

Nanotechnológia – az átalakulások tudománya

BEVEZETŐ GONDOLATOK

Gyulai József

az MTA rendes tagja, MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutató Intézet
gyulai@mfa.kfki.hu

A *homo faber* új játékot fedezett fel. Hogy új-e az új, azt igyekszünk majd jelen összeállításunkban megmagyarázni, mert előzmények nélküli „új” ritkán születik. Idősebb emberként gyakran tapasztalom, hogy új néven, de új és a mai eszközeink szintjén „revizitálunk”, újralátogatunk egy sor olyan jelenséget, amely ugyan ismert volt, de korábban nem látott vagy tudományos fantasztikumként kezelt aspektusai most merülnek fel és kapnak új jelentőséget. Amiről itt beszélünk, az is ilyen: koncepcióváltás, amely talán először sok vitát kavart, de végül sokakat meggyőzött – a finanszírozókat is –, hogy ezen a nyomvonalon sok gyémánt akad. A nanotudomány alapgondolata nagyon messze nyúlik vissza: Erwin Schrödinger *What is Life?* (1944) című dolgozata, James Watson és Francis Crick DNS-modellje (1953) már közelített a gondolatvilághoz. A legkonkrétabb váteszi megfogalmazás Richard Feynmantól származik, aki az 1959. december 29-i előadását az American Physical Society közgyűlésén *There Is Plenty of Room at the Bottom* címmel tartotta, amelyben megjósolta az egyre kisebb, önmagukat építő gépek lehetőségét – az egyes atomok mozgása, rendezése határáig. A nagy gyakorlati lépést Gerd Binnig és Heinrich Rohrer

alagútmikroszkópja (scanning tunneling microscope, STM, 1981), annak variánsai, az erőmérő AFM (Atomic Force Microscope), a mágneses teret vagy az elektromos kapacitást mikrométerekben detektáló rendszerek megjelenése jelentette. Ezekkel egy időben született Feynman kiváló *Quantum Mechanical Computers* (1986) dolgozata. Mérföldkő a szén módosulatainak, a fulleréneknek, a nanocsöveknek felfedezése is (Richard Smalley, 1985, illetve Sumio Iijima, 1991). Az USA kongresszusa szavazott meg elsőként nagy összegű támogatást (*National Nanotechnology Initiative*, 2001) és az Európai Unió a 6. keretprogramban emelte a témát az egyik fő prioritássá. Hazánkban is többen pályáztak sikerrel a témában mind az OTKA, mind az NKFP keretében, mind az EU 5. és 6. keretprogram keretében – így e szám szerzői is.

Az egyébként önmagában is nagyszerű, ha a létrejött újat több tudományág is sajátjának tekinti. Kedvelt hasonlatom, hogy a kémianak a XX. század közepe táján bekövetkezett paradigmaváltása a fizika, a kvantummechanika eredményeinek beolvasztása révén jött létre. Szívesen citálom a *Cantata Profana* Balázs Béla-i pozitív „konfliktusát”: a szarvassá változott fiúk nem fének

be apjuk kapuján. A fizikustársadalom tagjaként örülnünk kell annak, hogy a mai kémia ezt az így létrejött diszciplínát tekinti „modern kémiának”. A tudományos anyanyelveket meghatározó tudományoknak – ilyen a matematika, az alkalmazott matematika, a fizika – missziója is, hogy transzszubsztanciálódjanak (bocsánat a profanizációért...).

És most jött el az ideje annak, hogy ez az alapvető természettörvényekre támaszkodó kémia és a fizika együttesen oldódjék fel az élettudományokban, majd az orvosi tudományban.

A fizika és az anyagok tudománya felől, a műszaki tudományok által is megérintett társszerkesztőként szeretném, ha átsütne az összeállításon, hogy az élettudományok is érettek erre a *paradigmaváltásra*, mégpedig két ok következtében is.

