

től való eltérése van ábrázolva. Látható, hogy a szórás körülbelül  $\pm 0,5$  magnitúdó. A nagyobb vöröseltolódásoknál kicsit több SN szerepel a görbétől fölfelé, mint lefelé, viszont a negatív irányba szóródó pontok eltérése nagyobb. Erre a kicsiny aszimmetriára alapul jelenleg a gyorsuló tágulás és a  $\lambda > 0$  kozmológiai állandó kimutatása [6]. A jelen tanulmánynak nem célja az ezzel kapcsolatos eredmények minősítése, az azonban megfontolandó, hogy a sokat idézett tudományfilozófiai kritérium, miszerint *an extraordinary claim requires extraordinary evidence*, a jelen kérdésben biztosan nem teljesül. Maguk az idézett szerzők is korrektül elismerik, hogy a jelenlegi ismereteinket tükröző SN-mintában még mindig sok a bizonytalansági tényező, ezért a kozmológiai következtéseknél fennáll a túlintertelés veszélye.

Összegzésként ugyanakkor elmondható, hogy a szupernóvák kapcsolatos ismereteink az elmúlt 10 évben nagyságrendekkel bővültek, ennél fogva bizonyos, hogy

a további kutatások számos, jelenleg még ismeretlen, illetve csak elnagyoltan ismert részletre derítenek majd fényt. Erre a legnagyobb esélyt a tervezett SNAP űrtávcső (SuperNova Acceleration Probe) jelentheti [7], melynek felbocsátása 2010 körül várható.

#### Irodalom

1. S. PERLMUTTER et al. – ApJ 517(1999) 565
2. A.G. RIESS et al. – AJ 116(1998) 1009
3. M.M. PHILLIPS – ApJ 413(1993) L105
4. A.G. RIESS, W.H. PRESS, R.P. KIRSHNER – ApJ 473(1996) 88
5. Referenciaképek közeli galaxisokról: <http://astro.u-szeged.hu/~sn/GX/index.html>
6. A.G. RIESS et al. – ApJ 607(2004) 665
7. SNAP űrtávcső honlapja: <http://snap.lbl.gov>
8. Szupernóva Kozmológia Projekt honlapja: <http://www-supernova.lbl.gov>
9. Fényes szupernóvák honlapja: <http://www.rochesterastronomy.org/snimages/>
10. Magyar szupernóva-észlelések: <http://titan.physx.u-szeged.hu/~sn/>

## SZÉN NANOCÖVEKEN ALAPULÓ SZELEKTÍV GÁZÉRZÉKELŐK

Koós Antal Adolf

MTA MFA, Nanoszerkezetek Osztály

A technikai fejlődés következtében egyre több automata, és ezzel együtt egyre több érzékelő vesz körül minket. Régóta használunk a szemünkönél vagy a fülünkönél jóval érzékenyebb fény-, illetve hangérzékelőket, segítségével a fény vagy a hang könnyen és egyértelműen jellemezhető. Ezzel szemben a gázérzékelők nehezen tudnak versenyre kelni az orrunkkal. A szagok azonosítására képes legkisebb és leggyorsabb „érzékelő” még mindig a kutya. Léteznek ugyan bizonyos gázokra érzékeny eszközök, de több gáz együttes jelenléte esetén kevés eszköz képes felismerni az összetevőket. Ezért az MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet (MTA MFA) több munkatársával célul tűztük ki egy könnyen használható, kisméretű, olcsó, gyors és szelektív gázérzékelő elkészítését. A gázérzékelést egy ígéretes anyag, szén nanocsövek segítségével valósítottuk meg [1–3].

Az egyfalú szén nanocsőhengerré tekert és tökéletesen illesztett, egyetlen atom vastagságú grafitos szerkezetű szénréteggént (grafén síkként) képzelhető el. A feltekerés egy lehetséges módját az 1. ábra szemlélteti.

