal. *Journal of Automata, Languages, and Combinatorics*, 1, 1 (1996), 27–36.
22. Gh. Păun: Computing by carving. *Soft Computing*, 3, 1 (1999), 30–36.
23. Gh. Păun: Computing with membranes. *Journal of Computer and Systems Sciences*, 61, 1 (2000), 108–143, și Turku Centre for Computer Science-TUCS Report No. 208 (1998).
24. Gh. Păun: P systems with active membranes: Attacking NP-complete problems. *Journal of Automata, Languages, and Combinatorics*, 6, 1 (2001), 75–90.
25. Gh. Păun: *Membrane Computing. An Introduction*. Springer-Verlag, Berlin, 2002.
26. Gh. Păun: Towards „fypercomputations” (in membrane computing). În *Languages Alive. Essays Dedicated to Jürgen Dassow on the Occasion of His 65 Birthday*, H. Bordihn, M. Kutrib, B. Truthe, eds., LNCS 7300, Springer-Verlag, Berlin, 2012, 207–221.
27. Gh. Păun: *Căutând calculatoare în celula biologică. După douăzeci de ani*. Discurs de Recepție în Academia Română, Ed. Academiei, București, 2014.
28. Gh. Păun, G. Rozenberg, A. Salomaa: *DNA Computing. New Computing Paradigms*. Springer-Verlag, Berlin, 1998.
29. Gh. Păun, G. Rozenberg, A. Salomaa, eds.: *The Oxford Handbook of Membrane Computing*. Oxford Univ. Press, 2010.
30. G. Rozenberg, A. Salomaa: Watson-Crick complementarity, universal computations and genetic engineering. *Technical Report 96–28*, Dept. of Computer Science, Leiden University, Oct. 1996.
31. G. Rozenberg, A. Salomaa, eds.: *Handbook of Formal Languages*, 3 vols., Springer-Verlag, Berlin, 1997.

32. A.M. Turing: On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem. *Proceedings of London Mathematical Society*, Ser. 2, 42 (1936), 230-265; with a correction, 43 (1936), 544–546.
33. C. Zandron: *A Model for Molecular Computing: Membrane Systems*. PhD Thesis, Università degli Studi di Milano, 2001.
34. G. Zhang, J. Cheng, T. Wang, X. Wang, J. Zhu: *Membrane Computing. Theory and Applications* (în chineză). Science Press, Beijing, 2015.
35. The website of membrane computing: <http://ppage.psystems.eu>.
36. The website of *Bulletin of IMCS* (International Membrane Computing Society): <http://membranecomputing.net/IMCSBulletin/>.



**Gheorghe PĂUN**

## CURRICULUM VITAE

Matematician-informatician, scriitor și animator cultural, redactor-șef al revistei *Curtea de la Argeș*. Membru corespondent al Academiei Române din 24 octombrie 1997, membru titular din 24 octombrie 2012. Discurs de recepție („Căutând calculatoare în celula biologică. După douăzeci de ani”) susținut pe 24 octombrie 2014. Membru al Academiei Europei (Academia Europaea, Londra), din 2006.

### Studii, funcții

- Născut la 6 decembrie 1950, în comuna Cicănești, județul Argeș, căsătorit, doi copii.
- Școala generală în comuna natală, Liceul „Vlaicu-Vodă” la Curtea de Argeș.
- Absolvent al Facultății de Matematică, Universitatea din București (5 ani, specializare în informatică), în 1974.
- Doctor în matematică în 1977 (sub conducerea profesorului Solomon Marcus), cu teza *Simularea unor procese economice cu ajutorul teoriei limbajelor formale*.
- Matematician la Centrul de Calcul CEPECA între 1974–1978; din 1978 până în 1987, cercetător la Colectivul de Studiul Sistemelor al Universității din București; din 1987 până în iunie 1990, analist la Centrul de Calcul al Universității din București; din decembrie 1990 până în august 1994 cercetător principal II, iar din august 1994 cercetător principal I la Institutul de Matematică al Academiei Române, București; în decembrie 2015 s-a pensionat.

### Activitate

- Domenii de cercetare: teoria limbajelor formale și teoria automatelor, sisteme de gramatici, calculabilitate pe bază de ADN, calcul membranal/celular (inițiatorul domeniului; sistemele de membrane sunt numite *P sisteme* și peste 500 de cercetători, din peste 25 de țări, au contribuții la acest domeniu), limbaje și gramatici *pattern*, combinatorică pe cuvinte, cercetări operaționale (decizii multicriteriale, agregarea indicatorilor), semiotică, inteligență artificială, lingvistică computațională.
- Cinci monografii de informatică teoretică publicate în limba română și șase în limba engleză, patru dintre ele în colaborare (la Springer-Verlag, 1989 și 1998, Gordon and Breach, 1994, Taylor and Francis, 2000), cea de a cincea la Kluwer Academic Publ., 1997, și a șasea la Springer-Verlag, 2002; editor și în multe cazuri co-autor a peste 60 de volume colective și

peste 30 de numere speciale de reviste; co-autor a cinci capitole în *Handbook of Formal Languages* (G. Rozenberg, A. Salomaa, eds.), Springer-Verlag, 1997; editor și (co)autor a cinci capitole în *Oxford Handbook of Membrane Computing* (Gh. Păun, G. Rozenberg, A. Salomaa, eds.), 2010.

- Peste 550 de articole (aproape 250 dintre ele fiind publicate în reviste indexate ISI) de informatică teoretică (în special teoria limbajelor formale, DNA computing, și membrane computing), publicate în reviste de specialitate (peste 35 dintre ele indexate ISI); unele dintre aceste articole sunt scrise în colaborare (în total, peste 100 de colaboratori, incluzând nume importante, precum A. Salomaa, G. Rozenberg, A. Ehrenfeucht, S. Marcus, J. Dassow, M. Novotny, E. Csuhaj-Varju, J. Kelemen, M. Ito, T. Yokomori, R. Freund, T. Head, G. Mauri, P. Mussio, F. Levaldi, V. Manca, M.J. Perez-Jimenez, A. Di Nola, N. Krasnogor, etc.)

- Peste 75 de rapoarte tehnice ale unor universități din Germania, Olanda, Spania, Franța, Noua Zeelandă, Finlanda, Slovacia, Cehia, Italia, Canada.

