

## NANOVILÁG: A SZÉN NANOCSTÓL A KÉK LEPKESZÁRNYIG

*Biró László Péter*

**Nanoszerkezetek Kutatása Osztály,  
MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutató Intézet**

Napjaink egyik tudományos divatszava, a *nano* görög eredetű, törpét jelent. A "törpék világát" óriásira növekedő érdeklődés veszi körül, és nem csak tudományos berkekben. Nem ritkaság, hogy a világhálón olyan banki, pénzügyi, befektetői jelentéseket hirdetnek patinás cégek - nem kevés letöltési, vagy megrendelési díj fejében amelyek a nanotechnológia pillanatnyi állapotát és potenciális hatásait igyekeznek a kutatók nyelvéről a nagy pénzek urainak és a politikusok nyelvére lefordítani.

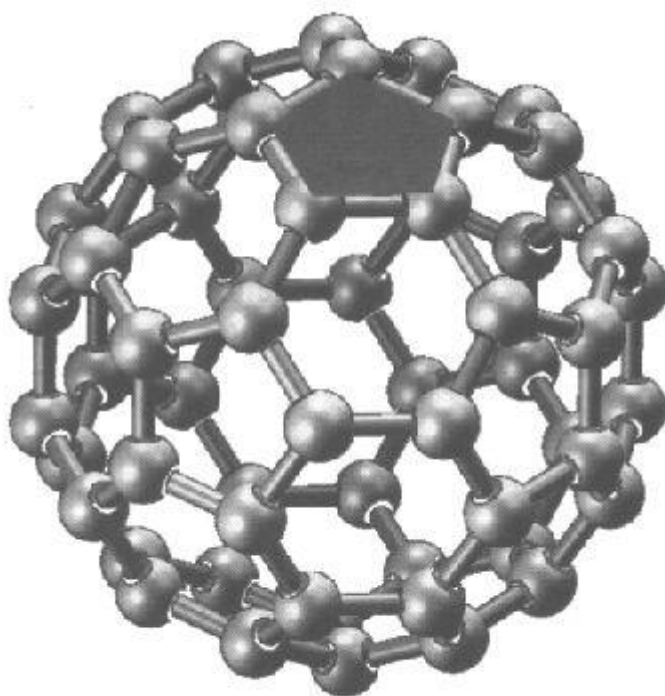
Az átlag médiafogyasztó joggal teszi fel a kérdést: miért e nagy zsongás, miért az "aranyláz"-hangulat? Honnan toppant elő hirtelen ez a törpe világ? Mennyi jót, s mennyi rosszat hoz?

A kérdések egy része könnyen megválaszolható: a tudományos élet zsongását az okozza, hogy a 100 nanométer alatti méretek skáláján az anyagok elvesztik tömbi tulajdonságaikat és egészen újszerű, néha szinte hihetetlen tulajdonságokat nyernek. A fizika felől szemlélve, első közelítésben ez két okra vezethető vissza: egyrészt közismert, hogy a testek felületén elhelyezkedő atomok másként rendeződnek el, mint tömbi társaik. A nanométeres szemcsék esetében megfordul a felületi/tömbi atomok számának aránya ahhoz képest, ami a makroszkopikus világban megszokott. Ez kicsit olyan, mintha a színes papírba csomagolt ajándék méretei addig zsugorodnának, amíg csak a csomagolópapír marad. Másrészt, a 10 nm körüli méretek összemérhetők az elektronok szabadúthosszával, ezért figyelembe kell venni a kvantumos hatásokat (elektronszerkezet módosulása). A képet tovább árnyalhatja a kémia és a biológia. Például a nanométeres szemcséken jelentkező katalitikus hatásokkal, amelyek nem figyelhetők meg tömbi anyag esetében. Ennek igen jó és jelen írás témájához közeli példája az, hogy míg a tömbi átmeneti fémeken nem figyelhető meg a szén nanocsövek növekedése, addig az 1-10 nm átmérőjű, Fe-, Co-, Ni-szemcsék hatékony katalizátorok a szén nanocsövek előállításában [1]. A biológia területén megnyilvánuló különleges hatások egyike például az, ahogyan a vízben előállított olajsuszpenzióknak baktérium- és spóraölő tulajdonságai vannak, ha az olajcseppecskék mérete a nanométeres tartományba esik [2]. Valójában a nanométeres méretek tartománya az, ahol a fizika, kémia és biológia határai leginkább egybeolvadni látszanak, és ahol egy-egy megfigyelt jelenség vagy tulajdonság szigorú besorolása valamelyik szaktudomány területére egyre nehezebb és nem is célszerű.

A média zsongását részben a valóban izgalmas és ugyanakkor helytálló tudományos eredmények, ezek várható hatása a mindennapi életünkre és néha - nem kis mértékben - a szabadjára eresztett fantázia fűti. Ez utóbbi túlfűtöttség néha meglehetősen és megkérdőjelezhető következtetésekig is elvezethet. Ami tény: a nanotudomány jelenlegi szakaszában a vizsgálati és előállítási módszerek kifejlesztése történik, azokat az "alkatrészeket" és építési elveket gyűjtögetjük, amelyekkel valamikor később "nanogépeket" tudunk majd létrehozni. Az idézőjel azt hivatott hangsúlyozni, hogy ezen a méretskálán a gép

fogalma valami egészen mást jelöl, mint azt megszoktuk a mindennapi világban: nem fogaskereket és áttételeket, hanem néhány tízezer atomból álló, *megtervezett szerkezetet*, amely képes ellátni egy *előre meghatározott feladatot*.

Hogy melyek lesznek ezek a feladatok, azt ma még nem lehet biztonsággal megmondani, többek között azért sem, mert ez nemcsak tudományos kérdés, hanem legalább ugyanakkora mértékben üzleti és politikai kérdés is. A mai eredmények szintjéről a következő évtizedekig lehet több-kevesebb biztonsággal előretekinteni és nem annyira egyes sajátos alkalmazásokra, mint inkább potenciális alkalmazási területekre. A teljesség igénye nélkül felsorolhatók a különlegesen könnyű, szilárd és rugalmas anyagok és kompozitok (szén nanocső alapú kompozitok), a nanoelektronika (szén nanocső, Si nanorudak, egyedi molekulák stb.), új gyógyászati és diagnosztikai eszközök és elvek (kvantumpöttyök, különleges fehérjék és nanokapszulák a gyógyszerek célzott eljuttatására), a nanostrukturált felületű anyagok ("lótusz" hatás), fotonikus kristályok stb. De folynak az előkészítő kutatások, a szoftverfejlesztés és mikroelektronika területén a "szétszórt" (*distributed*) [3, 4] és hibatűrő (*defect tolerant*) [5] rendszerek kifejlesztésének irányába, ami előtanulmányként is felfogható a majdan létrehozandó nanogépek vezérlésére.



