

során kiderült, hogy a méhek rendkívüli szaglőérzéke a virágnektár észleléséhez egy reflexet, a proboscis extension reflexet társítja, amely a nyelv kiöltésében nyilvánul meg. Pavlovi reflextechnikát használva a méheket be lehet tanítani arra, hogy különböző robbanóanyagok, mint TNT, C4, TATP, valamint egyéb tűz- és robbanásveszélyes anyagok gőzeinek észlelésekor hasonlóképpen reagáljanak. Az így betanított méhek viselkedése jelzi a veszélyes anyagok jelenlétét.

Tim Haarmann, a Stealthy Insect Sensor Project projekt vezetője szerint a kutatók már régóta csodálják a méhek hihetetlenül érzékeny szaglőképességét, mely a kutyákéval vetekedik, azonban csak most sikerült megfelelő módszerekkel ezt a tulajdonságot gyakorlati célokra felhasználni. A kutatócsoport a vizsgálatok során arra is igyekszik fényt deríteni, hogy a detektálás határfokát mennyivel csökkenti más, zavaró vegyi anyagok, például kozmetikumok, olajok, valamint rovarirtószer jelenléte. (www.lanl.gov)

Új röntgenmikroszkóp-technika nanométeres skálán

Az amerikai Argonne Nemzeti Laboratórium kutatói az Xradia Inc. céggel együttműködve új technikát fejlesztettek ki, amely a röntgenreflexiót nagyfelbontású röntgenmikroszkópiával kombinálva nanométeres skálán képes az anyag szerkezetét észlelni. Az új leképezési technika segítségével jobban megérthetőek lesznek a felületeken lejátszódó reakciók, mint például adszorpció, korrózió, vagy különféle katalitikus reakciók. A módszer jelentősen megnöveli a röntgenmikroszkópia teljesítőképességét nanométeres skálájú vagy annál kisebb méretű szerkezetek közvetlen, valós idejű megfigyelésében. Ez a roncsolásmentes viz-

gálati módszer alkalmas kiegészítése a széles körben használatos szkennelési mikroszkópiának, és közvetlenül vizsgálhatja a szilárd felületek topográfiáját. A kutatók a röntgenoptikára és röntgenmikroszkópiára specializált Xradia Inc. céggel együttműködve nanométernél kisebb szerkezeteket is észleltek a mikroszkópiában már korábban felhasznált fáziskontraszt jelenségének segítségével. Ez az áttörés lehetővé teszi, hogy egy szilárd test felületének apró részleteit közvetlenül észleljék egy korábban az elektronmikroszkópiában használt technika segítségével hívásával.

(www.anl.gov)

MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN

NANOTUDOMÁNY, NANOTECHNOLÓGIA

A nanotudomány – amely az anyagtudománynak új, vagy talán „csak” újszerű, fejezete – mibenlétének megvilágításához az anyagtudományból, anyagtechnológiából induljunk ki. A technológiáknak két alaptípusa van. Az egyiket „lebontó”-nak nevezhetjük. Ez dominálta az ősi tevékenységeket, mint például a pattintott kőszerszám előállítását, de ilyen az esztergálás is. Hogy ma kevésbé kedveljük az ilyen jellegű technológiákat, annak elsősorban energia- és anyag-gazdálkodási okai vannak.

Az „építkező” technológiáknál a folyamat fordított: itt a kívánatos anyagszerkezetet kis egységeként, akár atomokként – erre *Feynman* már 1957-ben igyekezett a figyelmet ráirányítani – lehet felépíteni. Erre is hozhatunk példákat a modern technológiák köréből, például rétegbevonatok előállítása, de a mondandónk szempontjából legfontosabb analógia, sőt, példa a növényi élet, ahogy a Nap energiájának közvetlen hatására létrejön, növekszik, virágot nevel stb.

A nanotechnológiának ez az „építkező” technológia alkotja a *leglényegét*. Ennek két szintje definiálha-

tó. Az egyik a pásztázó szondás módszerek családjának preparatív alkalmazása – az ötlet megvalósítása a nanotechnológiai gondolat szülőanyjaként is tekinthető. A család Nobel-díjat is szerző tagja az alagút-mikroszkóp (Scanning Tunneling Microscope, STM) – de főleg „anyagmegmunkálásként”. Az STM-ben, a tárgyhoz néhány atomnyi távolságra közelített, atomi méretekben hegyes fémcsúcsba „átugró” elektronok áramát mérjük helyről helyre. Az atomi felbontáshoz vezető nagy trükk nem is a tű hegyezése, hanem a tűnek atomi méretekben finom közelítése, valamint a tárgynak ugyanilyen finom „előtolása” volt. Ez az ötlet sem volt teljesen új: régóta ismert a kvarcóra, amelyben a rezgő kvarckristály úgy „vezérli” az elektromos rezgést, hogy közben a térfogata is duzzad, illetve zsugorodik. A „piezokerámiák” fejlesztése meghozta a precíz mozgatóra is alkalmas piezoelektromos eszközt (l. Márk G., *Fizikai Szemle* 56 (2006) 190).