- Participare la proiectul *Goals, Processes, and Indicators of Developments* al Universității Națiunilor Unite, Tokyo (1978–1982), la proiectul *Economic Aspects of Human Development* al aceleiași universități (1982–1985), la proiectul *Mathematical Structures of Computer Science* al Academiei Finlandei (1994–1996), participare (începând din 1995) la proiectul *Models of Distributed Computability* al Academiei Ungare și (din 1996) la proiectul *Multi-agent Systems and Rough Set Theory Models* al Academiei Poloneze, membru fondator al EMCC (*European Molecular Computing Consortium*), 1999, coordonatorul echipelor române participante la acest consorțiu și la un Proiect NATO (alături de Franța, Canada, USA, Moldova), coordonatorul echipei române participante la proiectul *MolCoNet (Molecular Computing Network)*, finanțat de Comunitatea Europeană, 2001–2004 (alături de alte 11 țări din Europa), director al proiectului CNCSIS BioMAT al IMAR București (2006–2008), membru în echipele de cercetare ale mai multor proiecte spaniole (finanțate de guvernul central sau de guvernele locale, catalan sau andaluz) sau ale IMAR București.

### **Ecou internațional**

- Citat în peste 17.000 de lucrări cunoscute (în jur de jumătate dintre ele fiind publicate în reviste indexate ISI) ale unor autori români (peste 190 la număr) și străini (peste 1.700 la număr), mulți dintre ei fiind bine cunoscuți în informatica teoretică: Y. Matyiasevich, A. Salomaa, G. Rozenberg, A. Ehrenfeucht, M. Hagya, J. Kral, J. Berstel, J. Beauquier, B. Rozoy, J. Dassow, M. Novotny, R. Freund, P.R.J. Asveld, I.M. Havel, R. Siromoney, K.G. Subramanian, F. Urbanek, E. Csuhaj-Varju, J. Kelemen, A. Kelemenova, J. Hromkovic, M. Latteux, M. Clerbout, E. Makinen, N. Nirmal, H.C.M. Kleijn, Al. Meduna, CC. Squier, Z. Tuza, X.M. Nguyen, F.J. Brandenburg, J. Kari, V. Niemi, H. Fernau, J. Shallit, D. Watjen, A. Lepisto, A. Carpi, T. Harju, M. Jantzen, H. Bordihn, D. Raz, J. Honkala, T. Yokomori, G. Mauri, M. Katsura, V. Manca, K. Krithivasan, J. Reif, M. Margenstern, J. Goldstine, Y. Rogozhin, H. Tanaka, M. Conrad, S. Crespi Reghizzi, M.J. Perez-Jimenez, D. Wotschke, A. Obtulowicz, M. Holcombe, O. Ibarra, O. Ecegioglu, C. Teuscher, J. Karhumaki, L. Cardelli, E. Shapiro, J. Wiedermann, E. Moriya, C. Rossello, K. Ueda, S.G. Akl etc.

- Numeroase articole au avut un impact important. De pildă, lucrarea în care se introduce calculul membranar este citată în peste 2000 de locuri și a fost consemnată ca „fast breaking paper” de către ISI (Institute for Scientific Information, Philadelphia, SUA; a se vedea <http://esi-topics.com>, February 2003), iar în listele celor mai citate lucrări de informatică, întocmite periodic de același ISI, lucrarea a apărut de mai multe ori pe poziții între 100 și 200

(de regulă, listele conțin între 1.500 și 2.000 de lucrări); în octombrie 2003, o a doua lucrare din domeniul calculului cu membrane, scrisă în colaborare cu A. Păun, a fost consemnată de ISI ca „the citation leader in the category of Emergent Research Front in Computer Science: Membrane Computing”. Pentru trei lucrări despre calculul cu membrane, în 2005 a primit de la ISI scrisori cu următorul conținut: *Congratulations, G. Paun! Since 2000, you have been cited ... times for your article... This means that the number of citations your article received places it in the top 1% within its field according to „Essential Science Indicators”. Your work is highly influential, and is making a significant impact among your colleagues in your field of study. Congratulations on your extraordinary career accomplishment!*

- În martie 2007, în pagina web a ISI, la „Essential Science Indicators”, la rubrica „Highly cited papers (last 10 years)”, erau menționate 4 lucrări ale lui Gh. Păun. Pe această bază, în „Scientist rankings in computer science” autorul apărea pe poziția 83 (din 2.101 de informaticieni luați în seamă de ISI), cea mai înaltă poziție ocupată de un român, din țară sau din străinătate, din această listă; în lunile ulterioare Gh. Păun a fluctuat pe poziții între 60 și 80 în această listă.

- În februarie 2009, Gh. Păun a fost inclus de ISI în categoria **Highly Cited Scientists**, ceea ce înseamnă situarea între cei mai citați 0.5% dintre toți autorii de lucrări de informatică din lume (vezi <http://isihighlycited.com>); este singurul informatician român inclus în această categorie (și al doilea român în general, alături de un chimist).

- Cărți la care este autor sau coautor au fost traduse în japoneză, chineză și rusă.

### **Impact asupra domeniului**

- Co-fondator al teoriei sistemelor de gramatici, o ramură a teoriei limbajelor formale intens studiată în România, Ungaria, Germania, Slovacia, Finlanda, Olanda, Austria, USA, Polonia, Cehia, Spania, Japonia, Canada, Italia, Franța; co-inițiator al studiului secvențelor infinite auto-generate numite secvențe Păun-Salomaa; inventator al gramaticilor cu valențe, studiate în România, Germania, Spania; rezultate de bază privind universalitatea puterii de calcul a operației de *splicing*, specifică recombinării DNA-ului, și a altor operații implicate în calculabilitatea moleculară (sticking, insertion-deletion), autor sau co-autor a peste cincisprezece modele universale de calcul pe bază de ADN, printre care automatele Watson-Crick, sistemele „sticker” și cele de inserție-ștergere, studiate ulterior de cercetători din România, Ungaria, Cehia, Germania, Olanda, Italia, Japonia, Noua Zeelandă, Spania, Franța, Moldova, Grecia, inițiatorul abordării calculului „prin sculptare”, potrivit calculului cu ADN și care poate identifica limbaje care nu sunt calculabile Turing; contribuții fundamentale la studiul gramaticilor contextuale Marcus; o serie de extensiuni și variante introduse de Gh. Păun (uneori în colaborare cu cercetători din Vietnam, România, Olanda, Finlanda, Spania) sunt acum centrale în această arie.

- Inițiatorul calculului membranar, de inspirație biochimică (un nume mai potrivit este „calcul celular”), care a atras atenția a numeroși cercetători din România, Austria, Olanda, Germania, Finlanda, Japonia, Anglia, Canada, Ungaria, India, Italia, Spania, Cehia, SUA, Polonia, Franța, Moldova, China, Elveția, Australia, Noua Zeelandă, Filipine, Malaezia, Taiwan etc.; sistemele de membrane sunt curent numite *P sisteme*; există peste 3.000 de lucrări în acest domeniu (în jur de 60 de volume colective, peste 85 de teze de doctorat), cu peste 500 de (co)autori, iar la Viena există și o pagină web dedicată P sistemelor, <http://ppage.psystems.eu>; doctorate în domeniu au fost susținute la Madras, Milano, Viena, Leiden, London-Ontario, Madrid, Tarragona, Sevilla, Tokyo, București, Iași, Pitești,

Sheffield, Palma de Mallorca, Auckland, Wuhan, Chengdu, Budapesta, Jena, Chişinău, Opava etc. Anual au loc **trei întâlniri internaționale** dedicate P sistemelor, Conference on Membrane Computing (din 2000 până în 2009, Workshop on Membrane Computing și Brainstorming Week on Membrane Computing (din 2003), iar din 2012 se organizează anual și Asian Conference on Membrane Computing. Mai multe alte conferințe au calculul cu membrane indicat explicit în domeniul lor de interes.