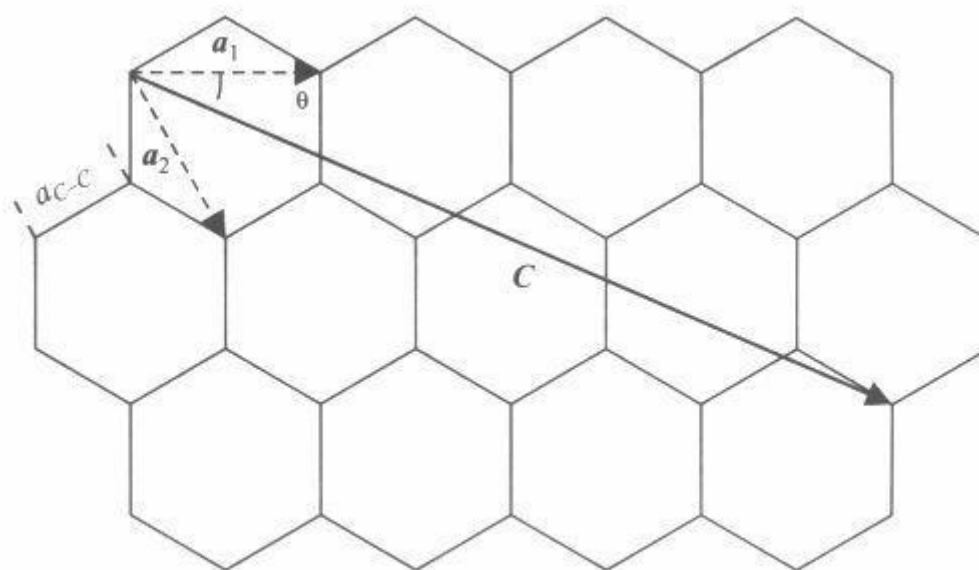
1. ábra. A  $C_{60}$  molekula szerkezete, az egyik ötszög sötét kitöltéssel ki van emelve.

Bizonyosra vehető, hogy új elvek alapján zajló, mélyreható technológiai forradalom hajnalán vagyunk, amikor áttérünk a korai kőkorszak óta alkalmazott "kifaragom" megközelítésről az "összerakom" megközelítésre. Míg a klasszikus technológiák az első készszámok pattintásától napjaink integrált áramköréig úgy állították elő a szükséges javakat vagy azok részegységeit, hogy "kifaragták" őket egy nagyobb darab nyersanyagból, azaz egy tervhez viszonyítva eltávolították a "felesleget", a

nanotechnológia egészen más vezérelvek szerint alakul: *atomonként akarja összerakni a dolgokat*.

A valódi nanotechnológia "szerszámokként" igyekszik felhasználni az elmúlt évezredek alatt megismert természeti törvényeket ahhoz, hogy rábírja az atomokat és molekulákat arra, hogy bizonyos tervek, előre kigondolt kívánalmak szerint kapcsolódjanak össze. A valódi nanotechnológia objektumaira és "termékeire" az esetek többségében az is igaz, hogy nem alakíthatók ki kifaragás útján. Ennek illusztrálására álljon itt néhány példa a szén nanoszerkezetek köréből.

A szén sokarcúságának eredete azokban a különféle módzatokban rejlik, ahogyan a szénatomok összekapcsolódhatnak egymással [6]. Elég annyit említeni, hogy a gyémánt mindent karcos, míg a puha

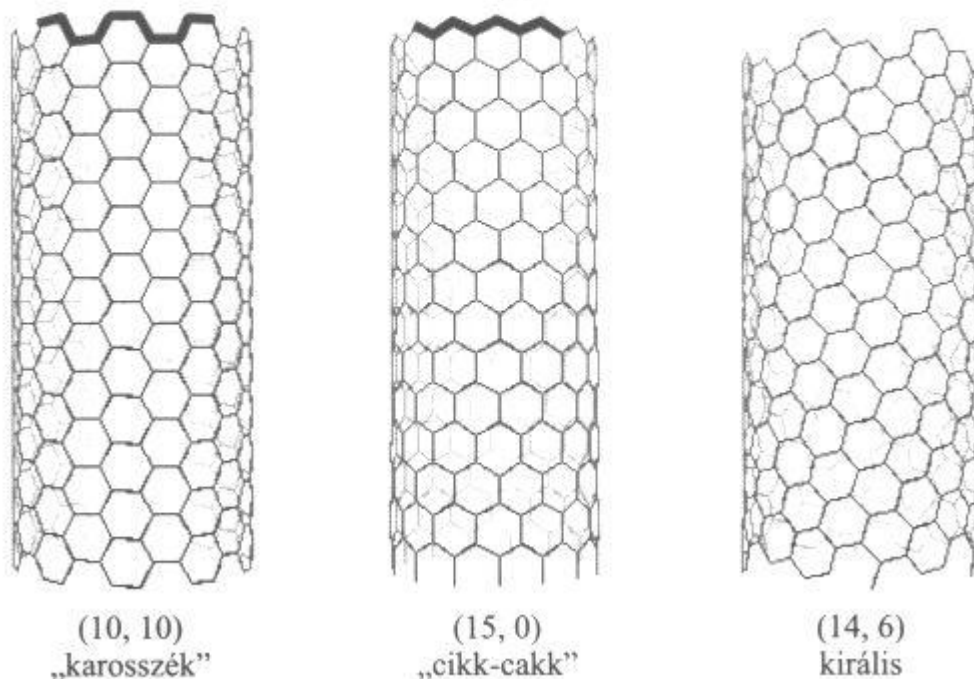


2. ábra. A grafénsík nanocsővé tekerését meghatározó feltekerési vektor  $C$ ,  $a_1$  és  $a_2$  a grafénsík két egységvektora,  $a_{C-C}$  a szén-szén kötés.

papírra grafitceruzával írunk. A szén nanoszerkezetek egyre népesebb családjának alapja az  $sp^2$  hibridizációjú grafit, amely réteges szerkezetű anyag. A rétegekben hatszögek csúcsain elhelyezkedő legközelebbi szomszéd szénatomok között a távolság (0,142 nm) kisebb, mint a gyémánt atomjai között (0,154 nm), ami azt jelenti, hogy az egyetlen atom vastag grafit, az úgynevezett grafén, szilárdsága nagyobb, mint a gyémánté. Az, hogy a grafitceruzával mégis írhatunk, az annak a következménye, hogy a tömbi grafitban a hatszöges rétegek távol vannak egymástól (0,335 nm-re), és csak gyenge Van der Waals-kötések kapcsolják őket össze.

A szén nanoszerkezetek családjának első tagját, az 1 nm átmérőjű fullerént ( $C_{60}$ ), 1. ábra, 1985-ben fedezték fel Sir Harry Kroto és munkatársai [7]. A felfedezést 1996-ban kémiai Nobel-díjjal jutalmazták. Érdekessége a tudománytörténetnek, hogy 1984-ben egy Exxon kutatócsoport - anélkül, hogy felismerte volna - kimutatta a  $C_{60}$ -at [8]. Amint az 1. ábrán is látható, a fullerén egy olyan zárt szénkalicka, amely nem állítható elő kifaragás útján, arra kell rábírni a szénatomokat, hogy úgy kapcsolódjanak  $sp^2$  jellegű hálóba, hogy ötszögek is beépüljenek a szerkezetbe. Az ennek nyomán ébredő feszültség a sík grafénből gömbszerűen görbülő felületet hoz létre, amely lehet  $C_{60}$ ,  $C_{70}$ , vagy más magasabb rendű fullerén az ötszögek és hatszögek arányától függően.