Az egyik ezek közül egyértelmű, és kikövezi az utat a másodiknak: a fizika illetve a kémia jelenségorientált kutatásainak új felfedezései – a kapcsolódó, kongeniális műszaki kutatások, fejlesztések révén, valamint a számítástechnikai robbanás által megtámogatva – olyan mérési módszerbeli palettabővülést, érzékenység-, felbontóképeség-növekedést, valamint az idő- és képi felbontás olyan tökéletesedését hozták és tették elérhetővé (akár vásárolható berendezések képében), amelyek alapvetően és megkerülhetetlenül hozzájárulnak e paradigmaváltáshoz. Az emberi génállomány feltérképezéséről, a Genom projektről¹ csak álmodni lehetett volna, ha a félvezető chipgyártás, illetve a molekuláris biológia eszköztárát szinergizáló bio-

chiptechnológia² és a kriptográfia (titkosítás és -fejtés tudománya) nem válik elidegeníthetetlen, kongeniális részévé az élettudományok által kitűzött feladatnak. Elmosódnak a tudományok határai, illetőleg olyan átjárandó határokat fedezünk fel, amelyeknél a partnerek „szomszéd” voltára korábban nem is gondoltunk.

A másik ok inkább ismeretelméleti, de nem kevésbé fontos elem. A gondolat abban a beszédmódban gyökerezik, amely az élettudományokban – ma teljesen érthetően – megszokott és elterjedt. Rendszeresen hallunk arról, hogy egy élőlény „alkalmazkodik” a környezethez, és ez biztosítja a fennmaradását (illetve a használt kifejezéssel: a „jobb” egyed marad meg és adja tovább a génállományát). Hogy egy falósejt észleli a „behatólót”, és harc képtelenné teszi – az „élete árán” is. Hogy a bonyolult szervezetekben – mondhatjuk – föderális, sőt konföderális formában élnek (?) együtt a szerveink, annak elemei, valamint szimbiotikus és nélkülözhetetlen szolgálaink vagy parazitászerű vendégeink –

² A kongeniális segédeszköznek, a biochipnek az a lényege, hogy – a félvezető áramkörök gyártására kitalált eljárásokkal – egy üveglapkán mozaikot alakítunk ki olyan anyagból, amelyre a molekuláris biológia eszköztárából ismert anyagok olyan molekuláit „fixálhatjuk”, amelyek csak bizonyos aminosavakkal, fehérjékkel képesek kapcsolódni (műszaki nomenklatúránkkal: ezek „fehérjespecifikus detektorok”). Az így elkészült „biochipe” rácsseppentjük a „húsleves”, és az egyes detektorok megkötik a nekik megfelelő fehérjetörmelékeket. Ultraibolya fényel megvilágítva a chipet, annak az egyes DNS-szekvenciákkal kapcsolódott elemei egy fénylő rajzolatot adva fényt bocsátanak ki (lumineszkálnak). Mivel az egyes szenzorokat tudatos rendben helyeztük el a chipen, a fénylő kép az aminosavak sorrendjére jellemző. A sikerhez a chipeknek az a fő tulajdonsága is kellett, hogy egyszerre sok száz, sőt sok ezer DNS-törmelékben határozzák meg az aminosavak sorrendjét. A módszer szempontjából – a beképzeltség látszatát is elfogadva – a *Genom projekt* csak egy volt a lehetőségek közül, mert a koncepció átvihető sok-sok anyagra (például „proteomikává” fejleszthető), amelyek például a gyógyszerkutatást felgyorsítva, forradalmasítják azt.

¹ A *Genom program* lényege a következő: (a *Time* kissé profanizáló zsumalisztája szerint: „konyhai mixerrel”) „húsleves” csináltak az emberi DNS-ből, majd a már mindössze tíz-húsz aminosavat tartalmazó törmelékben a biochip segítségével meghatározták az aminosavak sorrendjét. És itt jött a kulcsötlet, miszerint a – védelmi célra folyamatosan fejlesztett – titkosításfejtés, a *kriptográfia* segítségével, a dominójáték mintájára próbálgatták, hogy hogyan lehet e törmelékeket egymás végébe visszailleszteni.