În 2016 a fost înființată **International Membrane Computing Society**, IMCS, cu sediul în China; Gh. Păun este președinte de onoare al IMCS (și editorul *Bulletin of IMCS*, <http://membranecomputing.net/IMCSBulletin/>).

### **Formare de școli**

- Inițiatorul unei adevărate școli europene de computabilitate pe bază de ADN, mulți cercetători din România (V. Mitrana, L. Ilie, V. Mihalache, Al. Mateescu), Ungaria (E. Csuhaj-Varju, G. Vaszil), Austria (R. Freund, F. Freund, M. Oswald), Spania (C. Martin-Vide, A. Rodriguez-Paton), Olanda (G. Rozenberg, H.J. Hoogeboom, N. van Vugt), Finlanda (A. Salomaa) realizând primele lor lucrări în acest domeniu în colaborare cu Gh. Păun sau sub influența sa; cercetători din Italia, India, Japonia, Canada, USA, Finlanda, Spania, Noua Zeelandă, Franța, Germania, Moldova etc. lucrează nemijlocit asupra unor modele de calculabilitate moleculară (co)inventate de Gh. Păun.

- Numeroase teze de master și de doctorat au fost susținute în multe țări asupra gramaticilor contextuale, sistemelor de gramatici, calculabilității moleculare, continuând idei și probleme lansate de Gh. Păun.

- De unele dintre problemele formulate de Gh. Păun s-au ocupat autori bine-cunoscuți, ca: J. Berstel, L. Boasson, J. Beauquier, B. Rozoy, P.R.J. Asveld, F. Urbanek, J. Dassow, M. Latteux, M. Clerbout, C.C. Squier, Z. Tuza, J. Cassaigne, S. Schwer, P. Seebold, E. Makinen, F.J. Brandenburg, A. Lepisto, A. Carpi, J. Kari, V. Niemi, D. Hauschildt, M. Jantzen, D. Raz, D. Pixton, G. Mauri, Cl. Ferretti, K. Khritivasan, R. Freund, M. Margenstern, Y. Rogozhin, H.J. Hoogeboom, A. Obtulowicz etc., precum și mai mulți români.

- Coordonator al mai multor lucrări de diplomă, îndrumare în cercetare a mai multor studenți și tineri informaticieni, colaborare cu mulți doctoranzi și cercetători, formatorul unei școli românești de limbaje formale cu afirmare internațională. Mai mulți doctoranzi de la Universitatea din Sevilla, Spania (Matteo Cavaliere, Agustin Riscos-Nunez, Tseren Onolt-Isdorj) au primit, în trei ani consecutivi, premiul pentru cea mai bună teză de doctorat în informatică realizată la Sevilla în anul respectiv.

- Membru referent în comisii de doctorat sau de promovare universitară în România, Ungaria, Finlanda, Slovacia, Austria, Spania, Noua Zeelandă, Olanda, Republica Moldova.

### **Recunoaștere internațională**

- Invitații (repetate) la universități și institute de cercetare din Ungaria, Cehia, Slovacia, Germania, Finlanda, Franța, Japonia, Olanda, Austria, Spania, USA, Canada, Polonia, Italia, Grecia, China etc., încheiate cu colaborări fructuoase cu cercetători locali.

- Peste 120 de conferințe invitate la universități din Magdeburg, Frankfurt, Hamburg, Tubingen (Germania), Budapesta, Gyor (Ungaria), Brno, Praga, Opava (Cehia), Bratislava (Slovacia), Tarragona, Barcelona, Madrid, Sevilla (Spania), Turku, Laapeenranta (Finlanda), Leiden (Olanda), Kyoto, Tokyo-Chiba, Tokyo-Waseda, Tokyo-Dendai, Hiroshima



(Japonia), Paris, Lille (Franța), London (Ontario, Canada), Varșovia (Polonia), Greenville NC, Binghamton (USA), Milano, Roma, Brescia, Pisa, L'Aquila, Siena, Palermo, Verona (Italia), Xanthi (Grecia); profesor invitat la Universitatea Tehnică din Viena (Austria), Centrul de Informatică din Turku (Finlanda), Universitatea Rovira i Virgili din Tarragona (Spania) și Universitatea Politehnică din Madrid (Spania), Centrul Banach al Academiei Poloneze de Științe (Polonia), Singapore și Malaezia, Academia Ungară, universități din Wuhan, Beijing, Chengdu (China) etc.

- Bursă Humboldt, între 1 mai 1992 și 31 iulie 1993, la Universitatea din Magdeburg, Germania, cu continuare în iulie-august 1999; numeroase burse de cercetare în Franța, Finlanda, Spania, Olanda; bursă Ramon y Cajal (2001-2006), începută la Tarragona și continuată la Sevilla, Spania; liderul unui proiect de excelență „cu cercetător de valoare recunoscută internațional”, finanțat de Guvernul Andaluz, la Sevilla, Spania (2009-2014).

- Membru al comitetelor de program a peste 120 de conferințe internaționale, organizator al simpoziunilor *Artificial Life: Grammatical Models* (Mangalia, 1994), *Molecular Computing* (Mangalia, 1997), primele întâlniri din Europa dedicate acestor subiecte, *Multiset Processing* (Curtea de Argeș, 2000), *Membrane Computing* (Curtea de Argeș 2001, 2002, 2009, Tarragona 2003, Milano 2004, Viena 2005, Leiden 2006, Salonic 2007, Edinburgh 2008, Jena 2010, Fontainebleau 2011, Budapesta 2012, Chișinău 2013, Praga 2014, Valencia 2015, Milano 2016); inițiatorul și organizatorul principal al seriei *Brainstorming Week on Membrane Computing* (Tarragona 2003, Sevilla 2004–2016); membru al comitetului de inițiativă (steering committee) al conferințelor *Developments in Language Theory*, *Universal Machines and Computations* și *DNA Based Computing*, al workshopurilor *Grammar Systems* și *Descriptive Complexity in Formal Systems*.

- Participare cu comunicări la peste 120 de întâlniri internaționale, dintre care jumătate au fost conferințe plene sau invitate (invited speaker).