3. ábra. Egyenes szén nanocsövek szerkezeti modellje. Az ábrán látható a három jellegzetes nanocsőcsalád: a karosszék csövek esetében egyik szén-szén kötés merőleges a cső tengelyére, a cikk-cakk csövek esetében egyik szén-szén kötés párhuzamos a cső tengelyével, míg a királis csövek esetében a cső tengelye és a hozzá legközelebb eső szén-szén kötés 0 és 30° közötti szöget zár be.

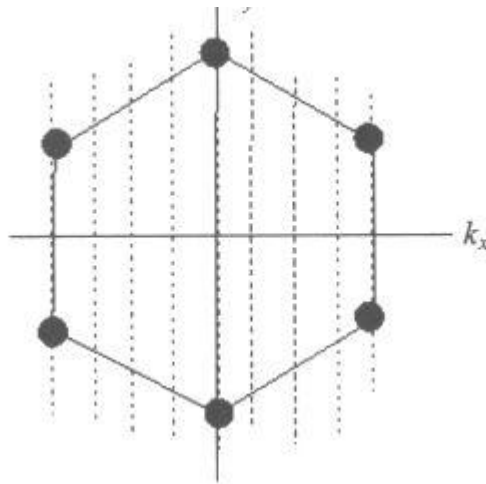


A család következő tagját a szén nanocsövet 1991-ben fedezte fel Iijima [9] kisnyomású He légkörben létrehozott egyenáramú elektromos ívben előállított fullerén "koromban". A szén nanocsövek szerkezeti modellje elegáns egyszerűségében (2. ábra és 3. ábra): a grafénsík feltekerésével - úgy, hogy a feltekerés nyomán a szén-szén kötések hálójá tökéletesen záródjon - egy hengerfelületet nyerünk. A feltekerést és ezzel egyben a keletkező nanocső tulajdonságait is egyértelműen meghatározza a feltekerési vektor,  $C$ . A vektor origójában és végpontjában található szénatomok "egybeolvasztásával" keletkező hengerfelületen, a feltekerési vektor a cső tengelyére merőleges kört alkot. A

$$C = na_1 + ma_2 \quad (1)$$

vektor, ahol  $n$  és  $m$  egész számok,  $a_1$  és  $a_2$  a grafén egységvektorai;  $C$  egyértelműen azonosítja a szén nanocsövet az egységvektorok  $(n, m)$  szorzóinak segítségével. A 3. ábrán bemutatott feltekerési eseteket különböztetjük meg: az úgynevezett karosszék, cikk-cakk és királis nanocsöveket. Az egyfalú szén nanocsövek egyetlen grafénrétegből épülnek fel, a kísérleti adatok szerint jellemző átmérőjük az 1-2 nm tartományban van. A többfalú szén nanocsövek koncentrikusan egymásba helyezték, zárt grafénhengerekből épülnek fel úgy, hogy az egyes rétegek közötti távolság a 0,34 nm tartományban van (megegyezik az úgynevezett turbóréteges grafit - olyan grafit, amely grafénrétegekből épül fel, de a rétegek nem ABAB elrendezésűek - rétegei között mért távolsággal). A többfalú szén nanocsövek jellemző átmérője a néhányszor 10 nanométer.





4. ábra. A grafén hatszögletes Brillouin-zónája. A Fermi-felület a hatszög sarkain található pontokra redukálódik. A párhuzamos, szaggatott vonalak a megengedett  $k_n$  értékeknek felelnek meg. Ha valamelyik vonal áthalad a pontokon – mint az ábrán látható karosszék jellegű nanocső esetében (a vonalak a párhuzamosak a  $k_y$  iránnyal, tehát mindig van egy vonal, amely áthalad a  $k_x = 0$  meghatározott pontokon) –, akkor fémes viselkedésű nanocsőről beszélünk, ellenkező esetben (például, a cikk-cakk csöveknek megfelelő vonalak a  $k_x$  iránnyal párhuzamosak, ami nem eredményez feltétlen áthaladást a hatszög valamelyik csúcsán) a nanocső félvezető viselkedést is mutathat.

Első közelítésben az egyfalú szén nanocső elektronszerkezetét két tényező határozza meg: a) egy egyatomos grafitrétegből (grafén) épül fel; b) mivel a henger átmérője összemérhető az elektron szabadúthosszával, csak azok az elektronhullámok létezhetnek egy bizonyos nanocsővön, amelyek teljesítik a periodikus határfeltételt:

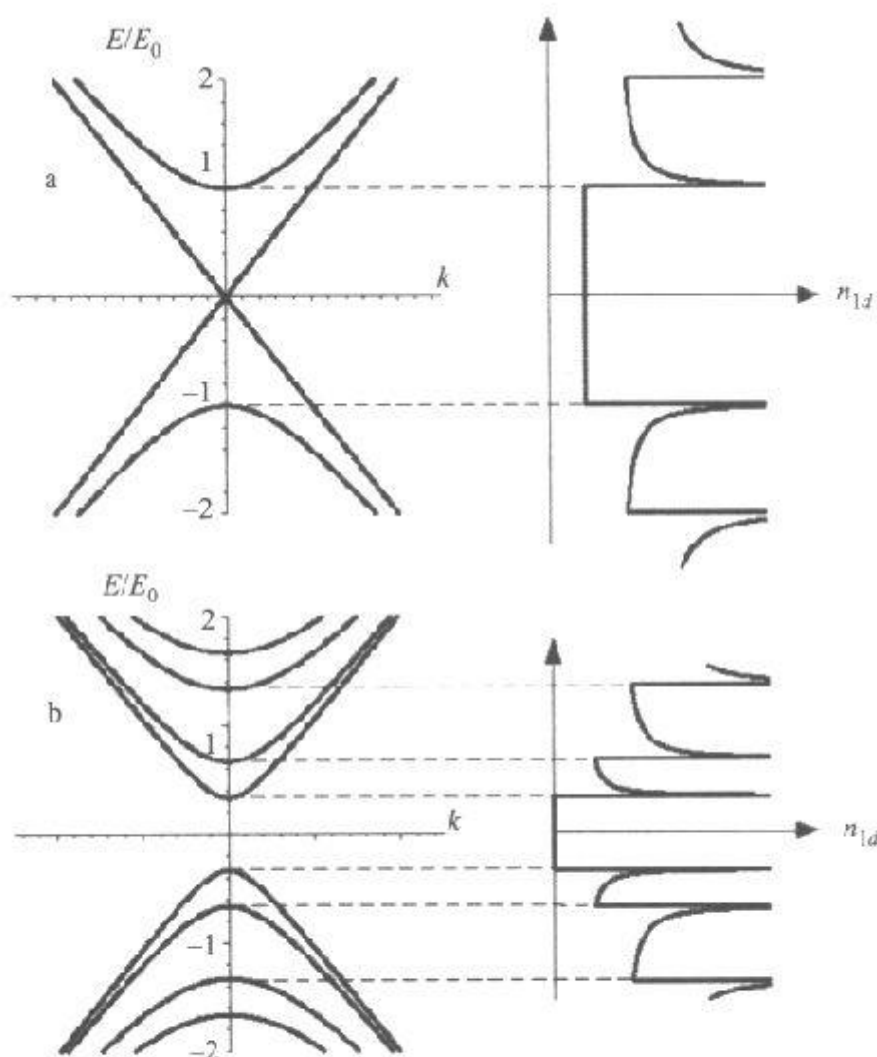
$$|\mathbf{C}|k_n = 2\pi r k_n = 2\pi l, \quad (2)$$