A grafit síkot az 1. ábrán jelölt párhuzamos egyenesek ( $OB$ ,  $AB'$ ) mentén elvágjuk, majd az  $O$  és  $A$  pontot egymásra illesztjük. Az így keletkező nanocső jellemezhető az  $O$  és  $A$  pontot összekötő  $C_b = n\mathbf{a}_1 + m\mathbf{a}_2$  úgynevezett feltekerési vektor segítségével, ahol  $\mathbf{a}_1$  és  $\mathbf{a}_2$  elemi rácsvektorok,  $n$  és  $m$  egész számok [4]. A kísérleti adatok szerint az egyfalú szén nanocsövek jellemző átmérője az 1–2 nm tartományban van, hozzávetőlegesen tízszer nagyobb, mint a legközelebbi szomszéd szénatomok távolsága grafit esetén. A többfalú szén nanocsövek koncentrikusan egymásba épülő egyfalú csövekből állnak, a falak közötti távolság 0,339 nm. A többfalú szén nanocsövek jellemző átmérője néhányszor 10 nanométer.

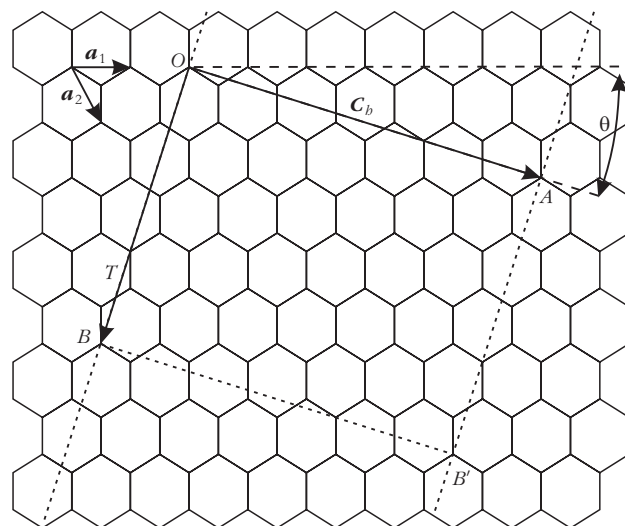
A grafén sík feltekerésének módjától függően különböző tulajdonságú nanocsövek keletkezhetnek [5]. Az elektronállapotok eloszlása szerint két esetet különböztetünk meg:

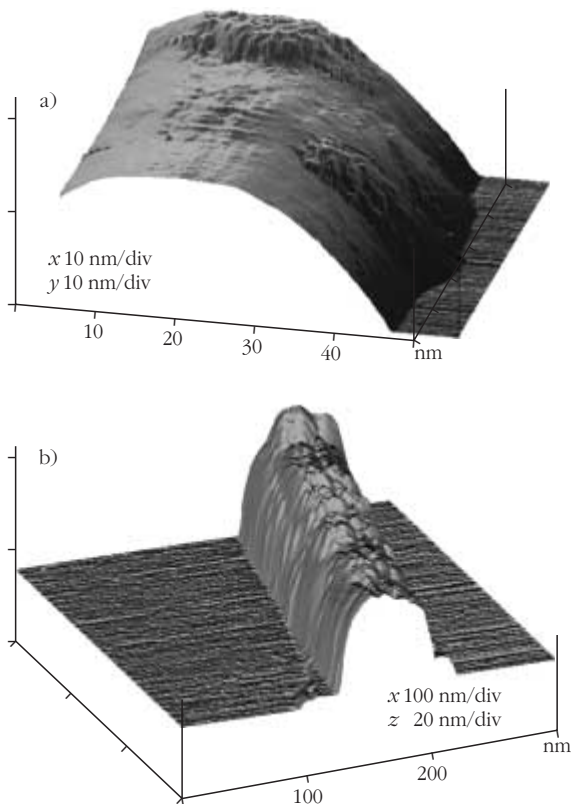
a) *fémesszén nanocsőről* beszélünk, ha a Fermi-energia környezetében minden energián a nanocső állapotűrűsége különbözik nullától, vagy

b) *félvezetőszen nanocsőről* beszélünk akkor, ha a Fermi-energia környezetében található egy tiltott sáv, amelyben a nanocső állapotűrűsége nulla.

A véletlenszerűen előállított nanocsövek egyharmada fémesszén, kétharmada félvezetőszen tulajdonságú. A félvezetőszen nanocsövek tiltott sávjának szélessége fordítottan arányos a

1. ábra. Egy kétdimenziós grafén sík a nanocsövek jellemzésére használt vektorokkal.