**Membru (uneori, pentru diferite perioade) în colectivul de redacție al revistelor:** Seria Matematică-Informatică a *Analelor Universității din București*; Seria Matematică-Informatică a *Analelor Universității Al.I. Cuza din Iași*; Seria Matematică-Informatică a *Analelor Universității din Oradea*; *Journal of Universal Computer Science* (Springer-Verlag) – revistă cotate ISI; *Journal of Computing and Informatics*, fostă *Computers and Artificial Intelligence*, Academia Slovacă, Bratislava; *Acta Cybernetica*, Universitatea din Szeged, Ungaria; *Journal of Automata, Languages, and Combinatorics*, Universitatea din Magdeburg, Germania; *Grammars*, Kluwer Academic Publishing; *Fundamenta Informaticae*, Academia Poloneză, Varșovia – cotate ISI; *Romanian Journal of Information Science and Technology*, Academia Română („executiv editor” din 1998 până în 2003) – revistă cotate ISI; *Computer Science Journal of Moldova*, Academia Moldovei, Chișinău; *International Journal of Foundations of Computer Science* (World Scientific) – cotate ISI; *International Journal of Computer Mathematics* (Gordon and Breach) – asociat editor 2002-2005 – cotate ISI; *Natural Computing. An International Journal* (Springer-Verlag) – cotate ISI; *Soft Computing* (Springer) – Area editor (DNA and membrane computing) – cotate ISI; *BioSystems* (Elsevier) – cotate ISI; *Theoretical Computer Science. Natural Computing Series* (Elsevier) – cotate ISI; *International Journal of Unconventional Computing*; *New Generation Computing* (Springer și Omsha-Japonia) – cotate ISI; *Progress in Natural Science* (Elsevier and Science in China Press) – cotate ISI; *Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research* (ASE București); *International Journal of Computers, Communication, and Control*, Univ. Oradea – cotate ISI.

### **Premii, titluri, membru al unor organizații profesionale**

- Premiul „Gheorghe Lazăr”, al Academiei Române, în anul 1983.
- Nominalizat pentru Premiul de Excelență în Cultura Românească, ediția I, 1999.
- Membru, pentru diferite perioade, al Societății Americane de Matematică, al Societății Române de Matematică și al Societății Române de Informatică.
- Din 1991, membru al Consiliului de conducere al Asociației Europene de Informatică Teoretică (EATCS), reales în 1994, 1997 și 2000.
- Invitat pentru a deveni membru al IEEE-USA și al AAAS (American Association for the Advancement of Science)-USA.
- Doctor Honoris Causa și membru de onoare al Academiei Internaționale de Informatizare de pe lângă ONU, filiala Chișinău, din 1998.
- Honorary visiting professor al HUST (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan, China, din 2005.
- Doctor Honoris Causa al Universității Sileziene din Opava, Cehia, din 2008.
- Membru al Academiei Europei (Academia Europaea, [www.acadeuro.org](http://www.acadeuro.org)) din aprilie 2006.
- Membru al International Academy of Mathematical Chemistry, din 2010.
- Doctor Honoris Causa al Universității din Pitești, din 2010.
- Premiul anual de informatică „Gr.C. Moisil” al ASE București (2009).
- Premiul „Gr.C. Moisil” acordat de Marea Lojă Națională a României (2011).
- Oscarul Românesc de Excelență, Secțiunea Știință, acordat de Fundația pentru Tineret și Episcopia Alexandria (2012)
- Doctor Honoris Causa al Universității Agora din Oradea, din 2015.
- Honorary professor al universității Xihua, din Chengdu, China, din 2016.
- Ordinul National „Steaua României” în grad de Cavaler, 1 Decembrie 2016.
- Mai multe premii ale unor reviste sau instituții de cultură din România.
- Cetățean de onoare al orașului Curtea de Argeș (în 1999), cetățean de onoare al Județului Argeș (în 2007), cetățean de onoare al comunei Cicănești (în 2009).
- În decembrie 2000 a apărut la Editura Kluwer (Dordrecht, Boston, London) volumul *Where Mathematics, Computer Science, Linguistics, and Biology Meet* (C. Martin-Vide, V. Mitrana, eds), cu subtitlul *Essays in Honour of Gheorghe Păun*, conținând 39 de lucrări, de 75 de autori de pe toate continentele; în 2002 a apărut la Editura Taylor and Francis, Londra, volumul *Grammars and Automata for String Processing: From Mathematics and Computer Science to Biology, and Back* (C. Martin-Vide, V. Mitrana, eds.), care îi este, de asemenea, dedicat (volumul conține 40 de lucrări, de 69 de autori). În 2010, cu ocazia celei de-a 60-a aniversări a zilei de naștere, i s-au dedicat două numere speciale de reviste (*International Journal of Foundations of Computer Science*, 272 de pagini, 22 de lucrări, 72 de autori, și *Computer Science Journal of Moldova*, 170 de pagini, 6 lucrări, 16 autori), precum și volumul *Computation, Cooperation, and Life. Essays Dedicated to Gheorghe Păun on the Occasion of His 60th Birthday*, editat de J. Kelemen și A. Kelemenova, apărut în seria *Lecture Notes in Computer Science* (nr. 6610) a Editurii Springer, Germania (218 pagini, 16 lucrări, 32 de autori). În 2015 a apărut la Editura Spandugino, București, volumul *Multidisciplinary Creativity. Homage to Gheorghe Păun on His 65th Birthday* (M. Gheorghe, I. Petre, M.J. Perez-Jimenez, G. Rozenberg, A. Salomaa, eds.; 334 pagini, 32 de lucrări, 84 de autori).

### **Activitate culturală**

- Începând din 1980, bogată activitate publicistică, rubrici în mai multe reviste (*Știință și Tehnică*, *Viața Studențească*, *Flacăra-REBUS*, *Preuniversitaria*); șase cărți de cultură științifică („popularizare”); jocuri matematice, jocuri logice în general (mai multe cărți în domeniu). Co-coordonator al seriei *Biblioteca Ludică*, la Editura Tehnică, București (1999–2001).

- Începând cu decembrie 1982, a introdus în România jocul GO; a avut primele rubrici, a scris primul manual, s-a ocupat de producerea de jocuri, a înființat primele cluburi și cercuri de GO din țară (cu excepția unui cerc care a funcționat la Timișoara, de prin anii '50 ai secolului trecut); președinte al Federației Române de GO între 1990 și 1992.

- Ca scriitor, a debutat în *Știință și Tehnică* și *SLAST*, la începutul anilor '80, iar editorial în 1984, cu volumul de povestiri *Sfera paralelă*, Ed. Albatros. Peste 35 de povestiri publicate în periodice între 1981 și 1989. Este membru al Uniunii Scriitorilor din România din 1990 (recomandări de la Alex Ștefănescu, Tudor Octavian și acad. Solomon Marcus).

