

# OTKA - hónap kutatója, 2009 szeptember

2009.09.22. | **HÍREK**

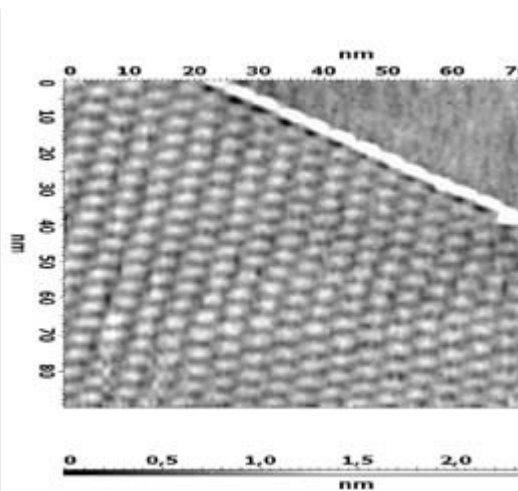
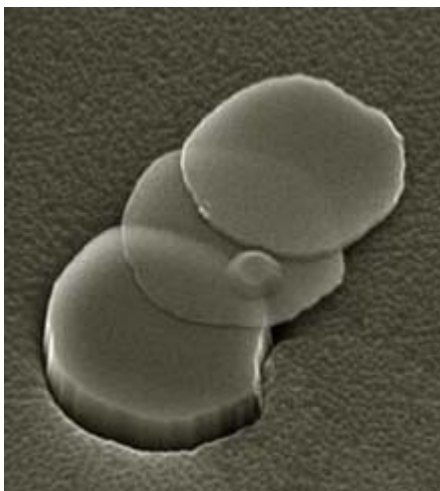


**Cserti József az ELTE Komplex Rendszerek Fizikája tanszékének habilitált docense. Mezoszkopikus (mikronos méretű) rendszerek, szupravezető-normál rendszerek kvantumos leírásán dolgozik, spintronikai effektusok és a grafén tulajdonságait tanulmányozza. Jelenleg "Spintronika és grafén nanoszerkezetek" című projektjét támogatja az OTKA és egy nagy összegű pályázatnak is társkutatója.**



- A grafit szó ismerősen cseng, de mi az a grafén?

- A grafént a grafitból készítik - abból az anyagból, amit a közönséges ceruzában is használunk. Sokáig csak reménykedtek abban, hogy a grafitból le tudják választani ez az egyetlen atom vastagságú réteget, amelyik külön nevet is kapott. Végül egy manchesteri kutatócsoport 2004 második felében, október táján mégiscsak izolált néhány mikrométer nagyságú grafénlapkákat a grafitból, amelyben a szénatomok méhsejthez hasonló szerkezetben rendeződnek.



30 réteg grafénlapka és néhány réteg elektronmikroszkóppal "nézve"  
(Huhn Andrásné felvétele)

- Mi volt a trükkjük?

- A módszer döbbenetesen egyszerű, ezért nagyon földobta a kutatóvilágot. Vettek egy celluxot, erre rátették a

grafitot, és a cellux segítségével egyre több és több réteget választottak le. A műveletet addig ismételték, amíg nagyon vékony lapkához nem jutottak, amelyek már csak néhány vagy néhány tíz atomrétegből álltak. A szemcséket egy szilícium-dioxid lapra tették, és közönséges mikroszkóppal megnézték őket. Annak a darabnak, amelyikben csak egy réteg van, más a kontrasztja, ezért szabad szemmel is elkülöníthető a többitől. De ez nem könnyű feladat, kicsit olyan, mintha tűt keresnénk a szénakazalban. Végül kiszemezték az egyrétegű lapkákat.

Ezek után elektromos kontaktusokat tettek a graféndarabkákra, mert az ilyenfajta anyagok vizsgálatában alapvető, hogy mágneses térbe helyezve hogyan viselkednek, milyen a vezetőképességük, mekkora az ellenállásuk. És a grafénben egészen más típusú vezetést észleltek, mint például a szilíciumalapú félvezetőkben!

- Számítottak erre? Egyáltalán, miért törekedtek a grafén előállítására?

- Már az ötvenes évek elején világossá vált, hogy az egyrétegű grafénből föl lehet építeni a teljes grafitot, és ha meg akarjuk érteni a grafit elektromos tulajdonságait, akkor a grafénből kell kiindulni. Tehát a grafén, mint az elméleti vizsgálatok tárgya, nem volt ismeretlen, sőt az egyetemi előadásokon is szerepelt - csak előállítani nem sikerült korábban. Végül is két áttörésszerű esemény történt: az egyik a grafén izolálása, a másik a grafén elektromos tulajdonságainak kimutatása mágneses térben és mágneses tér nélkül - ekkor derült ki, hogy a grafénben az elektronok teljesen másképp viselkednek, mint például a grafitban.