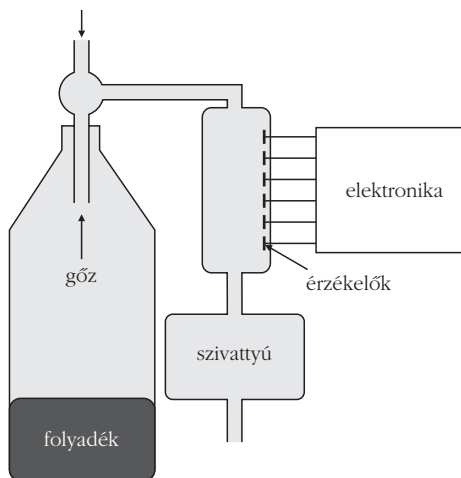
2. ábra. Funkcionalizált szén nanocsövek. a) golyósmalomban funkcionizált szén nanocsőről készült STM felvétel, jól megfigyelhető a funkciós csoportok „szigetszerű” elhelyezkedése; b) folytonosan funkcionizált szén nanocsőről készült STM felvétel.

nanocső átmérőjével. Ezeknek a tulajdonságoknak köszönhető, hogy kizárólag nanocsövek felhasználásával is lehetséges nanoelektronikai eszközöket (például fém–félvezető átmeneteket, azaz Schottky-diódát) készíteni [6]. A szén nanocső képes  $100 \mu\text{A}$  erősségű áramot vezetni, ami a cső geometriáját figyelembe véve rendkívül nagy,  $10^7 \text{Acm}^{-2}$  áramsűrűségnek felel meg [7]. Mai ismereteink szerint az egyfalú szén nanocső a legnagyobb szilárdságú anyag, Young-modulusa 1 TPa nagyságrendű. Ráadásul kémiaiilag stabil, agresszív kémiai kezeléseknek is ellenáll.

A szén nanocsövek egyedülálló geometriájuk, fizikai és kémiai tulajdonságaik miatt nagyon ígéretes objektumok gázok/gőzök érzékelése szempontjából is. A nanométeres tartományba eső átmérő, valamint az ebből adódó kvázi-egydimenziós elektronszerkezet folytán a falba épülő hibák, idegen atomok, kapcsolódó funkciós csoportok jelentősen módosíthatják az elektronszerkezetet és így a vezetési tulajdonságokat. Az egyfalú, félvezető szén nanocsövek vezetőképességét megváltoztathatják egyes, a környező légtérből fizisorbeált, vagy kemisorbeált molekulák, mint például  $\text{NO}_2$ , vagy  $\text{NH}_3$  [8], de számos más molekulára is vannak kísérleti adatok. Nemrégiben elméleti számítások is [9] alátámasztották, hogy szerves molekulák, mint például a benzol adszorpciója jelentősen megváltoztathatja az egyfalú szén nanocsövek vezetőképességét. Nanocsövek segítségével akár ppm (1 molekula az 1 millióból) gázkoncentráció is érzékelhető [10, 11]. Ugyanakkor meg kell jegyezni, hogy ezeket a kísérleteket ultrahagy vákuumban vagy ellenőrzött légkörben végezték,

azaz a mindennapi életben, ahol szobalevegőben kell valamilyen gázt/gőzt érzékelni, más érzékenységi határok várhatóak. Mivel a nanocső felületével érintkező légtérből fizisorbeált molekulák jelentősen befolyásolni tudják a szén nanocső tulajdonságait, lehetőség van a szén nanocsövek gázszenzorokként való alkalmazására szobalevegőben is. Az előállítás, illetve módosítás – például szándékosan létrehozott szerkezeti hibák, vagy specifikus érzékelő molekulák „lehorgonyzása” a cső külső felületén – különbözősége más és más molekulákra érzékeny nanocsöveket eredményezhet, így több, jól megválasztott nanocsőminta felhasználásával lehetőség nyílik a környezetben található gázok/gőzök felismerésére. Azaz, egy ilyen érzékelő képes „ujjlenyomatot venni” valamely detektálni kívánt gázzól/gőzről, majd a továbbiakban azonosítani annak jelenlétét a környezetben.