felvetve akár a kérdést: „*En vajon hány vagyok?*”. Tudjuk, hogy ez a beszédmód, az „alkalmazkodás” csak fedőneve valami olyannak, amit még gyakran hiányolnunk kell az élettudományokból. A földi életet – mai tudásunk, azaz minden valószínűség szerint kizárólag – az elektromos kölcsönhatások mozgatják, amelyre minden atomi-molekuláris folyamat visszavezethető, csak a rendszer elemeinek óriási száma minőségleg új megnyilvánulásokhoz vezet. A fizikus, a kémikus, az anyagtudós is használ fedőneveket akkor, amikor már visszavezette a jelenségek mozgatórugóit az alapvető természettörvényekre. Így valóban egy folyamat – diffúzió, fázisátalakulás, stb. – termodinamikai elvekre utaló hajtóerejéről, a *driving force*-ról beszél. Ez az alapkérdés az élettelen világ folyamatainak kutatásában, és jól tervezett kísérletekkel általában meg is válaszolható – gyakran már a mai tudásunkkal is.

Hogy mire is gondolok?

A biológia történetei fantasztikusak és azért lebilincselők, élvezhetőek a nem-szakemberek számára is, mert antropomorf gondolkodással fűszerezettek. Példával. Keletkezik, termelődik a szervezetünkben valami – a „hőstünk”, például egy fehérje, amelynek „feladata” (*sic!*) a szervezetben építő funkciót betöltő fehérjemolekulák megjavítása. Hogyan is történik mindez? A mechanizmus értelmében ez a stresszfehérje

1. odaúszik a megjavítandó fehérjéhez (miért?),
2. érzékeli annak hibás voltát (hogyan?),
3. észleli a töltésállapotot (de mivel?),
4. megtalálja a hibát (hogyan?),
5. megjavítja (itt is sok izgalmas fizikai-kémiai esemény zajlik le).
6. „Hőstünk” feltehetőleg belepusztul mind-ebbe.

A fenti, fantasztikusan érdekes eseménysor hajtóerejét a mai gondolkodási keretben

nem tudom másnak nevezni, mint valami-féle „misszióknak”, vagy tréfásan és végletesen, éppen „csintalanságnak”? Mi másért megy oda a másikhoz, miért nem hagyja azt békében? Milyen energetikai, elektromosan töltött vagy éppen kisült állapotban van, hogy egy kis energiacsere „vágjik”? Nyilván nincs tudata. Mit nyer, illetve veszít ő ezzel?

Mi tehát ezen antropomorfizmusok értelme, oka – a fizikában, kémiában? Mi az a „készítés”, ami látszólag logikátlan eseményekben csúcsonyul ki és tartja fenn az Életet? Holott tudjuk és – meggyőződésünk szerint – azonosítjuk, vagy megnyilvánulásként vesszük tudomásul, hogy nem lehet másról szó, mint a Coulomb-kölcsönhatásról, illetve annak olyan manifesztációiról, mint a van der Waals-erők, a hidrogénkötés, a di- és multipólus-kölcsönhatások, stb. rendkívül bonyolult játékról. A „csintalanság”-típusú fogalmak semmiképpen sem lehetnek „lineárisak”, mert a linearitás leírásába nem fér, hogy egy (kvantummechanikai) rendszer működésbe jöjjön azért, hogy kimozdítson egy másik rendszert annak metastabil állapotából.

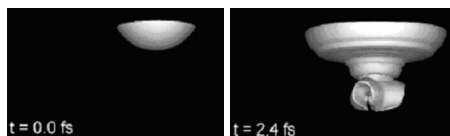
Vagy más területekről. Tudott dolog, hogy az atomi mozgásokat, átrendeződéseket – ezeket nevezzük fizikai, kémiai reakcióknak – a hő gyorsítja (Arrhenius törvénye). Mi a fizika, kémia válasza arra, hogy egyes tengeri élőlények a hideg tengervíz „szeretik”, vagy az emlősök hím reprodukciós szerve nem lehet a hőstabilizált szervezet belsejében? Vagy egy kertembeli rejtély: a „sövényképző” gyertyánbokraim preferáltan egymás felé nőnek. A fajtárs anyagcseretermékei vonzzák-e, vagy annak azonos színe láttatja „üres”, betölthető térnek a másikat, vagy netán a létért való küzdelem „ellenséges” szándékú kiszorítási kísérlete manifesztálódik?