- Pe lângă mai multele cărți publicate în țară (trei volume de povestiri, cinci romane, patru volume de poezie, volume de eseuri, memorii, prezentare de carte, epigrame), i-au fost traduse cărți în engleză și maghiară (romanul *O mie nouă sute nouăzeci și patru*), italiană (romanul *Lotta*), franceză și spaniolă (poeme). Povestiri i-au fost traduse în engleză, maghiară, bulgară.

- Fondator și organizator al Clubului Iubitorilor de Cultură din Curtea de Argeș (din decembrie 2005), cu activitate lunară, cu invitați din țară și străinătate (artiști plastici, scriitori, filosofi, muzicieni); a editat anual *Cronica* acestui club.

- Au scris despre activitatea literară a lui Gh. Păun: Solomon Marcus, Cornel Robu, Mihai Coman, Alexandru Mironov, Victor Niță, Voicu Bugariu, Mircea M. Tomuș, Tudor Octavian, Liviu Hotinceanu, Alexandru Boiu, Voicu A. David, Ion Hobana, Ioan T. Morar, George Arion, Victoria Milescu, Paul Schweiger, Maria Diana Popescu, Augustin Doman, Al. Th. Ionescu, Alex Ștefănescu, Marin Ioniță, Mona Vâlceanu, Denisa Popescu, Florian Copcea, Florentin Popescu, Vasile Ghițescu, George Baci, Elisaveta Novac, Ion C. Ștefan, Victor Sterom, Györfi-Deák György, M. Neagoe, Paula Romanescu, Dinu Mirea, Virgil Șerbu Cisteianu, Petru Pistol, Aureliu Goci, Lina Codreanu, Maria Vaida etc.

- Mai multe premii, diplome, distincții literar-culturale (revista *Argeș*, consfătuiri naționale SF, instituții culturale, simpozioane).

- Senior-editor al ziarului *Argeș Expres* din Curtea de Argeș ([www.argesexpres.ro](http://www.argesexpres.ro)), unde a susținut mai multe rubrici („Lumea văzută de un matematician” și „Cărți și autori” – săptămânal, „Ghimpe de veghe” – zilnic); din ianuarie 2013 a demarat rubrica săptămânală „Vedere de pe Dealul Olarilor”.

- Din decembrie 2010 conduce ca redactor-șef revista de cultură *Curtea de la Argeș* (tipărită, dar și disponibilă la adresa web [www.curteadelaarges.ro](http://www.curteadelaarges.ro)), la care semnează nume mari ale culturii românești, din țară și din lume (aproape lunar, și din Chișinău).

### **Monografii originale de informatică (teoretică)**

1. *Mecanisme generative ale proceselor economice*, Editura Tehnică, București, 1980.

2. *Gramatici matriciale*, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1981.

3. *Gramatici contextuale*, Editura Academiei, București, 1982.
4. *Probleme actuale în teoria limbajelor formale*, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1984.
5. *Paradoxurile clasamentelor*, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1987.
6. (în colaborare cu J. Dassow, Germania) *Regulated Rewriting in Formal Language Theory*, Akademie-Verlag, Berlin, 1989, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1989.
7. (în colaborare cu E. Csuhaj-Varju, Ungaria; J. Dassow, Germania; J. Kelemen, Cehoslovacia) *Grammar Systems. A Grammatical Approach to Distribution and Cooperation*, Gordon and Breach, seria *Topics in Computer Mathematics*, London, 1994.
8. *Marcus Contextual Grammars*, Kluwer, Boston, Dordrecht, London, 1997.
9. (în colaborare cu G. Rozenberg, A. Salomaa) *DNA Computing. New Computing Paradigms*, Springer-Verlag, Heidelberg, 1998, Springer-Verlag, Tokyo, 1999 (traducere în japoneză), Mir, Moscova, 2004 (traducere în rusă), Tsinghua Univ. Press, Beijing, 2004 (traducere în chineză).
10. (în colaborare cu C. Calude) *Computing with Cells and Atoms. An Introduction to Quantum, DNA and Membrane Computing*, Francis and Taylor, London, 2000.
11. *Membrane Computing. An Introduction*, Springer-Verlag, Berlin, 2002 (tradusă în chineză în 2012).

#### **Cărți de cultură științifică**

1. (în colaborare cu C. Calude) *Modelul matematic – instrument și punct de vedere*, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1982.
2. *Din spectacolul matematicii*, Editura Albatros, București, 1983.
3. *Între matematică și jocuri*, Editura Albatros, București, 1986; reeditată sub titlul *Jocuri și matematică*, vol. I, la Editura Tehnică, București, 2000.
4. *Matematica? Un spectacol!*, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1988.
5. *Jocuri și matematică*, vol. II, Editura Tehnică, București, 2000.
6. *Jocuri și matematică*, vol. III, Ed. Tehnică, București, 2001.

#### **Cărți literare**

1. *Sfera paralelă*, Editura Albatros, București, 1984 (povestiri).
2. *Generoasele cercuri*, Editura Albatros, București, 1989 (povestiri).
3. *O mie nouă sute nouăzeci și patru*, Editura Ecce Homo, București, 1993 (roman; traducere în engleză, *Nineteen Ninety-Four, or The Changeless Change*, Minerva Press, Londra, 1997, și în maghiară, *1994. Avagy a változás, amely nem változtat semmit*, Ed. Pont Kiado, Budapesta, 2008).
4. *Oglinzi mișcătoare*, Editura Scripta, București, 1994 (roman).
5. *Hotel Anghila*, Editura Scripta, București, 1994 (roman).
6. *Nemiloasele cercuri*, Editura Meșterul Manole, Curtea de Argeș, 2004 (povestiri, selecție din *Sfera paralelă* și *Generoasele cercuri*).
7. *Lotta*, Editura Paralela 45, Pitești, 2005 (roman; traducere în italiană în 2013).
8. *Ultima saună*, Editura Dacpress, Curtea de Argeș, 2006 (roman).
9. *Inscripții pe un bilet de tren*, Editura Fundației Orient-Occident, București, 2007 (poeme în proză).
10. *Teama de toamnă*, Editura Tiparg, Pitești, 2009 (versuri).
11. *De-a viața*, Editura Tiparg, Pitești, 2009 (versuri).