Csoportunk a kísérletezést a hazai és nemzetközi együttműködésekkel kezdte, valamint a saját előállítású szén nanocsövek vizsgálatával kezdte. Számos, különböző módszerrel készített és eltérő kémiai kezelésnek alávetett minta ellenállás-változását vizsgáltuk különféle gőzök, gázok jelenlétében. Célunk az volt, hogy megtaláljuk azokat az előállítási módszereket és kémiai kezeléseket, melyek segítségével az előre kiválasztott gőzökre szelektíven érzékeny nanocsövek állíthatók elő. A különböző gázok/gőzök szelektív érzékelése akkor valósítható meg, ha a felhasznált nanocsövek tulajdonságai (geometriájuk, elektromos tulajdonságaik, szerkezetbe épült hibák száma, a felülethez kapcsolt molekulák típusa és száma) különböznek. A vizsgált minták között volt egy- és többfalú szén nanocső, elektromos ívkisüléssel és szénhidrogének katalitikus bontásával előállított nanocső, kémiaiilag módosított és nem módosított nanocső is. Az egy- és többfalú szén nanocsövek a geometriai eltérések mellett elektromos szempontból is eltérően viselkednek. Mivel a vezetéssért többfalú szén nanocsövek esetén az egymásba épülő csövek közül elsősorban a külső, legnagyobb átmérőjű cső a felelős, és a félvezető csövek tiltott sávjának szélessége fordítottan arányos a nanocső átmérőjével, az általunk használt többfalú nanocsövek szobahőmérsékleten fémesen vezetnek. Ezzel szemben az egyfalú nanocsövek kétharmada félvezetőként viselkedik. Az elektromos ívkisüléssel előállított nanocsövek közel ideális szerkezetével szemben a szénhidrogének katalitikus bontásával előállított nanocsövek sok szerkezeti hibát tartalmaznak. A hibák jelenléte előnyös lehet, mert kapcsolódási pontot jelentenek a nanocsövek környezetében található gázok/gőzök számára. Kémiai kezelésekkal a nanocsövek felületéhez kovalens kötással kapcsolt molekulák – funkciós csoportok – jelentősen módosíthatják a nanocsövek elektromos tulajdonságait [12]. Ez lehetőséget ad az adott alkalmazásnak legjobban megfelelő elektromos tulajdonságú szén nanocsövek előállítására, és várhatóan rendkívüli módon kiterjeszti azoknak az anyagoknak a körét, amelyek kimutathatóak szén nanocső alapú gázérzékelőkkel. Két funkcionizált nanocsőcsaládot vizsgáltunk. Az első mintacsalád golyósmalomban, reaktív gázban végzett őrléssel készült. Ebben az esetben a malom által létrehozott szabad kötésekhez kapcsolódtak a gázatomok [13]. Az őrlés során csökken a nanocsövek átlagos hosszúsága és a



3. ábra. A mérőberendezés elvi vázlata

hibahelyekhez „szigetesen” kapcsolódnak funkciós csoportok. Egy golyósmalomban funkcionális szén nanocső pártázó alagútmikroszkópos (STM) képe a 2.a ábrán látható. A második mintacsald esetén egy savas kezelés szakította fel a C–C kötések egy részét, és biztosított kapcsolódási pontot a funkciós csoportok számára a következő kezelése során [12]. Ezzel a módszerrel több kapcsolódási pontot lehet létrehozni a nanocsövek felületén, mint őrlessel. Jól megválasztott kezelés esetén a „szigetek” összeérnek és a nanocső felületét folytonos funkciós csoport réteg borítja [14]. Egy folytonosan funkcionális szén nanocsőről készült STM kép látható a 2.b ábrán. A funkcionális nanocsöveket Kiricsi Imre professzor csoportja készítette a Szegedi Tudományegyetem Alkalmazott és Környezeti Kémiai Tanszékén.