Az STM ötlete katalizálta a gondolatokat, és a piezokerámiás mozgatót hasznosító pásztázó szondás módszereknek egész arzenálja fejlődött ki jó egy évti-

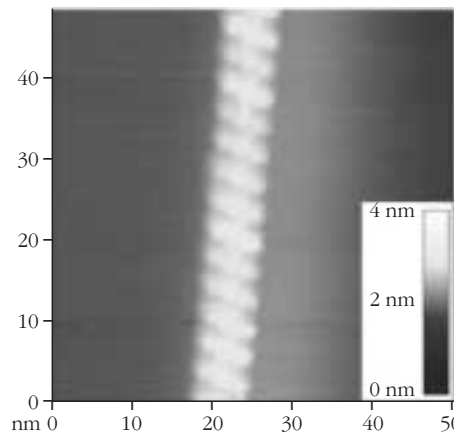
zed alatt: a legelterjedtebb a pásztázó erőmikroszkóp (Atomic Force Microscope, AFM), amely előbb a van der Waals-féle vonzó erőket, a további közeledéskor pedig a Coulomb-taszítást használja a domborzat láthatóvá tételére. Az AFM képes működni akár folyadékkal borított felületeken is! Érzékeny elektronikával jó felbontású, helyi elektromos kapacitásmérés is végezhető. Kifejlesztették a fókuszált (lézer)fénnyel működő, pásztázó elvű optikai mikroszkópot is, amelyre a képfelbontást korlátozó, fényelhajlási törvények nem jelentenek olyan éles korlátot.

Ezen eszközök létrejöttével az emberiség kezébe nemcsak új, atomi felbontást lehetővé tevő vizsgálati eljárások kerültek, de a „szondáknak” az anyaggal való kölcsönhatása képes a felületen atomokat céltotán el is mozdítani, el is helyezni – tehát atomi szintű preparatív eszközökként is használhatók! Világos azonban, hogy egy-egy, de akár „könnyen megszámlálható” számú atom célszerű elhelyezése is csak modellkísérletként alkalmas.

Termelésre, azaz sok atom kontrollált mozgatására – átfogó elnevezéssel – az önszerveződés jelensége alkalmas. Ezen azokat a jelenségeket értjük, amelyeknél a természeti törvények elrendezik az elemeket, atomokat, molekulákat. Mondhatja a T. Olvasó: „A kristályosodás is ilyen jelenség, mert az is »elrendezi« az atomokat.” Nanotechnológiáról akkor beszélünk, ha a természeti törvények atomcsoportok, vagy esetleg néhány száz atomos egységek, illetve nagyobb molekulák elrendeződését idézik elő.

Érthető, hogy emiatt mondják például a kolloidkémikusok, hogy ők mindig is „nanotechnológiát csináltak”. Ez csak majdnem a teljes igazság. Korábban a kémiában ugyanis nem volt kulcskérdés, hogy *helyileg* hogyan a zajlanak a reakciók, csak jöjjön létre a kívánt gél, mono- vagy polimér stb. A nanotechnológia ezzel nem elégszik meg: olyan feladatokat tűz maga elé, hogy akár egyetlen molekulát tudjon célba juttatni, például orvosi alkalmazásoknál. Ehhez képesnek kell lennünk meg is találni azt az „egyetlen” molekulát, majd parancsot adni annak és csak annak. Azaz a térbeli önszerveződést is el kell érni. Ez nagy és új kihívás a nanotechnológiai kémiának. Különösen igaz, ha a nanotechnológiát „nanoelektronika”-ként akarjuk a szolgálatunkba állítani.

A nanotechnológiával kapcsolatban az a vízió elevenedik meg, amit akkor érezhetett az idősebb olvasó, amikor jó pár évtizede a grafit interkalációjáról hallott: ez az a jelenség, amikor az egymással lazán kapcsolódó grafit síkok közé más, például alkáli atomokat sikerült a vegyészeknek „becsempészniük”. A fullerénnek nevezett, 60 darab szénatomból álló „labda” felfedezésekor is rögtön kínálkozott, hogy a belsejébe – mint egy „nanodobozba” – atomokat, molekulákat zárjunk, és azokat szükség szerint engedjük ki. A nanotechnológia gyógyászati alkalmazásaként önként kínálkozik a „nanokapszulálás” mint eljárás: hogy a gyógyszermolekula a tetthelyen szabaduljon ki a „kapszulából”, miután az érzékelő csápok jelt adnak, hogy feloldódhat a védőréteg.