12. *Haina arlechinului/L'habit de l'arlequin*, Editura Tiparg, Pitești, 2009 (volum bilingv, româno-francez, selecție din volumele anterioare și traducere de Paula Romanescu).
14. *Guadalquiviria*, Editura Vergiliu, București, 2009 (versuri, volum bilingv, româno-spaniol, cu traducerea în limba spaniolă de Maria Calleya).
15. *Lumea văzută de un matematician*, Editura Arefeana, București, 2009 (eseuri).
16. *Privind peste umăr. Memorii premature*, Editura Tiparg, Pitești, 2010.
17. *Cactus de veghe*, Editura Tiparg, Pitești, 2011 (epigrame, împreună cu caricaturi de Cucu Ureche).
18. *Cărți și autori*, Editura Tiparg, Pitești, 2012 (cronici de carte).
19. *De trecere și petrecere*, Editura Tiparg, Pitești, 2013 (versuri).
20. *Vedere de pe Dealul Olarilor*, Editura Ars Docendi, București, 2014 (tablete critic-umoristice).
21. *Cactus de veghe II*, Editura Tiparg, Pitești, 2014 (epigrame, împreună cu caricaturi de Cucu Ureche).
22. *Vedere de pe Dealul Olarilor II*, Ed. Ars Docendi, București, 2016 (tablete critic-umoristice).
23. *Cactus de veghe III*, Editura Tiparg, Pitești, 2016 (epigrame, împreună cu caricaturi de Cucu Ureche).

#### **Cărți de jocuri logice:**

1. *Inițiere în GO*, Recoop, București, 1985 (ediția a doua – 1986, ediția a treia – 1988, ediția a patra, la Editura Tehnică, București – 2000).
2. *Soluții pentru 50 de jocuri logice solitare*, Recoop, București, 1987 (ediția a doua – 1989).
3. *250 de probleme de GO*, Recoop, București, 1987 (ediția a doua – 1989).
4. *Cartea jocurilor* (coordonator și coautor), Recoop, București, 1988.
5. *Jocuri logice competitive*, Editura Sport-Turism, București, 1989.
6. (în colaborare cu I. Diamandi) *40 de jocuri în BASIC*, Recoop, București, 1993.
7. *Teoria chibritului. 234,5 probleme logico-distractive*, Editura Tehnică, București, 1999.
8. *Logică distractivă. 256 de probleme*, Editura Tehnică, București, 2000.
9. *Jocuri cu cărți*, Editura Tehnică, București, 2000.
10. *Printre frații mai mici ai GO-ului. Cinci-în-rând, GO-Moku, Renju, Pente*, Ed. Limes, Cluj-Napoca, 2010.

#### **Cărți (de informatică-matematică) editate**

1. *Mathematical Aspects of Natural and Formal Languages*, World Scientific Publishing, Singapore, 1994 (492 + x pagini).
2. *Mathematical Linguistics and Related Topics*, Editura Academiei Române, București, 1995 (364 + xii pagini).
3. *Artificial Life: Grammatical Models*, The Black Sea University Press, București, 1995 (276 + xii pagini).
4. (cu A. Salomaa) *New Trends in Formal Languages: Control, Cooperation, Combinatorics*, Lecture Notes in Computer Science 1218, Springer-Verlag, Berlin, 1997 (466

+ x pagini).

5. *Computing with Bio-Molecules. Theory and Experiments*, Springer-Verlag, Singapore, 1998 (358 + x pagini).

6. (cu A. Salomaa) *Grammatical Models of Multi-Agent Systems*, Gordon and Breach, London, 1999 (372 + xii pagini).

7. (cu J. Karhumaki, H.A. Maurer, G. Rozenberg) *Jewels are Forever*, Springer-Verlag, Berlin, 1999 (380 + xxx pagini).

8. (cu G. Ciobanu) *Foundamentals of Computing Theory '99*, Proceedings of the FCT Conf., Iași, 1999, *Lecture Notes in Computer Science*, 1684, Springer-Verlag, Berlin, 1999 (570 + x pagini).

9. (cu C. Calude) *Finite versus Infinite. Contributions to an Eternal Dilemma*, Springer-Verlag, London, 2000 (374 + x pagini).

10. (cu C. Calude, M.J. Dinneen) *Pre-proceedings of Workshop on Multiset Processing*, Curtea de Argeș, Romania, August 2000, TR 140, CDMTCS, Univ. Auckland, New Zealand, 2000 (320 de pagini).

11. (cu C. Martin-Vide) *Recent Topics in Mathematical and Computational Linguistics*, Ed. Academiei, București, 2000 (342 + x pagini).

12. (cu G. Rozenberg, A. Salomaa) *Current Trends in Theoretical Computer Science. Entering the 21st Century*, World Scientific, Singapore, 2001 (870 + x pagini).

13. (cu C. Martin-Vide) *Pre-proceedings of Workshop on Membrane Computing*, Curtea de Argeș, Romania, August 2001, TR 16/01, Univ. Rovira i Virgili, Tarragona, Spania, 2001 (266 pagini).

14. (cu C.S. Calude, G. Rozenberg, A. Salomaa), *Multiset Processing. Mathematical, Computer Science, Molecular Computing Points of View, Lecture Notes in Computer Science* 2235, Springer-Verlag, Berlin, 2001 (360 + viii pagini).

15. (cu M. Ito, S. Yu) *Words, Semigroups, Transductions (Festschrift in Honour of Gabriel Thierrin)*, World Scientific, Singapore, 2001 (444 + xii pagini).

16. (cu D. Dascălu, E. Pincovschi, Vl. Țopa, V. Voicu) *Micro and Nanostructures*, Ed. Academiei, București, 2001 (242 de pagini).

17. (cu C. Zandron) *Pre-proceedings of Workshop on Membrane Computing*, Curtea de Argeș, Romania, August 2002, MolCoNet Publication No 1, 2002 (394 de pagini).

18. (cu G. Rozenberg, A. Salomaa, C. Zandron) *Membrane Computing. International Workshop, WMC 2002, Curtea de Argeș, Romania, August 2002. Revised Papers, Lecture Notes in Computer Science* 2597, Springer-Verlag, Berlin, 2003 (437 de pagini).

19. (cu M. Cavaliere, C. Martin-Vide) *Proceedings of the Brainstorming Week on Membrane Computing; Tarragona, February 2003*, Technical Report 26/03, Rovira i Virgili University, Tarragona, 2003 (254 de pagini).

20. (cu C. Martin-Vide, V. Mitrană) *Formal Language Theory and Applications*, Springer-Verlag, Berlin, 2004 (620 + xii pagini).

21. (cu A. Alhazov, C. Martin-Vide), *Pre-proceedings of Workshop on Membrane Computing*, WMC 2003, Tarragona, Spain, July 2003, Technical Report 28/03, Rovira i Virgili University, Tarragona, 2003 (472 de pagini).

22. (cu N. Jonoska, G. Rozenberg) *Aspects of Molecular Computing. Essays Dedicated to Tom Head on the Occasion of His 70th Birthday*, LNCS 2950, Springer-Verlag, Berlin, 2004 (390 + x pagini).

23. (cu G. Rozenberg, A. Salomaa) *Current Trends in Theoretical Computer Science*.