Én valahol azt a szintézist várom, amely feleslegessé vagy éppen megalapozottá

teszi az antropomorfizmusokat – és boldog lennék, ha hátralévő életembe beleérme annak megszületése, feltehetőleg csak a leg-egyszerűbb rendszerekre – sok-sok zseniális, multidiszciplináris gondolkodású kolléga tevékenysége vagy akár csak víziója révén. Ma, szintén a számítástechnika eredményeinek alkalmazásával, már olyan problémákat is vissza tudunk vezetni első elvekre, amelyekre korábban nem gondolhattunk. Biró László Péter barátom belefoglalhatta volna a cikkébe a kiváló informatikus, Márk Géza munkatársunkkal közös eredményünket, amely *ab initio* kvantummechanikai alapokból kiindulva, az elektronok folyamának mozgóképeként mutatja be egy nanocső pásztázó mikroszkópos vizsgálatát³ (1. ábra).

Semmiképp sem állítjuk, hogy a mai biológia problémáinak illetően visszavezetése közeli lehetőség, de ha a lehetőségek a címlapproblémák mögött kullognak is, a felzárkózás nagy érdek. A mély megismerés képes csak az elharmarkodott alkalmazások csapdától megóvni, illetve a továbblépéshez ötletet adni.

Most, e *Bevezető* írása közben fogalmazódott meg bennem, mint – születésem óta – „homo faber”-ben az, hogy mi vonz, annak kezdeteitől fogva, a nanotechnológiához. Úgy érzem ugyanis, hogy ez az a tudományág, amelynek gondolkodásmódja közelebb tud vinni a kívánt megértéshez, vagy – egyszerűen, a jövőben – akár a megoldás kulcsát is képes megadni. A nanotechnológia általam értett lényegéből fakad, hogy ellessük az élő „természettől” a *driving force* fizikai lényegét. Először modellkísérletekben reprodukáljuk, például pásztázó szondás eljárásainkkal,



1. ábra • Pásztázó alagútmikroszkópos (STM) vizsgálat során a „tű” a felső korong egy (elágazó) szén nanocsövön szétterjedő elektronhullámnak „első elvekre” visszavezetett számításos folyamata. A felső ábra a „tű” modelljét, az alsó ábra az elektronátugrás kezdetétől számítva a 2,4 fs (1 femtoszekundum = 10^{-12} s) eltelte utáni állapotot mutatja, amikor is a hullám már a csövön terjed. A teljes folyamat mozgóképen is megtekinthető a <http://www.mfa.kfki.hu/honlapon>, a Laboratories, Nanostructures, Animation könyvtárakat választva.

amikor akár egyetlen atomot megfogva és tudatos helyre helyezve azt, létrehozunk egy funkciót, amely nem létezhetett egy „evolúciós” rendszerben. Majd megkeressük azt az ezzel ekvivalens kölcsönhatásokra képes, komplex rendszert, amely a modellkísérleteink körülményeit „termelés” jelleghűvé teszi. Itt már közel járunk a kolloidkémia módszereihez, és ezért mondják e tudomány művelői, hogy ők mindig is nanotechnológiát „csináltak”. De egy lényegbevágó különbséggel: a kémia tömbi reakciókat valósít meg, a nanotechnológia filozófiája azonban igényli, hogy vezérelni tudjuk a kémiai reakciók támadási pontjait. Ha az informatikai alkalmazásokra gondolunk: képesnek kell lennünk rendezett, például négyzet- vagy hatszöghálóba szervezett elrendezéseket létrehozni – ez is az „önszerveződés” családjába tartozó folyamat. Ez teszi ugyanis lehetővé, hogy az egyes elemekhez egyedileg, címzetten hozzáférhessünk. Mindezzel a tudással felvértezve azután megpróbáljuk általánosítani a preparatív eljárást akár a szervesetlen világ részecskéire is, hogy azokat is hasonlóan rendezhesstük el valamilyen funkcionális rendszerre. Nemrégén a gyakorlatban is demonstrálták az elvet, amikor a DNS-szálak összekapcsoló-

³ Márk Géza I. – Biró L. P. – Koós A. – Osváth Z. – Gyulai J. – Benito, A. M. – Thiry, P. A. – Lambin, P. (2001): Charge Spreading Effects during 3D Tunneling through a Supported Carbon Nanotube. in Kuzmany, H. – Fink, J. – Mehring, M. – Roth, S. (eds.): *Electronic Properties of Molecular Nanostructures*. AIP Conf. Proceedings, Vol. 591, 364-367.

dásakor sikerült maximum öt rézatomot is közrezáratni⁴!