- Mi a különbség?

- Amikor az elektronok a grafénben mozognak - egyik atomról a másikra "ugrálnak" -, az energiájuk másképpen függ az impulzusuktól, mint a "hagyományos" elektronoké. A hagyományos elektron energiája az impulzus négyzetével arányos, itt viszont magával az impulzussal. Emiatt a grafénbeli elektron nagyon emlékeztet egy zérus tömegű, relativisztikus (fénysebességű) elektronra, amelyet Dirac írt le. Ez az elméletileg megállapított és most már kísérletileg is igazolt viselkedés számos olyan következménnyel jár, amely mérhető.

- Például ha mágneses térbe teszem az anyagot, és megnézem a vezetőképességét vagy az ellenállását, akkor az ún. kvantum Hall-effektus jelensége lép fel. Hall közönséges fémen végezte el a mérést, és azt tapasztalta, hogy a "Hall-ellenállás" arányos a mágneses tér nagyságával. Körülbelül száz évvel később, egy Nobel-díjjal elismert kutatásban megállapították, hogy félvezetőkben, bizonyos nagyságú (kb. 1 tesla fölötti) mágneses térben a Hall-ellenállás értéke nem követi a Hall által megfigyelt viselkedést. A vezetőképességben lépcsőszerűen platók jelennek meg, ezeken a vezetőképesség állandó, és értéke egy univerzális fizikai állandó egész számú többszöröse. A jelenség nagyon pontosan megmutatkozik a hagyományos félvezetőkben, amelyekben az elektron energiája az impulzus négyzetével arányos, de a grafénben, ahol az energia lineárisan változik az impulzussal, kicsit mást várunk. Valóban, itt is fellépnek platók a vezetőképességben, és a szekvenciák egész számú többszöröse az univerzális értéknek, de a plató el van tolódva. Ez volt ez első bizonyítéka annak, hogy a grafénben az elektron úgy viselkedik, mintha relativisztikus elektron lenne.

- Ez formális megfeleltetés?

- Igen. Csak a rendszert leíró fizika az, ami matematikai szempontból olyan, mint amit a relativisztikus elektronra kidolgoztak. A grafénben az elektron, miközben a szomszédos szénatomok között ugrál, olyan kölcsönhatásba kerül, hogy végül az energiája arányos lesz az impulzusával. De nem relativisztikus; a sebessége csak háromezred része a fényének.

- Milyen alkalmazásai lehetnek ennek a rendszernek?

- Elsőként azt kell megemlíteni, hogy a szilíciumot, amelyet az elektronikában ma mindenhol használjuk, esetleg

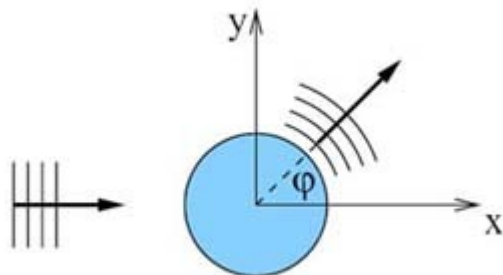
le tudnánk cserélni a grafénre - és akkor "új szénkorszak" következhetne be.

- Ez milyen haszonnal járna?

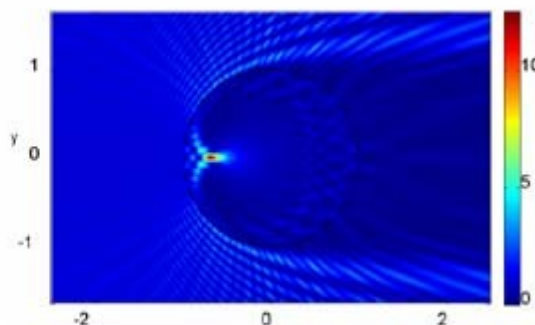
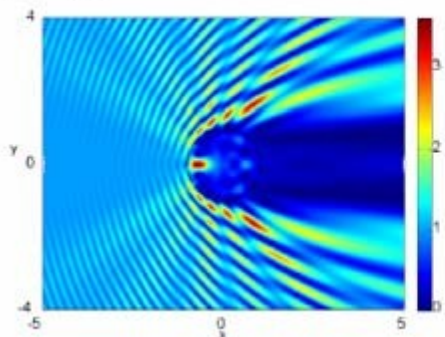
- Sokkal nagyobb áramot továbbíthatnánk; a grafénlapka mechanikailag nagyon stabil; az elektron nagy utat tud megtenni a grafénben anélkül, hogy szóródna, mert kevés szennyező van a lapkában, és lerövidülne a kapcsolási idő, mert az elektron gyorsan mozog - ez nyilván felgyorsítaná a számítógépeket. Persze, az álmódosításokban megjelent a kvantumszámítógép is, de ami már működik, az a gázmolekulákat érzékelő kémiai szenzor. Ennek az alapja nagyon egyszerű, hiszen a gázatomok "ráragadnak" a grafénlapkára, amelynek már nagyon kevés gázatomtól is megváltozik a vezetőképessége. A kísérletekben a világ eddigi legpontosabb érzékelőjét sikerült megvalósítani, de a gyártását még nem dolgozták ki. A grafén feltehetően a hidrogén tárolására is alkalmazható, nagy mennyiségű hidrogént tudna megkötni.