ahol  $|\mathbf{C}|$  a feltekerési vektor hossza (nanocső kerülete),  $r$  a cső sugara,  $k_n$  a hullámszámvektornak a cső tengelyére merőleges irányba mutató összetevője,  $l$  egész szám. Ellenkező esetben destruktív interferencia lép fel. Ebben a közelítésben elhanyagoljuk a grafénsík csővé görbítése nyomán az atomok közötti kötések torzulásából eredő hatásokat.

A kétdimenziós grafit (grafénsík) egy nulla sávszélességű félvezető, amelynek elektronszerkezetét a Fermi-energia környezetében egy betöltött állapotokat tartalmazó  $\pi$  sáv és egy betöltetlen állapotokat tartalmazó  $\pi^*$  sáv határozza meg. A Brillouin-zóna egy hatszög, a betöltött és betöltetlen állapotokat elválasztó Fermi-felület pedig a hatszög csúcsain található  $K$  pontokra redukálódik, [4. ábra](#). A periodikus határfeltétel (2) által megengedett állapotok párhuzamos vonalakkal ábrázolhatók a Brillouin-zónában, amelyek

$\Delta k_n = 2\pi / C = 2\pi / d$  távolságra vannak egymástól, ahol  $d$  a nanocső átmérője. Ha a vonalak valamelyike áthalad a hatszög csúcsain, akkor a nanocső fémes viselkedésű, azaz a Fermi-szint szomszédságában bármely energián vannak betöltött állapotok, ellenkező esetben a Fermi-szint környezetében egy tiltott sáv alakul ki, ekkor félvezető viselkedésű szén nanocsőről beszélünk. Könnyen belátható, hogy a megengedett állapotoknak megfelelő

vonalak elhelyezkedését a feltekerési vektor iránya és nagysága szabja meg, meghatározva ezzel a nanocső elektronszerkezetét is.



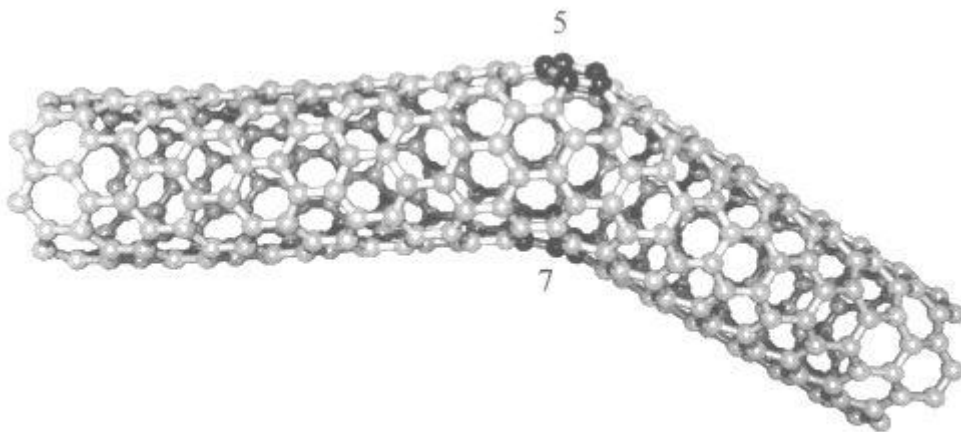
5. ábra. Az egydimenziós diszperziós relációk ábrázolása a  $k$  hullámszám függvényében (balra) a fém (a) és félvezető (b) egyfalú szén nanocsővek esetére, és az ezekből következő állapotsűrűség-eloszlás a Fermi-energia környezetében (jobbra). Az energiaskála egysége az  $E_0 = 2\hbar v_F/d$ , ahol  $v_F$  a Fermi-sebesség,  $d$  pedig a nanocső átmérője ([10] nyomán).

Az elektronszerkezet szempontjából a szén nanocső egy valódi egydimenziós objektum, mivel egyetlen vektor elégséges az atomi szerkezet periodicitásának leírásához, a  $\mathbf{T}$  translációs vektor a  $z$  tengelyével párhuzamos (merőleges a  $\mathbf{C}$  vektorra), hosszát a grafénsík feltekerésének mikéntje határozza meg. Az egydimenziós diszperziós relációból  $E(k)$ , amely megadja az adott hullámszámértékeknek megfelelő energiaértékeket, következik a szén nanocső Fermi-energia körüli állapotsűrűsége is, amint az 5. ábrán látható [10].

Amint arról már korábban szó volt, a grafénsíkban, és így az egyfalú szén nanocsőben is, a közvetlen szomszéd szénatomok távolsága kisebb, mint a gyémánt esetében, ami a gyémántét meghaladó szilárdságot eredményez. Ennek tulajdonítható, hogy mai ismereteink szerint, az

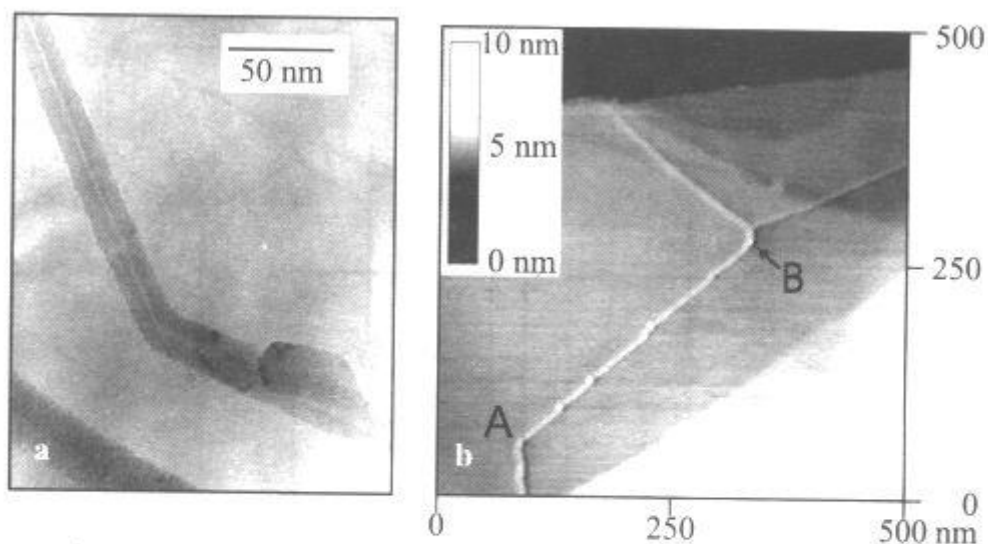
egyfalú szén nanocső a legnagyobb szilárdságú anyag, Young-modulusa 1 TPa nagyságrendű [1].