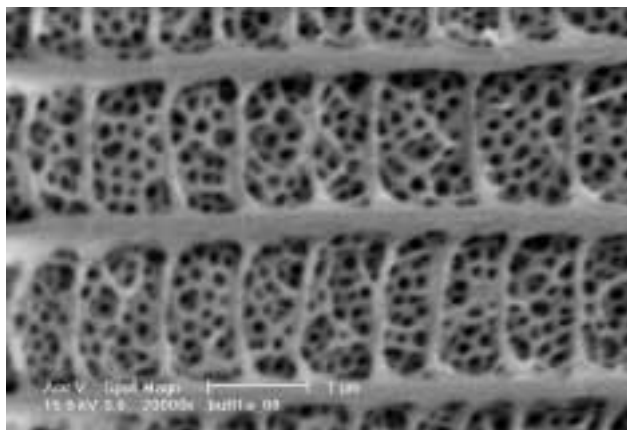
1. ábra. Hengerspirál alakú fullerénecső

A karakterisztikus méretek nanométerekekre való csökkentése sok és gyakran váratlan jelenséget is eredményezett. Néhány példán mutatjuk be ezt – a nanotechnológia több területéről válogatva. Kezdjük a szeretlen világgal: az olvadáspont-csökkenés jelenségével. Az olvadás felületi energiával is kapcsolatos jelenség: a felületen lévő atomok lazább kötésük miatt könnyebben kerülnek át az olvadékba. Ha a szerkezet „nanokristályos”, a felületszerű részeinek aránya a térfogathoz viszonyítva sokszorososa a makroszkóposnak. Érthető, ha ez az olvadáspontnak – akár több tíz Celsius fokkal való – csökkenéséhez vezet.

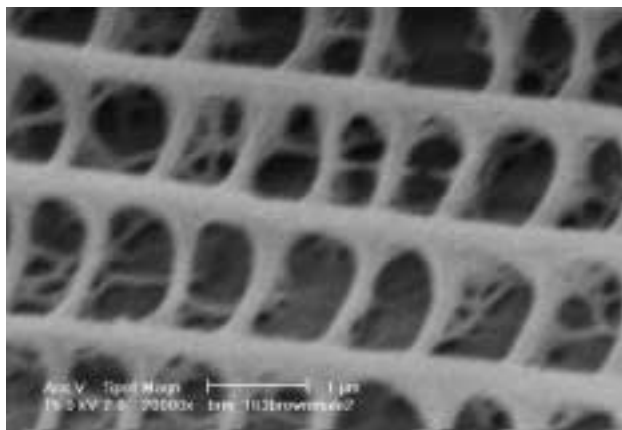
A fullerénről volt szó, a szén nanocső is rokon vele: az „egyfalú” változat a két végén fél-fél fullerénnel lezárt, grafitszerű szénecső. Ha a szabályos hatos gyűrűk helyére ötös vagy hetes gyűrűket építünk be, a keletkező mechanikai feszültség hatására például hengerspirál alakú cső keletkezik (1. ábra).

Szemléletes példákat hozhatunk az optika területéről is. Akár találós kérdésként is feltehető: mennyi fényenergia megy át egy – mondjuk – a felület 20%-ában „nano-lyukacsos” – amelyen a lyukak átmérője kisebb a fény hullámhosszánál – fémlemezen? Kiderül, hogy amit a kisméretű akadályokon való fényszóródásról, interferenciáról tanultunk, az itt nem érvényes. Nem hogy 20%-nál kevesebb, de éppen több fényenergia jut keresztül az ilyen szítán. Fontos azonban, hogy a lemez fémből legyen.

Egy másik érdekesség. A kétdimenziós réseken létrejövő interferencia képleteit ismerjük. Háromdimenziós (3D) rácsokon új jelenségekkel találkozunk. Ha fehér fényel világítjuk meg ezt a finomszerkezetű rácsot, lesznek olyan hullámhosszú fénysugarak, amelyek nem tudnak áthatolni a szerkezeten, hanem visszaverődnek. Hogy ilyet már a T. Olvasó is látott? Biztosan. Az élővilágban a „gyöngyház fényű” színek így állnak elő! Ha mikroszkópba tesszük a kérdéses élőlények ilyen szöveteit, nem színeket, hanem a fény szórására alkalmas, finom-, azaz nanoszerkezetet látunk! Ezeket a szerkezeteket fotonikus kristályoknak nevezik, mert – a kristályok elektronjainak analógiájára, ahol szintén vannak tiltott energiájú, azaz a rácsban mozgásképtelen elektronok – egyes fényhullám-



2. ábra. Színjászó lepkeszárny pásztázó mikroszkópos képe (Vétesy Z., MFA, felvétele)



3. ábra. Egyszínű lepkeszárny pásztázó mikroszkópos képe (Vétesy Z., MFA, felvétele)