Elméleti úton már vizsgálták, hogy mi történik, ha a grafénhez szupravezető anyagot illesztünk hozzá. Ekkor is megváltozik az a viselkedés, amit korábban tapasztaltunk, amikor "hagyományos" anyagot érintettünk a szupravezetőhöz. Ha a szupravezetőhöz érkező elektron belép a szupravezetőbe, egy "lyuk" pattan vissza. Hagományos anyag esetén a lyuk ugyanabba az irányba pattan vissza, ahonnan az elektron érkezett, a grafénbe úgy is visszapattanhat, mint a biliárdasztalról a golyó. Itt új fizika jelenik meg, és már elvégezték az első kísérleteket is.

Egy lancasteri kutatócsoport nagyon érdekes dolgot vetett fel. Tudjuk, hogy két különböző törésmutatójú anyag határán a fény terjedési iránya megtörik, és a fény a Snellius-törvényt követve halad tovább. Ha a grafén egyik részén kicsit megváltoztatjuk a potenciált, mondjuk, több elektront viszünk oda egy kontaktuson keresztül, és ezzel potenciálfalat, potenciálgátat emelünk, akkor a ferdén odaérkező elektron pályája is hasonlóképpen megtörik - azzal a különbséggel, hogy a Snellius-törvényben megjelenő törésmutató negatív. A grafénban kialakuló elektronoptika ezért új perspektívát nyithat. Egy széttartó fénysugarat például a "grafénoptikával" fókuszálhatunk. Az MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézetében dolgozó Bíró László Péter csoportja szintén vizsgál negatív törésmutatójú jelenségeket - úgynevezett fotonikus kristályokon, például a lepkeszárnyon -, nemrégiben pedig nagyon sikeres cikkben mutatták meg, hogyan lehet olyan graféncsíkokat készíteni, amelyek széleit nanométer pontosan megtervezik, mintha ollóval szabnák egyenesre.



$n = -0.7$



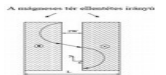
Különböző hullámhosszú síkhullámok szóródása negatív törésmutatójú "grafén"-lencsén, a számítások szerint

- Mi lehet a különleges optikai viselkedés magyarázata?

- Egy svéd fizikus, Oskar Klein nyolcvan évvel ezelőtt, a Dirac-egyenletet tanulmányozva, megállapította, hogy az elektronok egy potenciálgáton akadály nélkül (1 valószínűséggel) is át tudnak jutni mégpedig úgy, hogy pozitronná alakulnak át. Ezen mindannyian megdöbbenünk, mert a potenciálgátról megszoktuk, hogy az elektron alagúteffektussal juthat csak át rajta, és a potenciálgát nagyságával exponenciálisan csökken az áthatolás valószínűsége. Ennek még így is örülünk - a közönséges konnektor emiatt működik. Hiszen amikor bedugjuk a villásdugót a konnektorba, akkor az elektron egy potenciálgátat "érez", mert ott van egy oxidréteg meg egy rés, és ezen a potenciálgáton át kell haladnia: ezt az alagúteffektus teszi lehetővé. A kvantummechanika egyik legeklebtársabb példája, amely a mindennapi életünkben megvalósul, a közönséges konnektor. Az elektron áthaladásának valószínűsége nagyon kicsi, és még ez is elég ahhoz, hogy működjön a vasaló. De a relativisztikus elektronok, amelyeket a Dirac-egyenlet ír le, akár 1 valószínűséggel is átjuthatnak. Ezt a jelenséget a furcsasága miatt később Klein-paradoxonnak nevezték el. És most visszatérhetünk a grafénre.