A fém és félvezető nanocsővek léte azonnal felveti a kérdést, nem lehetne az eltérő viselkedésű nanocsőveket valamiképpen összekapcsolni, hogy nanométeres Schottky-átmenetet nyerjünk? A válasz: lehetséges az összekapcsolás, mégpedig úgy, hogy legkevesebb két, nem hatszöges gyűrűre van szükség, egy ötszögre és egy hétszögre, amelyek a 6. ábrán látható módon épülnek be az  $sp^2$  hálóba. Érdeemes megjegyezni, hogy az ábrán bemutatott sajátos esetben egy cikk-cakk és egy karosszék cső kapcsolódik össze, a karosszék nanocső mindig fém viselkedésű (4. ábra), míg a cikk-cakk nanocsővek kétharmada félvezető viselkedésű. Több nem hatszöges gyűrűt felhasználva, bármely két  $(n_1, m_1)$  és  $(n_2, m_2)$  szén nanocső összekapcsolható. A transzmissziós elektronmikroszkópos (TEM) és pásztázó alagútmikroszkópos (STM) [11] felvételeink igazolják, hogy mind a többfalú, mind pedig az egyfalú szén nanocsővek között előfordulnak a 6. ábra modelléhez hasonló könyökeik (7. ábra). A könyök hajlatán, valamint a könyök egyik szárán végzett áramfeszültség karakterisztikamérések igazolták, hogy míg a hajlatban a könyök valóban egyenirányító típusú jelleggörbét mutat, az egyenes száron a jelleggörbe nem utal egyenirányításra [12].



6. ábra. Az úgynevezett Dunlap-könyök szerkezeti modellje, az öt- és hétszöget alkotó atomok feketén ki vannak emelve.

Az újszerű szén nanoszerkezetek sora nem zárul a nanocső-könyökökkel. Amint a 7. ábrán is látható, előfordul a nanocsővek Y-szerű elágazása, a tökéletesen szimmetrikus elágazás egyik lehetséges szerkezeti modellje a 8. ábrán látható [13]. Ennek megvalósulásához hat darab hétszögnek kell beépülnie az  $sp^2$  hálóba az ábrán látható módon. Az Y-szerű elágazásoknak az ad különleges jelentőséget, hogy valószínűleg kiterjedt hálózatok is létrehozhatók segítségükkel, amelyekben az Y elágazások látják el az információ feldolgozók szerepét, ahhoz hasonlóan, mint a tranzistorok a szilíciumalapú integrált áramkörökben. Egy ilyen hálózatnak csak néhány ponton kell kapcsolódnia a mikro- vagy makrovilághoz, ami lehetővé teszi a nanométeres méretekből származó előnyök teljes kiaknázását.



7. ábra. Többfalú szén nanocsövekből álló könyök TEM-képe (Horváth Zs.E. felvétele) (a); egyfalú szén nanocső STM-felvételén látható könyökök (A és B), valamint Y elágazás a B-vel jelölt könyök után (b) ([11] nyomán). A TEM-felvételen jól megfigyelhető, hogy a könyökök alkotó csövek belső átmérője különböző. Az STM-felvételen a kép síkjára merőleges irányban a szürke skálának megfelelő magasságértékeket a jobb felső sarokban elhelyezett magasságskála adja meg.

A sornak az Y elágazásokkal sincs vége: TEM- és STM-felvételek megmutatták, hogy ezeknél bonyolultabb szén nanoszerkezetek is létrehozhatók, [9. ábra](#). A telefonzsinórszerűen feltekert szén nanocső-spirálok az alacsony hőmérsékletű (700-800 °C) katalitikus módszerrel [\[1\]](#) történő növesztés esetén keletkeznek. A korai szerkezeti modellek az egymástól *elszigetelten* elhelyezkedő ötszögek és hétszögek - azaz *szerkezeti hibák* - bizonyos *jól meghatározott szabályok* szerinti beépülésével igyekeztek magyarázni a nanocső-spirálok szerkezetét. Bizonyos értelemben ez annak felel meg, mintha egymás folytatásában elhelyezett rövid nanocső-könyökökből épülne fel a tórusz vagy a spirál, [10. ábra](#). E modell hiányossága, hogy nem ad magyarázatot arra, mi idézi elő a nem hatszöges gyűrűk (öt- és hétszögek) egymástól elszigetelt, ugyanakkor tökéletesen szabályos beépülését, és a bonyolultabb csőszerű szén nanoszerkezetek, mint például a duplaspirálok, [11. ábra](#), és "nyakláncszerű" alakzatok szerkezetére sem ad magyarázatot. Nemrégiben új szerkezeti modellt javasoltunk, amelyben a nem hatszöges gyűrűk nem hibákként épülnek be, hanem a szerkezet alapvető építőelemei. Az ilyen  $sp^2$  hálókat *haeckelite* jellegűnek hívjuk, és belőlük ugyanolyan szabályok szerint tekerhetők fel a bonyolultabb szén nanoszerkezetek, mint amilyenek az egyenes szén nanocsöveknek a grafénsíkból való feltekerésénél alkalmaznak [\[14, 15\]](#).