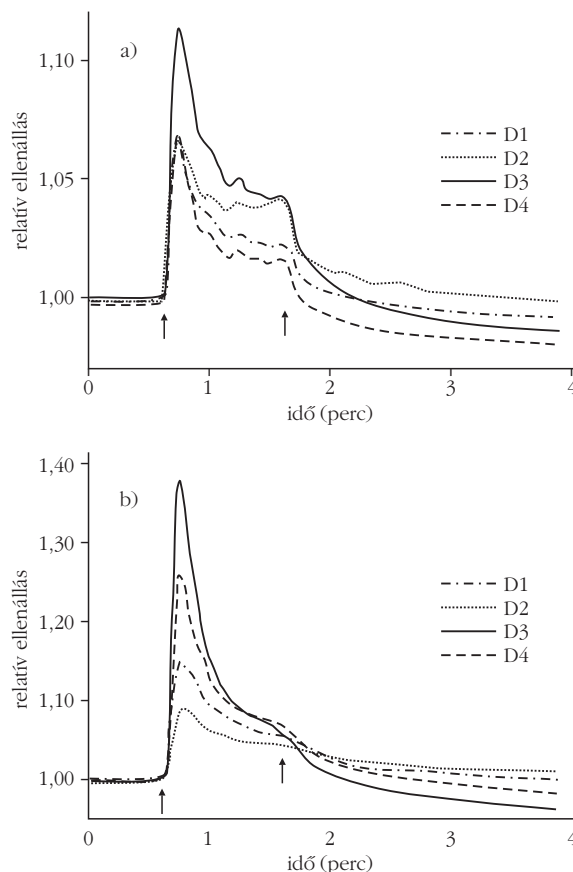
Makroszkopikusan a szén nanocsövek fekete, vattaszerű anyagként jelennek meg, kivételt képeznek azok az esetek, amikor a fizikai, kémiai hatások (tisztítás, funkcionálás stb.) hatására a nanocsövek „göngyökké” állnak össze. A nanocsövek elhelyezése a kívánt helyre fontos és gyakran nehéz feladat. A leggyakrabban alkalmazott és egyben legegyszerűbb módszer az, ha valamilyen illékony szerves oldószerben (alkohol, toluol, acetone stb.) ultrahangos rázással megfelelő koncentrációjú szuszpenziót hozunk létre a szén nanocsövekből. A gázérzékelőket etanolos nanocső-szuszpenzió ellenőrzött ülepítésével állítottuk elő.

Igyekeztünk olyan tesztfeltételeket alkalmazni, amelyek a lehetőségek szerint minél inkább közelítik a valós munkakörülményeket. Tekintettel arra, hogy a kifejlesztett érzékelők legvalószínűbb munkaközege a levegő, a méréseket szobalevegőn végeztük. A gázérzékelést nanocsőhálózatok elektromos ellenállásának folyamatos mérésével valósítottuk meg. A nanocsövek felületére, illetve az ezen a felületen lehorgonyzott funkciós csoportokra fizisorbeált molekulák hatására megjelenő ellenállás-változást követtük figyelemmel. A detektorokat mérőkamrában helyeztük el, és membránszivattyú segítségével áramoltattuk át a szoba levegőjét, illetve a mérendő gázt/gőzt is tartalmazó szobalevegőt (3. ábra). A detektorok ellenállását egy erre a célra tervezett és megépített elektronika és LabView felületre írt saját szoftver értékelte ki. Lehetőség van arra, hogy párhuzamosan több

csatornán mérjünk, és így azonos körülmények között vizsgáljuk különböző nanocsőhálózatok viselkedését. A detektorokat áramgenerátorral hajtottuk meg és mértük a feszültségesést, így kiszámítható a detektor ellenállása. Mivel a mérendő nanocsőrészek ellenállása a különböző előállítási módszerek és kémiai kezelése miatt több nagyságrenddel is eltérhet, az elektronikát úgy kellett kialakítani, hogy többféle, 1, 10 vagy 100  $\mu\text{A}$  értékű áramot kapcsolhassunk minden vizsgált detektorra. A jeleket egy 12 bites analóg/digitális mintavevő kártya segítségével számítógépen dolgozzuk fel. A méréshez kifejlesztett szoftver képes valós időben feldolgozni és grafikus felületen megjeleníteni a mért adatokat.