Ha hozzáteszem azt is, hogy az így előálló „bottom up” („építkező”, Feynman terminológiája) technológia még energiatakarékos is lehet, az netán még abban is segít, hogy az emberi civilizáció üzemmenete közelebb jusson egy, a fennmaradását biztosítani képes formához. A földi, főleg a növényi élet hosszú múltja bizonyítja, hogy a „valós idejűen” (real time) napenergiához kötött „termelés-fogyasztás” (mondhatjuk: „Nap-élet”) tartósan életképes és önfenntartó. Az állati élet már némileg eltávolít ettől az azonnali hasznosulástól, és az emberi életforma, pláne a túlszaporodás esetén mindezt a visszájára is fordíthatja. Nos, a Nap-élethez kellene minél inkább közelítenünk, persze a XXI-XXII. századi tudás szintjén, tízmilliárdos emberi létszámmal és a maximálisan megőrzött környezettel, amelynek modell-rendszerkénti fenntartása is életbevágó! Ez a XXI. század legfőbb kihívása.

Nem akarok vakon elfogultnak látszani a nanotechnológia irányában. Azt a látszatot sem akarom kelteni, hogy minden termelési-reciklációs gond így oldható meg – hiszen vannak területek, például a közlekedés, amely aligha szabádirható meg a problémáktól nanotechnológiai molekuláris gépekkel – hasonlókkal, mint az E. coli csillója...

Problémának látom azt is, hogy a nanotechnológia „termelése” nélküli lehetőséget, amelyet a *Total Quality Management* (TQM) jelent a mai termeléscentrikus világban, illetve amelyet az élővilágban az evolúció eszközei hordoznak: az önreprodukció még csak megy – ez az, amiről ma a szakma leginkább beszél –, a mutációk (azaz a „majdnem selejt”) fellépte is kézenfekvő. Amit azonban nehezen tudok

elképzelni, az a kiválogatódás „gyorsított” változata, amely a TQM-et lenne hivatott helyettesíteni. Főleg a mindenbe belezavaró, elsősorban termikus zajok minimalizálása látszik – elvileg is – problematikusnak. De hát hadd legyen még mit kutatni egy induló tudományban...

Magát a nanotechnológiát, annak indulását az integrált áramkörök fejlődése provokálta: Gordon Moore-nak, az Intel kereskedelmi igazgatójának a hetvenes években készített üzleti terve révén, amely „törvényé” érett. A példátlan tempójú miniatürizálás a végéhez közeledni látszik. Az extrapolálás arra a következtetésre vezet, hogy a 2010-es évtized közepén elérjük az egyedi tranzistorokra alapozott integrált áramkört koncepció fizikai határait, hiszen nem lesz elegendő atom egy-egy tranzistorban a kapcsolóhatás létrejöttéhez. Emiatt kezdett a kilencvenes években a szakma azon spekulálni, hogy mi is történik ezt követően, mert a fejlődés lefékeződésére senki sem fogad.

A kérdés időszerűsége 2003-ban már nagyon is komoly. Ha a saját élményemből indulok ki, akkor ezt a gondot meg kell az olvasóval osztanom. A Cornell Egyetem Anyagtudományi Karán dolgoztam 1986-ban, amikor az ottani National Submicron Facility-ben elkészültek a világ első, 100 nm-es kapuelektrodájú tranzistorainak példányai. Üzemképes azonban alig akadt közöttük. Össze is hívták a kollégák egy szűk szakértői megbeszélést, hogy ötletekkel segítsük a kihozatal megjavítását. Nos, tessék az évszámra figyelni: a 100 nm-es tranzisztort tartalmazó áramkörök először 2001 táján jelentek meg tömegtermékként. Ha a tizenöt évet – mondjuk – tízre lerövidíthetőnek is érzem, mindebből az következik, hogy a 2015. táján lezáródó tranzistor-korszakot követő új megoldásoknak már laboratóriumi szinten bizonyítottan itt kellene lappanganuk. Ennek analízise azonban néhány további folyóiratcikk témája lehetne.