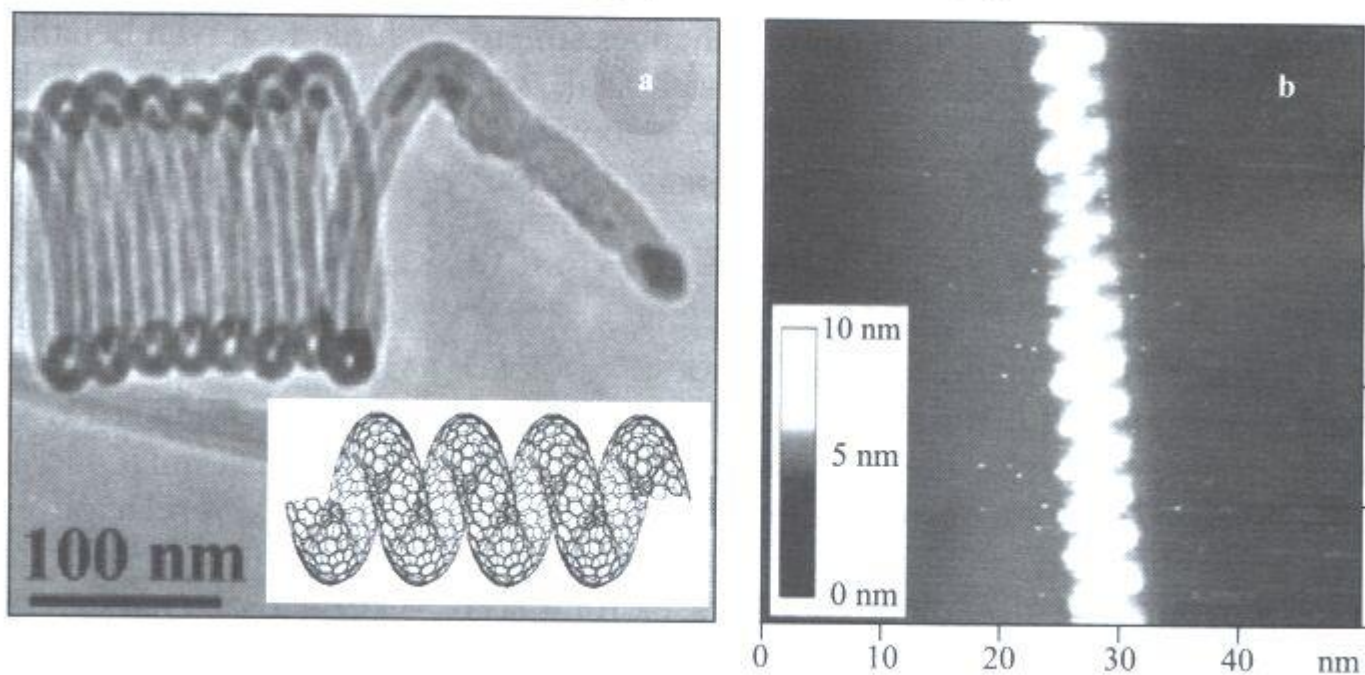




8. ábra. Nanocső Y elágazás szerkezeti modellje [13] nyomán, a hat darab hétszög közül az egyik sötét kitöltéssel ki van emelve.

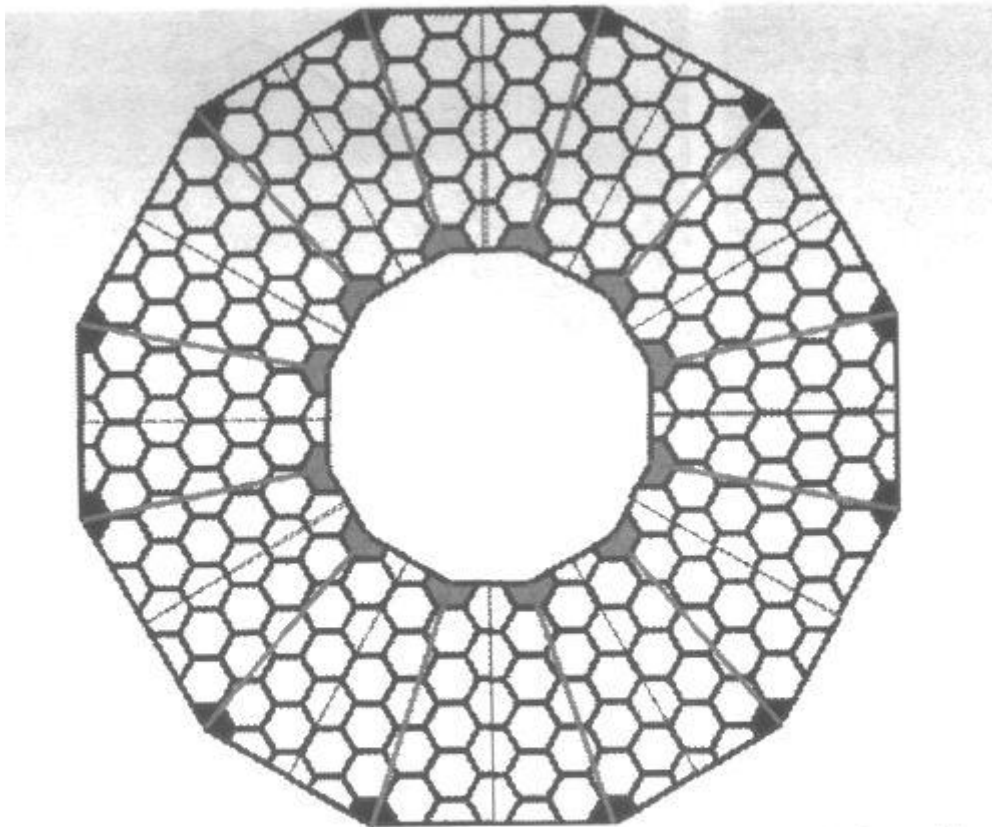
Akárcsak a fullerén és az egyenes szén nanocsövek esetében, a bonyolultabb szén nanoszerkezetek esetében is igaz, hogy ezek sem alakíthatók ki kifaragás útján, hanem meg kell ismernünk azokat a törvényszerűségeket, amelyek lehetségessé teszik, hogy ezek közül az alakzatok közül akkor és azt állítsuk elő, amelyekre szükségünk van. Ennek az útnak még csak az elején tartunk.

9. ábra. Szén nanocső-tekercek. a) Többfalú szén nanocső-spirálról készült TEM-felvétel [20] nyomán b) Egyfalú szén nanocső-spirálról készült topográfiai STM-felvétel [21] nyomán.



Nemrégiben érdekes módon kapcsolódott össze a szén nanoszerkezetekre koncentráló kutatási témánk egyik újszerű kutatási irányunkkal, melynek keretében a biológiai eredetű fotonikus

kristályokat vizsgáljuk. A fotonikus kristályok olyan anyagok, melyek bizonyos hullámhosszúságú fénnel szemben hasonlóan viselkednek, mint a félvezetők a tiltott sávjukba eső energiájú elektronokkal szemben.