Tapasztalataink szerint szinte minden nanocsőminta reagált szinte minden gőzre, de nagyon eltérő mértékben. Egy előzetes felmérés után kiválasztottunk 25 különböző mintát, melyek egymástól eltérő módon reagáltak a kiválasztott gőzökre, majd ezek stabilitását és ellenállás-változását részletesen vizsgáltuk etanol, acetone, toluol, víz, pentán, benzol, xilol, triklór-etilén, butilacetát, ecetsavoldat, ammónia és kloroformgőz jelenlétében. A mérés folyamán állandó sebességgel áramoltattunk levegőt vagy levegő-gőz keveréket az érzékelő fölött. A mérés kezdetekor szobalevegőt áramoltattunk és elektronikusan normáltuk az ellenállások értékét. A normálás segítségével kiküszöböltük a levegő hőmérséklet- és páratartalom-változása miatt megjelenő lassú ellenállás-változást. Egy perc után kicseréltük a levegőt a mérendő gőz és levegő keveréké-

4. ábra. Kiválasztott detektorok ellenállás-változása a) etanol és b) acetone esetén.



re, majd újabb egy perc elteltével ismét visszakapcsoltuk a szoba levegőjét. Négy kiválasztott detektor ellenállás-változása etanol és acetone esetén a 4. ábrán látható. D1 és D4 SHCH<sub>3</sub>, illetve Cl<sub>2</sub> légkörben tört, katalitikus bontással előállított többfalú szén nanocsövet; D2 elektromos ívkisüléssel előállított egyfalú nanocsövet; D3 pedig elektromos ívkisüléssel víz alatt előállított többfalú nanocsövet jelöl. A görbék alakját a vizsgált gőz abszorpciója és deszorpciója határozza meg, de a korábban vizsgált gőz deszorpciója miatt megjelenő lassú ellenállás-csökkenés is látható. A mérések előtt szobahőmérsékleten, 1 liter térfogatú edényben állítottuk elő a vizsgált folyadék telített gőzét, majd ezt a gőzt szívtuk a detektorra. A szívás eredményeként levegő áramlik a gőz helyére, ezért a mérés alatt csökken a vizsgált gőz koncentrációja, ami a detektor ellenállásának csökkenéséhez vezet.

Jól megválasztott, párhuzamosan működő detektor-sorozat esetén a különböző gázokra különböző relatív ellenállás-változás kombinációt kapunk. Ha a mérésvezérlő elektronikát ismert gőzök felhasználásával „betanítjuk” (kalibráljuk, azaz „ujjlenyomatot” veszünk), akkor az elektronika képes lesz arra, hogy a detektor-sorozat ellenállásainak változásából azonosítsa az ismeretlen gőzt. A tipikus felismerési idő a 20–30 másodperc tartományban van, ami igen jelentős előnye a szén nanocső alapú detektoroknak a klasszikus detektorok jóval hosszabb válaszidejével szemben.

## Összefoglalás

Megvizsgáltuk több, eltérő tulajdonságú szén nanocsőhálózat elektromos ellenállását különböző gőz/levegő keverék jelenléte esetén és kiválasztottuk azokat a nanocsöveket melyek egymástól eltérő módon reagáltak a vizsgált gőzökre. Több nanocsődetektor egyidejű vizsgálatával azonosítható a készülékbe vezetett gőz, azaz sikerült szén nanocső-érzékelővel működő „mesterséges orr” prototípusát létrehozni.

A tárgyalt témákkal kapcsolatos további anyagok találhatók az MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet Nanoszerkezetek Osztály honlapján: <http://www.mfa.kfki.hu/int/nano/> és <http://www.nanotechnology.hu>