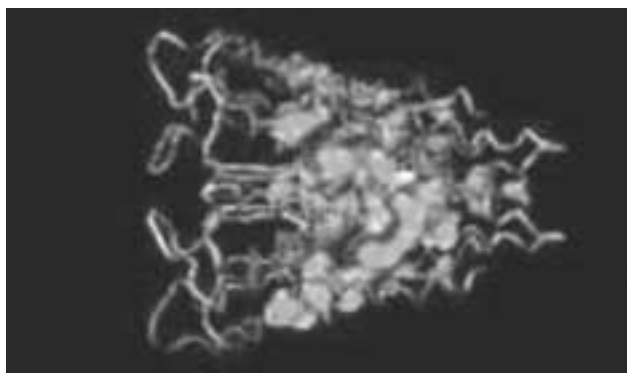
hosszakra tiltott az áthaladás. A 2. ábra ilyen nano-szerkezetes lepkeszárny pásztázó mikroszkópos képét mutatja.

Nagyon érdekes, hogy a kedvezőtlen körülmények között (pl. magas hegységben) élő egyedek elvesztették a nászruhájukat és csúf barnák (3. ábra), de megnőtt a túlélési esélyük: azonos napsugárzás hatására a testhőmérsékletük 6–8 °C-kal magasabb!

A nanotechnológia művelői érzik, hogy ez a tudományos-műszaki ág életünk rengeteg területén lehet és lesz meghatározó. Amiatt is remélhető, mert ezzel a termelés leginkább anyag- és energiatakarékos formáját találjuk meg – minél többet és sikerrel tanulunk el például a növényi élet modelljéből.

A közepesen fejlett országokban talán a kémia, az ipari bevonatok, a biológia, a gyógyszeripar, az orvosi terápia területén lehet az első, tömeges alkalmazás. A fejlett országokban azonban a kvantumszámítógép kifejlesztése is a fő prioritások között szerepel. Egyik fejlesztés alatt álló elképzelés D. Jamieson (Melbourne) ötlete: a Kane-rendszerű nanokomputernél, a ^{28}Si -rétegbe implantált egyedi, egymáshoz közeli, így kölcsönhatásban lévő foszforatomok spinjét (amelyek qubitet alkotnak) vezérlik majd az elektródok. A „qubit” a „bit” kvantum-analagonja, amely nem csak 0 és 1 állapotokat tud felvenni, hanem a hullámfüggvények szuperpozícióit is. Az ezzel „számoló” eszköz, mint hatványozottan összekapcsolt párhuzamos komputer működik, majd, talán évtized(ek) múlva.

4. ábra. Stresszprotein



Credo...

Ha néha meg is feledkezünk róla, a 21. század alapkérdése az energia, annak gazdaságos előállítása, az azzal való takarékos gazdálkodás. Ennek érdekében minden emberi technológiát újra kell gondolni, hogy

- azonos feladatot kevesebb energiával, anyaggal végezzen, és
- zárt termelési–fogyasztási folyamatok tüntessék el a hulladékot.

Ebben tud teljesen újat hozni a nanotechnológia.

A Credo másik része a „multidiszciplína”: sok területen szinte eltűnnek a természettudományok határai, sőt, közérdek, hogy valami hasonló történjék a közeljövőben a biológiával, mint ami a 20. század első felében a kémiával történt, amikor a fizika, a matematika belevonult és ott „kémiaiává” vált. Most a biológiát kell átalakítanunk.

A paradigmaváltás két szintje tehát:

- nem csak a fizikai–kémiai metodikák bevétele, alkalmazása az élő rendszerekre,
- hanem az élettelen természettudományok gondolkodásmódjának, azaz az első elvekre való visszavezetésnek a célú tűzése.

Mire gondolok? A mérnöki–fizikusi gondolkodásmódot kell bevezetni a biológiába – hogy kevesebb antropomorfizmus legyen benne („az élőlény alkalmazkodik...” – nem így igaz: csak a kevésbé alkalmas elpusztul...).

Képzelnék el ezen a módon például a csöves csontjainkban keletkező, komplikált gombolyag, a stresszprotein a működését (4. ábra).

Megtalálja a sérült fehérjét, de hogyan? Detektálja a fehérje-szekvencia hibás voltát, de hogyan? Átadja a saját testének egy megfelelő részét – milyen energetika vezérli, mi is van a termodinamikával? Hiszen tudjuk, hogy csak atomi erők (van der Waals, hidrogén-kötés, kovalens-ionos kötés – végülis Coulomb-erők) szerepelhetnek.

Ennek megértését reméljük a biológia–kémia–fizika–informatika–matematika új életétől, amelyben a „nano” az egyik kulcs-, de legalábbis főszereplő.

Gyulai József, MTA MFA