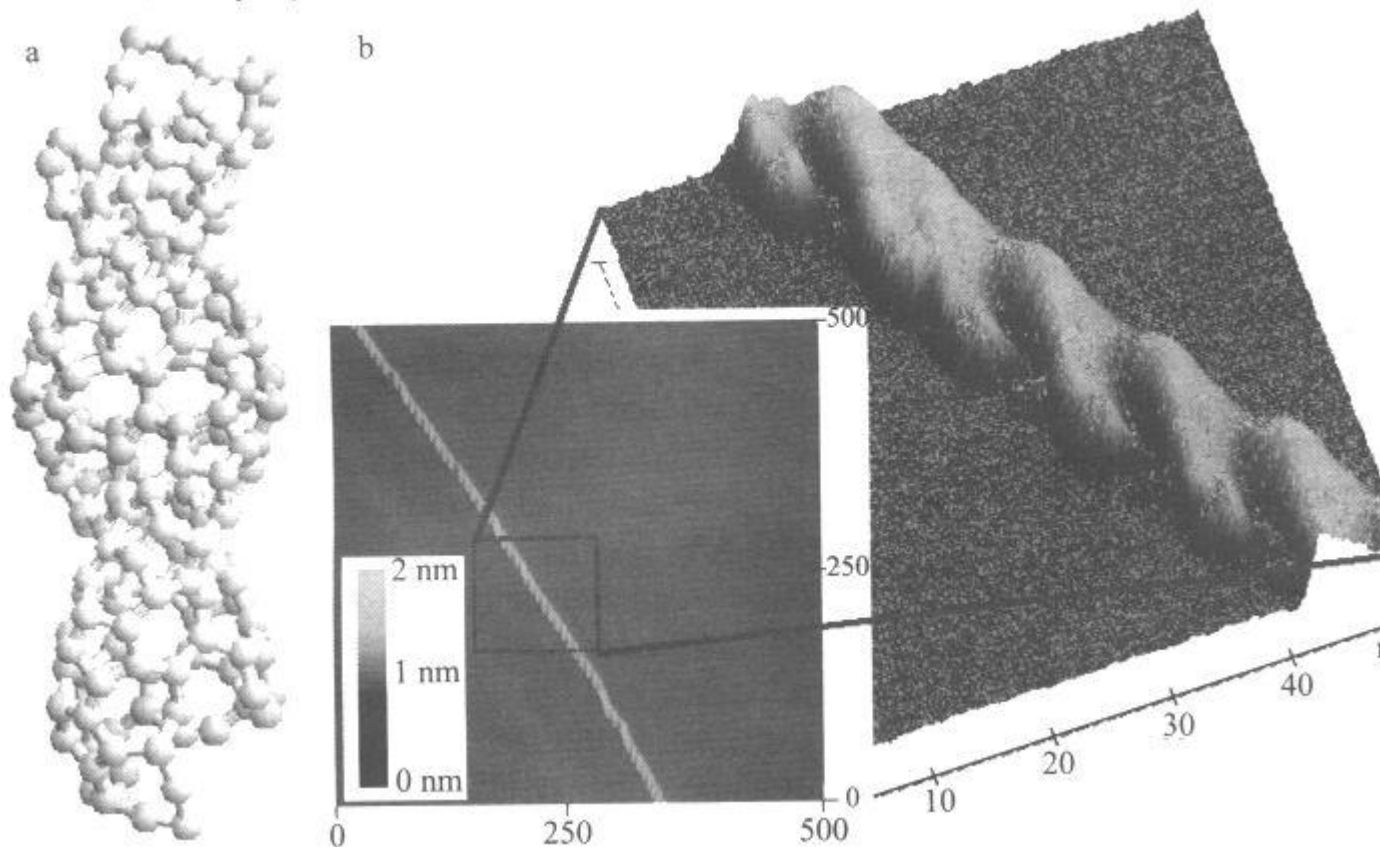


10. ábra. Könyökökből felépített nanocső-tórusz. A síkbeli ábrázolás jobb áttekinthetősége végett a tórusz síkjában „felébe vágott és kiterített” tórusz került ábrázolásra. Vékony fekete vonalak az egyes könyökök illesztéseit jelölik, míg a vastag szürke vonalak a könyököket alkotó öt- (fekete kitöltés) és hétszöget (szürke kitöltés) kötik össze.

A fotonikus kristály tiltott sávjába eső energiájú foton nem képes terjedni a szerkezetben, tökéletesen visszaverődik róla. Régóta ismert, hogy egyes kék és zöld színű lepkék - különösen azok, amelyek szárnya fémesen csillog (egyik legszélesebb körben ismert példát a Dél-Amerikában élő Morpho fajták adják) - nem pigmentációnak, hanem fizikai hatásoknak köszönhetik színüket [16]. Azt azonban csak az utóbbi években ismerték fel, hogy ezeknek a lepkéknek a pikkelyeiken található fotonikus kristály, jellemzően 100 nm méretű, három dimenzióban periodikus, kitinből felépülő finomszerkezet felelős a színért [17]. Magyarországon például (többek között) a kékszínű boglárkalepke hímjeinek színe tulajdonítható a pikkelyeiken jelenlévő fotonikus kristály típusú finomszerkezetnek. Ez a kék szín úgy keletkezik, hogy a fotonikus kristályszerkezet tiltott sávja a látható spektrum kék tartományába esik, így egyedül a kék fény nem képes behatolni a pikkely mélyebb rétegeibe, ahol a látható tartományba eső fényt elnyeli a melanin [18]. Érdekessége ennek a lepkecsaládnak, hogy az Iránban, mintegy 2500 méter magas hegyi réteken élő hím egyedek barnák (a barna szín a pikkelyeikben jelenlévő melaninnak tulajdonítható). Pásztázó elektronmikroszkópos és termikus mérésekkel igazoltuk, hogy a barna hímek pikkelyeiről

hiányzik a fotonikus kristályszerkezet ([12. ábra](#),) és azonos megvilágítási körülmények között másfélszer jobban felmelegednek, mint a tengerszint közelében élő társaik [\[18\]](#).

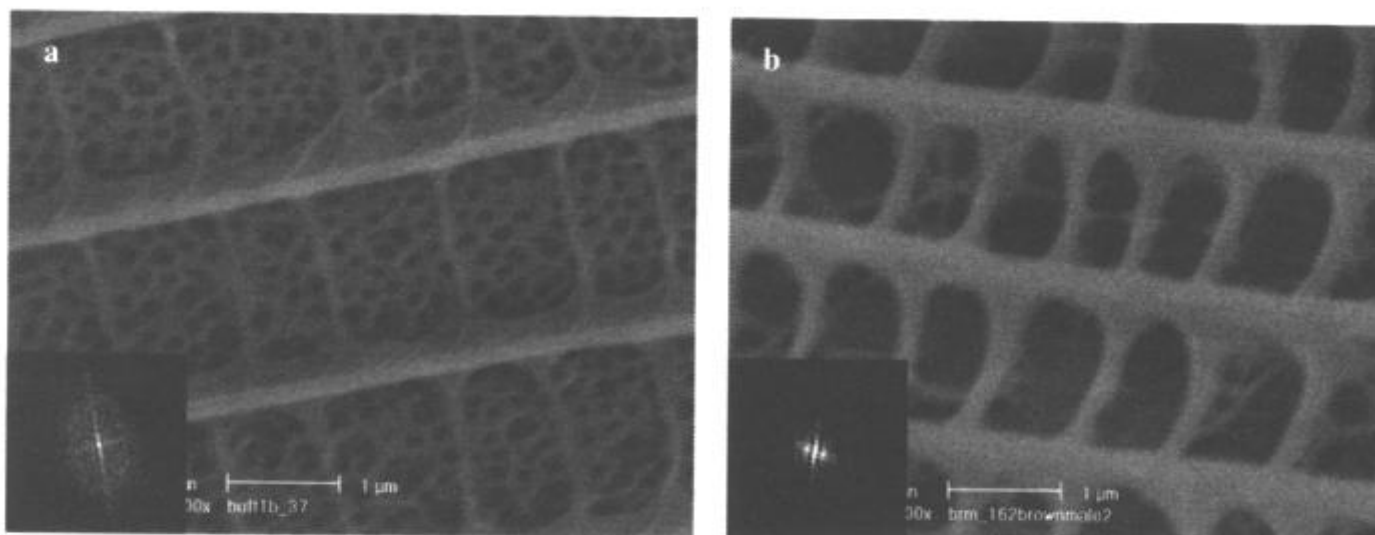
11. ábra. Szén nanocső-„duplaspirálról” készült szerkezeti modell és STM-felvétel: a) duplaspirál atomi szerkezete; b) duplaspirálról készült topográfiai STM-felvétel [14] nyomán.