*The Challenge of the New Century*, Vol. I *Algorithms and Complexity* (664 + xii pagini), Vol. II *Formal Models and Semantics* (628 + xii pagini), World Scientific, Singapore, 2004.

24. (cu C. Martin-Vide, G. Mauri, G. Rozenberg, A. Salomaa) *Membrane Computing, International Workshop, WMC 2003, Tarragona, July 2003, Selected Papers*, LNCS 2933, Springer-Verlag, Berlin, 2004 (382 + x pagini)

25. (cu A. Riscos-Nunez, A. Romero-Jimenez, F. Sancho-Caparrini) *Proceedings of the Second Brainstorming Week on Membrane Computing, Sevilla, February 2004*, Technical Report 01/04 of Research Group on Natural Computing, Sevilla University, Spain, 2004 (456 de pagini).

26. (cu J. Karhumaki, H. Maurer, G. Rozenberg) *Theory is Forever. Essays Dedicated to Arto Salomaa, on the Occasion of His 70th Birthday*, LNCS 3113, Springer-Verlag, Berlin, 2004 282 + x pages).

27. (cu G. Mauri, C. Zandron) *Pre-proceedings of Fifth Workshop on Membrane Computing, WMC5, Milano, 2004* (444 + viii pagini).

28. (cu G. Mauri, M.J. Perez-Jimenez, G. Rozenberg, A. Salomaa) *Membrane Computing, International Workshop, WMC5, Milano, Italy, 2004, Selected Papers*, LNCS 3365, Springer-Verlag, Berlin, 2005 (417 + viii pagini).

29. (cu G. Ciobanu, M.J. Perez-Jimenez) *Applications of Membrane Computing*, Springer-Verlag, Berlin, 2006 (442 + x pagini).

30. (cu M.A. Gutierrez-Naranjo, M.J. Perez-Jimenez) *Cellular Computing. Complexity Aspects*, Fenix Editora, Sevilla, 2005 (296 + viii pagini).

31. (cu R. Freund, G. Lojka, M. Oswald) *Proceedings of Sixth International Workshop on Membrane Computing, WMC6, Vienna, July 18–21, 2005* (540 de pagini).

32. (cu G. Ciobanu) *Pre-proceedings of Workshop on Theory and Applications of P Systems, TAPS'05, Timișoara, Septembrie 26-27, 2005* (98 de pagini).

33. (cu C.S. Calude, M.J. Dinneen, M.J. Perez-Jimenez, G. Rozenberg) *Unconventional Computation. 4th International Conference, UC2005, Sevilla, Spain, October 2005. Proceedings*, LNCS 3699, Springer-Verlag, Berlin, 2005 (268 + xii pagini; ISBN 3-540-29100-8, 77 de autori).

34. (cu R. Freund, G. Rozenberg, A. Salomaa) *Membrane Computing, International Workshop, WMC6, Vienna, Austria, 2005, Selected and Invited Papers*, LNCS 3850, Springer-Verlag, Berlin, 2006 (372 + x pagini; 45 autori).

35. (cu M.A. Gutierrez-Naranjo et al.) *Proceedings of the Fourth Brainstorming Week on Membrane Computing, Sevilla, 2006, 2 volume*, Fenix Editora, Sevilla, 2006 (283 + xii, respectiv, 279 + xii pagini).

36. (cu C.S. Calude, M.J. Dinneen, G. Rozenberg, S. Stepney) *Unconventional Computation. 5th International Conference, UC2006, York, UK, September 2006. Proceedings*, LNCS 4135, Springer-Verlag, Berlin, 2006 (268 + x pagini).

37. (cu H.J. Hoogeboom, G. Rozenberg) *Workshop on Membrane Computing, WMC7, Leiden, July 17-21, 2006* (538 + x pagini).

38. (cu L. Pan) *Pre-proceedings of the International Conference Bio-Inspired Computing – Theory and Applications, BIC-TA 2006 Volume of Membrane Computing Section, Wuhan, China, September 18–22, 2006* (176 de pagini).

39. (cu H.J. Hoogeboom, G. Rozenberg, A. Salomaa) *Membrane Computing, International Workshop, WMC7, Leiden, The Netherlands, 2006, Selected and Invited Papers*, LNCS 4361, Springer-Verlag, Berlin, 2007 (556 + x pagini).

40. (cu M.A. Gutierrez-Naranjo et al.) *Proceedings of the Fifth Brainstorming Week on Membrane Computing*, Sevilla, 2007, Fenix Editora, Sevilla, 2007 (326 + x pagini).
41. (cu G. Eleftherakis, P. Kefalas) *Proceedings of Eight Workshop on Membrane Computing*, Thessaloniki, June 2007 (590 + xii pages).
42. (cu G. Eleftherakis, P. Kefalas, G. Rozenberg, A. Salomaa) *Membrane Computing, International Workshop, WMC8, Thessaloniki, Greece, 2007, Selected and Invited Papers*, LNCS 4860, Springer-Verlag, Berlin, 2007 (454 + xii pagini).
43. (cu M.A. Gutierrez-Naranjo et al.) *Proceedings of the Sixth Brainstorming Week on Membrane Computing*, Sevilla, 2008, Fenix Editora, Sevilla, 2008 (x + 300 pagini).
44. (cu D. Corne, P. Frisco, G. Rozenberg, A. Salomaa) *Membrane Computing, International Workshop, WMC9, Edinburgh, UK, Selected and Invited Papers*, LNCS 5391, Springer-Verlag, Berlin, 2008 (404 + x pagini).
45. (cu R. Gutierrez-Escudero et al.) *Proceedings of the Seventh Brainstorming Week on Membrane Computing*, Sevilla, 2009, 2 volume, Fenix Editora, Sevilla, 2009 (248 + x, respectiv, 254 + x pagini).
46. (cu M.J. Perez-Jimenez, A. Riscos-Nunez) *Pre-proceedings of Tenth Workshop on Membrane Computing, WMC10, Curtea de Argeş, August 2009* (566 + xii pagini).
47. (cu M.J. Perez-Jimenez, A. Riscos-Nunez, G. Rozenberg, A. Salomaa) *Membrane Computing, Tenth International Workshop, WMC 2009, Curtea de Argeş Romania, August 2009, Selected and Invited Papers*, LNCS 5957, Springer-Verlag, Berlin, 2009 (488 + x pagini).
48. (cu G. Rozenberg, A. Salomaa) *The Oxford Handbook of Membrane Computing*, Oxford University Press, 2010 (672 + xviii pages).
49. (cu M.A. Gutierrez-Naranjo et al.) *Proceedings of the Eighth Brainstorming Week on Membrane Computing*, Sevilla, 2010, Fenix Editora, Sevilla, 2010 (342 + xiv pagini).
50. (cu M. Gheorghe, T. Hinze) *Pre-proceedings of the 11th Conference on Membrane Computing, CMC11, Jena, Germania, 2010* (468 + xvi pagini).
51. (cu M. Gheorghe, T. Hinze, G. Rozenberg, A. Salomaa) *Membrane Computing. 11th International Conference, CMC11, Jena, Germany, August 24-27, 2010. Revised, Selected, and Invited Papers*, LNCS 6501, Springer-Verlag, Berlin, 2010 (394 + x pagini).
52. (cu M.A. Martinez-del-Amor, I. Perez-Hurtado, F.J. Romero-Campero, L. Valencia-Cabrera) *Proceedings of the Ninth Brainstorming Week on Membrane Computing*, Sevilla, 2011, Fenix Editora, Sevilla, 2011 (374 + xiv pagini).
53. (cu M. Gheorghe, S. Verlan) *Pre-proceedings of Twelfth International Conference on Membrane Computing, CMC12, Fontainebleau, Paris, August 2011* (510 + vi pagini).
54. (cu M. Gheorghe, G. Rozenberg, A. Salomaa, S. Verlan) *Membrane Computing. 12th International Conference, CMC12, Fontainebleau, France, August 2011. Revised, Selected, Invited Papers*, LNCS 7184, Springer-Verlag, Berlin, 2012 (372 + x pagini).
55. (cu M.A. Martinez-del-Amor et al.) *Proceedings of the Tenth Brainstorming Week on Membrane Computing*, Sevilla, 2012, 2 volume, Fenix Editora, Sevilla, 2012 (322 + xii, respectiv, 302 + xii pagini).
56. (cu L. Valencia-Cabrera et al.) *Proceedings of the Eleventh Brainstorming Week on Membrane Computing*, Sevilla, 2013, Fenix Editora, Sevilla, 2013 (274 + x).
57. (cu L. Pan, M.J. Perez-Jimenez, T. Song) *Proceedings of the 9th International Symposium BIC-TA 2014, Wuhan, China, Comm. in Computer and Information Sciences*, vol. 472, Springer, 2014.