- A grafénbeli elektronokról, ugye, kiderült, hogy zérus nyugalmi tömegű relativisztikus elektronoknak tekinthetők két dimenzióban, ezért ha a potenciálgáthoz érnek, várhatóan 1 valószínűséggel átjuthatnak. A számítások azt mutatják, hogy ha az ilyen elektron merőlegesen ér a potenciálgát felületére, akkor 1 valószínűséggel átmegy. Ha kicsit ferdén, akkor csökken ez a valószínűség. Ennek van egy nagyon fontos következménye. Ha az elektronokat be akarom terelni egy olyan tartományba, amelynek a szélein nagy a potenciál, akkor a hagyományos elektronoktól azt várom, hogy bezáródnak ebbe a tartományba, és nem tudnak belőle kimenni a potenciálfal miatt. A grafén elektronja nem érzi ezt a falat, tehát nem tudom elektrosztatikusan bezárni. Ezért például, ha egy szennyezőhöz ér, kevésbé érzékeli, így az elektrosztatikus szennyezőkön való szórás kisebb lesz. Ebből a paradox viselkedésből következik a negatív törésmutatónak megfelelő törési jelenség is. Mivel grafénben az elektront nehéz elektrosztatikusan bezárni, próbálkozzunk mágneses térrel! Nemrégiben mi vizsgáltuk először, hogyan lehetne "kígyóállapotokat" létrehozni.

## Kígyóállapot kialakulása



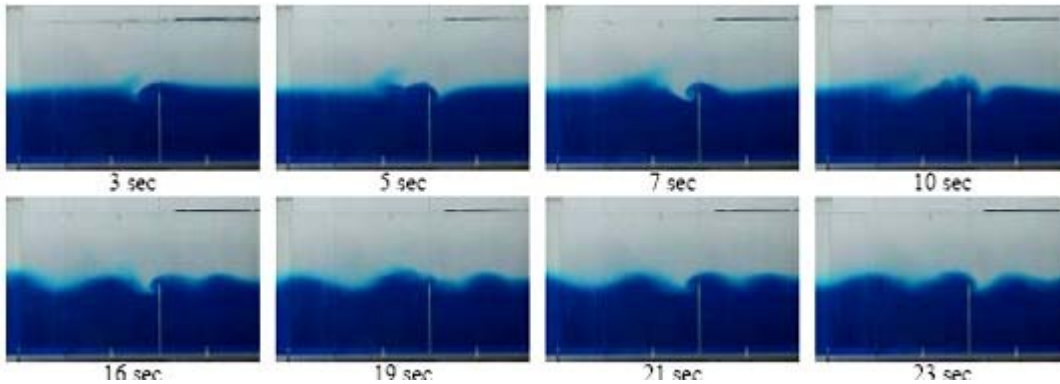
Mágneses térben az elektron körpályán mozog. Ha a mágneses tér iránya ellentétesre vált, az elektron keringési iránya megfordul, és így létrejöhet egy kígyószerű mozgás annak a vonalnak a mentén, ahol a mágneses tér iránya előjelet vált. Az előbb beszéltünk róla, hogy a grafén elektronjait elektrosztatikusan nem tudjuk beterelni egy tartományba, mert a Klein-paradoxon miatt "kiszivárognak". A mi ötletünk az, hogy mágnesesen, kígyóállapotban, be tudnánk őket szorítani egy tartományba (az ábrán abba részbe, ahol nincs mágneses tér). Egyelőre még kísérleti megvalósítást nem láttam, de mások is érdeklődnek az elképzelésünk iránt.

- Az ELTE középiskolásoknak szóló fizikasorozatának, amelyre a bevezetőben utaltunk, ön az egyik motorja. Arra szeretném kérni, hogy mutassa be ezt az izgalmas kezdeményezést.

- 2005-ben, "a fizika évében", egy intézeti ülésen fölvetődött, hogy több diákot szeretnénk megnyerni az ELTE fizikushallgatójának. Arra gondoltam, mi is elindíthatnánk egy sorozatot a Mindentudás Egyeteméhez hasonlóan. Vállaltam a szervezést, és december elején megtartottuk az első előadást. Az idén indul "Az atomoktól a csillagokig" ötödik évfolyama.

A tanév alatt kéthetente van előadásunk. (A közbülső heteken néhány éve a Kémiai Intézet [Alkímia ma](#) sorozata fut.) Az előadás körülbelül egyórás, és egy 15-20 perces kísérleti bemutató követi. Ez általában nagyon látványos - még én is meg szoktam lepődni, hogy mennyi érdekesség van a fizikában. A kollégák a legaktuálisabb kutatási

eredményeiről számolnak be - középiskolás szinten. Előadónak nemcsak professzorokat kérek fel, hanem doktoranduszokat is, mert meg akarom mutatni, hogy nálunk nem "feudális" kapcsolat van az oktatók és a diákok között, hanem valódi együttműködés. Sőt, időnként a tudományos diákköri konferencia résztvevői is beszélhetnek a munkáikról: hadd lássák a középiskolások, hogy itt az egyetemi hallgató is rész vehet a kutatásokban.