## Irodalom

1. KÓNYA Z., BIRÓ L.P., HERNÁDI K., NAGY J.B., KIRICSI I.: *Szén nanocsövek előállítása, tulajdonságai és alkalmazási lehetőségei* – A Kémia Újabb Eredményei, 90. kötet, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2001.
2. M.S. DRESSSELHAUS, G. DRESSSELHAUS, PH. AVOURIS: *Carbon nanotubes, synthesis, structure, properties, and applications* – Springer-Verlag Berlin–Heidelberg, 2001.
3. KÜRTI J.: *A varázslatos szénatom* – Fizikai Szemle 4/7(1997) 276
4. M.S. DRESSSELHAUS, G. DRESSSELHAUS, R. SAITO: *Physics of carbon nanotubes* – Carbon 33 (1995) 883–891
5. BIRÓ L. P.: *Nanovilág: A szén nanocsőtől a kék lepkeszárnyig* – Fizikai Szemle 53/11 (2003) 385
6. S. HEINZE, J. TERSOFF, R. MARTEL, V. DERYCKE, J. APPENZELLER, PH. AVOURIS: *Carbon nanotubes as Schottky barrier transistors* – Phys. Rev. Lett. 89 (2002) 106801
7. Y. ANDO, X. ZHAO, H. SHIMOYAMA, G. SAKAI, K. KANETO: *Physical properties of multiwalled carbon nanotubes* – Int. J. Inorg. Mat. 1 (1999) 77–82
8. J. KONG, N.R. FRANKLIN, C. ZHOU, M.G. CHAPLINE, S. PENG, K. CHO, H. DAI: *Nanotube molecular wires as chemical sensors* – Science 287 (2000) 622–625
9. A. PECCHIA, M. GHEORGHE, A. DI CARLO, P. LUGLI: *Modulation of the electronic transport properties of carbon nanotubes with adsorbed molecules* – Synth. Metals 138 (2003) 89–93
10. C. CANTALINI, L. VALENTINI, I. ARMENTANO, L. LOZZI, J.M. KENNY, S. SANTUCCI: *Sensitivity to NO<sub>2</sub> and cross-sensitivity analysis to NH<sub>3</sub>, ethanol and humidity of carbon nanotubes thin film prepared by PECVD* – Sensors and Actuators B 95 (2003) 195–202
11. F. PICAUD, R. LANGLET, M. ARAB, M. DEVEL, C. GIRARDET, S. NATARAJAN, S. CHOPRA, A.M. RAO: *Gas-induced variation in the dielectric properties of carbon nanotube bundles for selective sensing* – J. Appl. Phys. 97 (2005) 114316
12. I. KIRICSI, Z. KÓNYA, K. NIESZ, A.A. KOÓS, L.P. BIRÓ: *Synthesis procedures for production of carbon nanotube junctions* – Proceeding of SPIE 5118 (2003) 280–287
13. Z. KÓNYA, I. VESSELENYI, K. NIESZ, A. KUKOVECZ, A. DEMORTIER, A. FONSECA, J. DELHALLE, Z. MEKHALIF, J. B. NAGY, A.A. KOÓS, Z. OSVÁTH, A. KOCSONYA, L.P. BIRÓ, I. KIRICSI: *Large scale production of short functionalized carbon nanotubes* – Chemical Physics Letters 360 (2002) 429–435
14. A.A. KOÓS, Z.E. HORVÁTH, Z. OSVÁTH, L. TAPASZTÓ, K. NIESZ, Z. KÓNYA, I. KIRICSI, N. GROBERT, M. RÜHLE, L.P. BIRÓ: *STM investigation of carbon nanotubes connected by functional groups* – Materials Science and Engineering C 23 (2003) 1007–1011

# BESZÉLGETÉS TELEGDI BÁLINTTAL

(1922. január 11., Budapest – 2006. április 8., Pasadena, Kalifornia)

Hargittai Magdolna

MTA–ELTE, Szerkezeti Kémiai Kutatócsoport

*Telegdi Bálint* fizikus a Magyar Tudományos Akadémia tiszteleti tagja (1990). A Chicagói Egyetemen volt „Enrico Fermi professzor”, a Zürichi Műegyetemen (ETH) emeritus professzor, élete utolsó éveit részben a genfi CERN-ben, részben a Kaliforniai Műegyetemen (Caltech) töltötte. A fizikai Wolf-díjat 1991-ben kapta meg *Maurice Goldhaber*-rel megosztva. Tagja volt többek között az USA Nemzeti Tudományos Akadémiájának, a londoni Royal Society-nak, az Academia Europaea-nak, a Királyi Svéd Tudományos Akadémiának és az Orosz Tudományos Akadémiának.

Elsősorban kísérleti fizikus volt, de írt elméleti fizikai cikkeket is. Legfőbb eredményei között említeni kell a következőket. A müonbomlásban az elsők között bizonyította kollégájával, *Jerome Friedmann*-al, a paritásértést. Egy másik kísérlete a „g-2” kísérlet, amit a CERN-ben végzett, *Richard Garwin*-nal együtt. Ezzel a kísérlettel meghatározták a müon mágneses tulajdonságait és bebizonyították, hogy a müon nem más, mint egy nehéz elektron. A müon más tulajdonságainak meghatározásában is alapvető eredményeket ért el. Fontos eredményé-