58. (cu G. Rozenberg, A. Salomaa) *Discrete Mathematics and Computer Science*, Ed. Academiei, București, 2014 (308 pagini; 48 de autori).

59. (cu L.F. Macias-Ramos et al.) *Proceedings of the Twelfth Brainstorming Week on Membrane Computing*, Sevilla, 2014, Fenix Editora, Sevilla, 2014 (x + 352 pagini; 44 de autori).

60. (cu L.F. Macias-Ramos et al.) *Proceedings of the 13th Brainstorming Week on Membrane Computing*, Sevilla, 2015, Fenix Editora, Sevilla, 2015.

### **Numere speciale de reviste editate**

1. *International Journal of Computer Mathematics*, vol. 17, nr. 1 (1985).
2. *Analele Universității București. Seria Matematică-Informatică*, vol. 47, nr. 2 (1998).
3. (cu D. Dascălu) *Romanian Journal of Information Science and Technology*, vol. 1, nr. 4 (1998).
4. *Romanian Journal of Information Science and Technology*, vol. 5, nr. 2-3 (2002).
5. (cu R. Freivalds, J. Hromkovic) *Theoretical Computer Science*, vol. 264, nr. 1 (2001).
6. (cu T. Yokomori) *Soft Computing*, vol. 5, nr. 2 (2001).
7. *Fundamenta Informaticae*, vol. 49, nr. 1-3 (2002).
8. *Romanian Journal of Information Science and Technology*, vol. 6, nr. 1-2 (2003).
9. (cu C. Martin-Vide) *Natural Computing*, vol. 2, nr. 3 (2003).
10. (cu M.J. Perez-Jimenez) *Journal of Universal Computer Science*, vol. 10, nr. 5 (2004).
11. (cu N. Jonoska) *New Generation Computing*, vol. 22, nr. 4 (2004).
12. (cu M.J. Perez-Jimenez) *Soft Computing*, vol. 9, nr. 9 (2005).
13. (cu C. Calude, G. Rozenberg) *Fundamenta Informaticae*, vol. 64, nr. 1-4 (2005).
14. (cu M.J. Perez-Jimenez) *International Journal of Foundations of Computer Science*, vol. 17, nr. 4 (2006).
15. (cu G. Rozenberg, A. Salomaa) *Fundamenta Informaticae*, vol. 73, nr. 1-2 (2006).
16. (cu M.J. Perez-Jimenez) *Journal of Automata, Languages and Combinatorics*, vol. 11, nr. 3 (2006).
17. (cu M.J. Perez-Jimenez) *Theoretical Computer Science*, 372, 2-3 (2007).
18. (cu L. Pan) *Progress in Natural Sciences*, vol. 17, nr. 7 (2007).
19. (cu E. Csuhaj-Varju, G. Vaszil) *Fundamenta Informaticae*, vol. 76, nr. 3 (2007).
20. (cu J. Kelemen) *Computers and Informatics*, vol. 27 (2008).
21. (cu M. Ionescu, T. Yokomori) *Natural Computing*, vol. 7, nr. 4 (2008).
22. (cu M.J. Perez-Jimenez) *Fundamenta Informaticae*, vol. 87, nr. 1 (2008).
23. (cu M.J. Perez-Jimenez) *International Journal of Unconventional Computing*, vol. 5, nr. 5 (2009).
24. (cu G. Mauri, A. Riscos-Nunez) *International Journal of Computers, Communication and Control*, vol. 4, nr. 3 (2009).
25. (cu M.J. Perez-Jimenez, Gh. Ștefănescu) *Journal of Logic and Algebraic Programming*, vol. 79, nr. 6 (2010)
26. (cu M.J. Perez-Jimenez) *Romanian Journal of Information Science and Technology*, vol. 13, nr. 2 (2010).
27. (cu R. Barbuti, G. Franco) *Natural Computing*, vol. 10, nr. 1 (2011).
28. (cu P. Frisco, M.J. Perez-Jimenez) *International Journal of Natural Computing Research (IJNCR)*, vol. 2, nr. 2-3 (2011).

29. (cu Atulya Nagar) *Natural Computing*, vol. 12, nr. ?? (2012).
30. (cu M.J. Perez-Jimenez) *International Journal of Computer Mathematics*, vol. 90, nr. 4 (2013).
31. (cu M. Gheorghe, M.J. Perez-Jimenez) *International Journal of Unconventional Computing*, vol. 9, nr. 5-6 (2013).
32. (cu M. Gheorghe, G. Zhang) *Romanian Journal of Information Science and Technology*, vol. 17, nr. 1 (2014).
33. (cu M. Gheorghe, A. Riscos-Nunez, G. Rozenberg) *Fundamenta Informaticae*, vol. 134, nr. 1-2 (2014).
34. (cu S. Cojocaru, M. Margenstern, S. Verlan) *Fundamenta Informaticae*, vol. 138, no. 1-2 (2015).