Egy előadás képei. Tólongás szimulációja

- Az intézetben folyó munka és a fizika szépségeinek bemutatása mellett érzékeltetni szeretnénk, hogy a fizika nem feltétlenül az a száraz tudomány, amit a középiskolában megszoktunk. Ha kérik, az oktatóink szívesen elmennek az iskolákba is.

- Eleinte nagyon sokan érdeklődtek a sorozat iránt, de most is van rendszeresen 40-50 hallgatónk. Örömmel látok közöttük egyre több olyan felnőttet, akinek semmi köze sincs az oktatáshoz.

- Remélem, hogy az "Atomcsill" jövőre új elemekkel bővül. Szeretnénk például nagyobb hangsúlyt fektetni a reklámtevékenységre. A kísérletezés óriási lehetőségeket rejt magában. Nem azon a tanszéken dolgozom, ahol a tanár szakosok demonstrációs kísérleteit mutatják be az oktatók, de most, amikor jobban megnéztem a laborokat, rengeteg érdekes kísérleti eszközt láttam.

- Elképzelhető, hogy a hallgatóság is kísérletezik majd?

- Az sem kizárt. Egyszer az egyik lelkes diák odajött hozzám az előadás után, és megkérdezte, nem csinálhatna-e ő is egy kísérletet a következő alkalommal. Természetesen támogattam az ötletét. Azóta sokat beszélgettünk, és nagy örömeinkre most az ELTE fizikus szakára jelentkezett.

Van egy totó is az előadás után. Három kérdést teszünk föl az előző előadás témaköréből. (Minden kérdésre három válasz van, egy jó és két rossz.) Annak, aki a legtöbb találatot éri el, jutalmat adunk. Ez nagyon tetszik a hallgatóságnak. Mostantól igyekszünk előre föltenni a kérdéseket a honlapra, hogy tovább gondolkozhassanak rajtuk, mert az a cél, hogy minél többen tudjanak válaszolni. (Az előadások kivonata, az előadók föliái, a már elhangzott előadások videofelvételei - Szabó Sóki László és Maros Gábor jóvoltából - letölthetők a [honlapunkról](#), ahol már a 2009-2010-es tanév tervezett előadásai is szerepelnek.)

Hiszek abban, hogy a diákok most is ugyanolyan jók, mint régen, csak meg kell nekik mutatni az értékeinket. Jó érzéssel tölt el, hogy a kollégáim is így gondolják. Mindenki lelkes, akit fölkérek, és nagyon komolyan fölkészül az előadására.

Jövőre lesz az ELTE fennállásának 375. évfordulója, ezért terveztünk egy ünnepi előadást, "Az Eötvös-ingától az úrfelvételekig" címmel. Ebből az alkalomból meg fogjuk mutatni a hallgatóságnak az Eötvös-ingát. A hagyományos előadások mellett fontosnak tartom, hogy néhány nagy fizikusról is szót ejtsünk. Az idén a Nobel-díjas Curie-család kerül sorra. Másrészt azt szeretném, hogy ne csak a fizika jelenjen meg, hanem a hozzá kapcsolódó tudományágak és alkalmazások is. Véninger Péter az anyagok öregedéséről beszél majd. Ő a

Szépművészeti Múzeum restaurátora, és feltűnt, hogy nemcsak rendszeresen jár az "Atomcsill"-re, hanem jegyzetel is. Később odajött hozzám, kérdéseket tett fel, és addig-addig beszélgettünk, amíg azt gondoltam, hogy felkérem egy előadásra. A korábbi programokon szó volt már a szociális hálókról; a játékelméletről; az idén a Bécsben székelő Nemzetközi Atomenergia Ügynökség egyik munkatársát sikerült megkérnem, hogy jöjjön el hozzánk; egyik kollégánk pedig a molekuláris motorokról beszél majd. A hagyományos előadások között szerepel például a "Kvantumképek az alagútban", "A káosz fizikája", beszélünk majd a csapdába ejtett hideg atomokról és a vákuum természetéről. Eddig még egyetlen előadás sem ismétlődött, és az ötödik évfolyamban is ezt a hagyományt követjük.

**Silberer Vera**

---

Forrás: [otka.hu](http://otka.hu)

---

Eötvös Loránd Tudományegyetem • Természettudományi Kar • Fizikai Intézet

1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A