⁴ Tanaka, Kentaro – Tengeji, Atsushi – Kato, Tatsuhisa – Toyama, Namiki – Shionoya, Mitsuhiro (2003): A Discrete Self-Assembled Metal Array in Artificial DNA. Science. 21 February. 299. 1212-1213.

Az efféle meggondolások indították el talán tíz esztendeje a kvantumszámítógép-kutatásokat. De nemhogy zseniális trónkövetelő, de potenciális utód is csak a megszo-kott rendszer „rokonságából” látszik. Azaz csak a bizonyos pontokon megújított integ-rált áramkör látszik esélyesnek. Például a mai, chipen belüli vezetékhalózat helyett képzel-hető el ugyanott a gyorsabb és mégis keve-sebb energiát disszipáló optikai jelátvitel. Vagy az ún. egyelektron tranzisztor ért el tárgy-alható fejlettséget. A kettős állapotokat jól modellező, spinekre alapozó izgalmas meg-oldások vagy a magashőmérsékleti szupra-vezetők alkalmazása még nem látható a gyárthatóság horizontján. Kissé ellentmond ennek, hogy épp a napokban vettem részt egy konferencián, ahol irigyelt, de jó barátaim ismertették egyik kísérletüket, amely a szilíci-um és annak technológiája alapján – azaz a nyeresre legesélyesebb stratégiával – készí-tettek modellértékű kvantumkomputert. Ez a megoldás néhány, egymáshoz kapcsoltan, azaz néhány atomnyi távolságra ionimplan-tált fozsforatom spinjére épít.

A katonai kutatásokban a „megfejthetel-en” titkosítások, a kriptográfia követelmé-nyei vezettek el a kvantumszámítógép gon-dolatához. A méretcsökkenéssel ugyanis eljutunk oda, hogy az áramköri rendszerben a kvantummechanika veszi át a newtoni törvények szerepét. Elsősorban a Pauli-féle kizárási elv a főszereplő. Ez azt mondja ki, hogy egy egységes kvantummechanikai rendszerben, azaz olyan rendszerben, amelyben a részecskék kölcsönhatásban vannak, nem kerülhet két vagy több elekt-ron azonos energiaállapotba (ebbe a spinjeik is beleértendő). Az ilyen egyedi állapotok, az ún. kvantumállapotok szuperpozíciói, azaz kombinációi is lehetséges állapotok. Az ilyen szuperponált állapotokat nevezték el – a digitális elektronika bitjeinek analógiájára – *qubit*nek. E káoszból az információ kiol-vasása rejtélyét számomra legjobban a fény-

nek egy résen való áthaladása világította meg: a rés előtt a fényhullámban rengeteg kvantumállapot lappang – mint a qubitben –, a résen való áthaladás után azonban csak egyetlen hullámfüggvény manifesztálódik.

Annak ellenére, hogy az indíttatás az in-tegrált áramkörök oldaláról indult, és az informatika új korszaka igényli a nanoméretű eszközöket, nagy esély van arra, hogy a ké-miai, biológiai alkalmazások jutnak túlsúly-hoz. Ezeknek a tudományoknak az érdeklő-dési területe, logikája ugyanis közel áll a nanotechnológiájához.

A magyarországi nanotechnológiai kuta-tások indulása seregnyi olyan példához ha-sonlatos, amelyeknél a hazai kutatógárda jó időben „rástartolt” egy-egy izgalmas, induló irányra. Sokan, akiknek a kísérleti lehetősé-gei és elméleti tudása ezt lehetővé tette, megindultak ebbe az irányba. Ahogy ez megszokott, a külföldi kapcsolatok is jelentős szerepet kaptak az irányváltásban.