Ezek az eredmények megmutatták, hogy: a) ugyanúgy, ahogyan a valós kristályokban (amelyek hibákat is tartalmaznak) megfigyelhető az elméleti szilárdtestfizika által megjósolt hatások többsége, a nem tökéletesen rendezett szerkezetekben is felléphetnek fotonikus kristály jellegű hatások; és b) a fotonikus kristály típusú szerkezetek szerepet játszhatnak a hőháztartást szabályozó folyamatokban, aminek a vizsgált példa esetében jelentős szerepe van a mostoha körülmények közötti túlélés elősegítésében.

A lepkék szárnyain megfigyelhető fotonikus kristályok a bebábozódott hernyó lepkévé alakulása során képződnek fehérjéből, a lepke bábból történt kibújása után néhány óra alatt megszilárdulnak, mineralizálódnak. Rendszerint bonyolult, háromdimenziós szerkezetek, melyek jellemzően 100 nm méretű elemekből épülnek fel. Ezek is olyan szerkezetek, amelyek nem faraghatók ki, s míg az egyfalú szén nanocsövek a nanovilág alsó határát adják, az ilyen méretű szerkezetek képeik e világ felső határát.





12. ábra. Boglárkalepkék pikkelyeiről készült pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) felvételek. a) tengerszint közelében élő kékszínű hím pikkelyein jól megfigyelhető a gerincek és az ezeket átkötő b... dák közötti „ablakokban” a kék színt adó fotonikus kristály csipkeszerű szerkezete; b) a magas hegye... ben élő barna színű hím pikkelyéről készült felvétel, jól megfigyelhető, hogy a csipkeszerű finomszer... zet csak nyomokban van jelen ([18] nyomán). Az ábrák bal alsó sarkában a felvételekről készült 2D Fo... rier-transzformált látható.

Nem kis meglepetést okozott nemrégiben, hogy szabályos "oszlopcsarnokként" növesztett szén nanocsövekkel borított felületen is fotonikus kristály jellegű hatásokat figyeltek meg [19]. Megfelelő elrendezés esetén kék színt visszaverő fotonikus kristály állítható elő. Ez a kísérleti eredmény csak megerősíti azt a meggyőződést, hogy "törpék világában" a fizika, kémia és biológia határai egymásba olvadnak.

## Irodalom

1. KÓNYA Z., BIRÓ L.P., HERNÁDI K., B. NAGY J., KIRICSI L: *Szén nanocsövek előállítás, tulajdonságai és alkalmazási lehetőségei* - Akadémiai Kiadó, Budapest, 2001.
2. T. HAMOUDA, J.R. BAKER, JR. - J. Appl. Microbiology 89 (2000) 397
3. <http://www.sandia.gov/media/NewsRel/NR2001/minirobot.htm>
4. <http://www.dailycal.org/article.asp?id=8090>  
<http://www.dailycal.org/article.asp?id=10951>
5. J.R. HEATH, P.J. KUEKES, G.S. SNIDER, R.S. WILLIAMS - Science 280 (1998) 1716
6. KÜRTI JENŐ: *A varázslatos szénatom*- Fizikai Szemle 47/7 (1997) 276
7. H.W. KROTO, J.R. HEATH, S.C. O'BRIEN, R.F. CURL, R.E. SMALLEY: - Nature (London) 318 (1985) 162
8. BRAUN T.: *Szénszférák Zenéje* - Akadémiai Kiadó, Budapest, 2000, 4. o.
9. S. IJIMA - Nature (London) 354 (1991) 56
10. L. FORRÓ, CH. SCHÖNENBERGER: *Physical Properties of Multi-wall Nanotubes* - in: Carbon Nanotubes: Synthesis, Structure, Properties and Applications (M.S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, Ph. Avouris szerk.), Springer, Berlin, 2001, 344. o.
11. Z.OSVÁTH A.A.KOÓS, Z.E.HORVÁTH, J.GYULAI, A.M.BENITO, M.T.MARTINEZ, W.K. MASER, L.P. BIRÓ - Chem. Phys. Lett. 365 (2002) 338
12. Z. YAO, H.W.CH.POSTMA, L.BALENTS, C. DEKKER - Nature 402 (1999) 273



13. G.E. SCUSERIA - Chem. Phys. Lett. 195 (1992) 534
14. L.P. BIRÓ, G.I. MÁRK, A.A. KOÓS, J.B. NAGY, PH. LAMBIN - Phys. Rev. B66 (2002) 165405
15. PH. LAMBIN, G.I. MÁRK, L.P. BIRÓ: -Phys. Rev. B67 (2003) 205413
16. H. GHIRADELLA - Appl. Opt. 30 (1991) 3492
17. P. VUKUSIC, J.R. SAMBLES, H. GHIRADELLA - Photonics Science News 6(2000) 61
18. L.P. BIRÓ, ZS. BÁLINT, K.KERTÉSZ, Z. VÉRTESY, G.I. MÁRK, Z.E. HORVÁTH, J.BALÁZS, D.MÉHN, I.KIRICSI, V.LOUSSE, J.-P.VIGNERON: - Phys. Rev. E67 (2003) 021907
19. K. KEMPA, B. KIMBALL, J.RYBCZYNSKI, Z.P.HUANG, P.F.WU, D.STEEVES, M.SENNETT, M.GIERSIG, D.V.G.L.N.RAO, D.L. CARNAHAN, D.Z. WANG, J.Y. LAO, W.Z. LI, Z.F. REN: - Nano Letters 3 (2003) 13
20. L.P. BIRÓ, S.D.LAZARESCU, P.A.THIRY, A.FONSECA, J. B.NAGY, A.A.LUCAS, P. LAMBIN - Europhys. Lett. 50 (2000) 494
21. L.P.BIRÓ, R. EHLICH, Z. OSVÁTH, A. KOÓS, Z.E. HORVÁTH, J.GYULAI, J.B. NAGY: - Mat. Sci. Eng. C19 (2002) 3

A tárgyalt témákkal kapcsolatos további anyagok találhatóak az MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutató Intézet Nanoszerkezetek Kutatása Osztály honlapján:

<http://www.mfa.ktki.hu/int/nano/>