E *Bevezető* első részében kifejtett filozófia háttérrel igyekeztünk szerkesztőként ösz-szegyűjteni a hazai eredményeket – felkér-ve kiváló kutatóársainkat munkájuk bemu-tatására. Örömmel és büszkén mutattuk vol-na be a teljes hazai palettát. Ebben azonban mind a területi korlátok, mind a tárgykör diffúz határai megakadályoztak.

A jelen összeállításban a mikrovilág felől kívánunk közeledni a témához, ezért tettük az első helyre Bársony István tanulmányát. Ezt követi a nanotechnológia információ-kezelési filozófiáját összefoglaló Csurgay Árpádnak az alapok tisztázásához is hozzá-segítő tanulmánya. Az optikai alkalmazások rendkívül fontos részét képezik az informá-ciótechnológia terén alakuló nanotudomány-nak – erről tájékozódhatik a tisztelt Olvasó Kroó Norbert, valamint Czitrovszky Aladár tanulmányai-ból. A nanoméretű „megmunká-lások” terén is van hazai unikális eszköz, amelyet Barna Árpád és Menyhárd Miklós tanulmánya mutat be. Ezután következik a

nanotechnológia egyik forró területének, a különleges szénmódosulatoknak, elsősorban a szén nanocsövekkel kapcsolatos hazai eredmények összefoglalása Kónya Zoltán, B. Nagy János, Kiricsi Imre, valamint Biró László Péter tollából. A Beke Dezső, Erdélyi Zoltán, Szabó István és Cserháti Csaba által ismertetett munka a nanoméreteken rendezett szerkezetek anyagmozgásainak tanulmányozása terén elért eredményeiket foglalja össze. Itt kanyarodunk a kémiai indíttatású nanotechnológia felé Gucci László, Dékány Imre, valamint Kálmán Erika és Csanády Andrásné tanulmányai révén, hogy – a téma multidiszciplináris voltát megkoronázó példaként zárjuk a sort Damjanovich Sándor bio-nanotechnológiai eredményeinek ismertetésével.

Meg kell említenünk, hogy a Magyar Tudomány 2002. decemberi száma, Görög Sándor vendégszerkesztésében, már sok olyan cikket tartalmazott, amelyek némi fogalmazási hangsúlyeltolással – multidiszciplinára, oh... – a jelen összeállításban is joggal helyet kaphattak volna. Talán a legközzvetlenebbek: Tétényi Pál – Lázár Károly – Paál Zoltán – Simándi László: *Katalízis – tudomány és technológia*, Berkó András: *A felülettudománytól a nanotechnológiáig – reakciók tanulmányozása atomi léptékben*, Horváth István Tamás: *Zöld kémia*, Tóth Klára – Gyurcsányi E. Róbert: *Szenzorok az analitikai kémiában*.

Több tanulmány tárgya épül be az EU keretprogramjaiba, illetve a NKFP-Széchenyi projektekbe, több kutatást pedig az OTKA finanszíroz – jelezve a hazai kutatások megbecsültségét, sikerességét. Reméljük, hogy ez a továbbiakban is így marad, illetve tovább szélesedik.

A hazai élettudományi kutatások sok témája olyan, hogy azokat – külföldön – a nanotechnológiai kiemelt finanszírozás keretében „adnák el”. Ezek – terjedelmi okokból is – hiányoznak a jelen számból. Mindennek megoldására javasoljuk, hogy a közeli jövőben ezeket a témákat összefoglaló tematikus szám kerüljön a Magyar Tudomány szerkesztőbizottsága elé, jóváhagyásra.

Köszönetnyilvánítás

A kötetet Szentgyörgyi Zsuzsa kedves és lelkes szerkesztői segítségével állítottam elő. Nagyon köszönöm Csurgay Árpád akadémikusnak a megjegyzéseit és a történeti részre vonatkozó adatait. Remélem továbbá, hogy a vezetésem melletti T43704 számú, illetve a részvételemmel folyó T043685 OTKA kutatásaink is profitálnak ezekből a gondolatokból.

Kulcsszavak: *nanotudomány, nanotechnológia kezdetei, nanotechnológia célja, nanotechnológia fő kérdései, a nanotechnológia célszám összefoglalása*

