

# A grafén, a nanofizika egyik reménysége

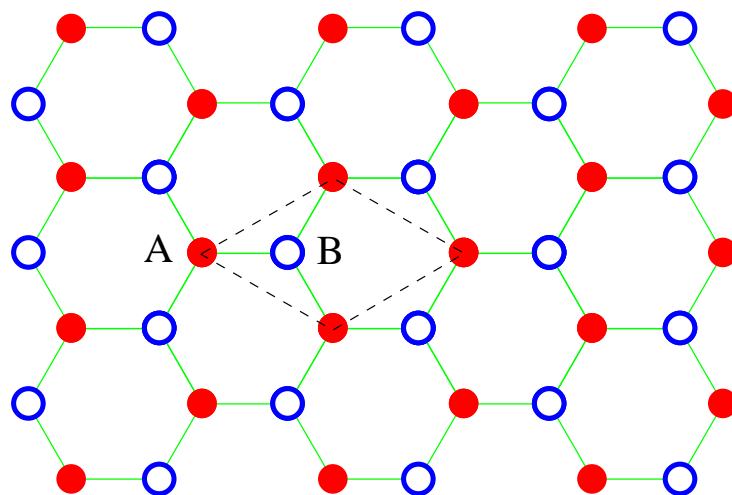
Cserti József

Eötvös Loránd Tudományegyetem,  
Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék

## Bevezetés

A szén a természet és életünk egyik legfontosabb kémiai eleme. Két módosulata, a grafit és a gyémánt régóta ismert. Köztük csak kristályszerkeztükben van különbség, mégis teljesen eltérő tulajdonságokkal rendelkeznek. A grafit hatszöges, míg a gyémánt tetraédes szerkezetben kristályosodik. A grafit nagyon puha, átlátszatlan, elektromosan vezető és olcsó, míg a gyémánt nagyon kemény, átlátszó, szigetelő és drága anyag. Csak 1985-ben fedezték fel a  $C_{60}$  molekulát, másnéven a *fullerén molekulát*, amely egy futball-labdához hasonlít, hatvan szénatom egy gömb felszínén ötös és hatos gyűrűket alkot. A felfedezésért 1996-ban *Curl*, *Kroto* és *Smalley* megosztva kaptak kémiai Nobel-díjat. A szén másik, 1991-ben felfedezett módosulata a *szén nanocső*, amit először egyértelműen Ijima izolált kísérletileg.

A manchesteri egyetemen *Geim* kutatócsoportjának 2004-ben sikerült a grafitból egyetlen atom vastagságú réteget, ún. *grafént* leválasztani [1]. Rögtön ezután *Kim* csoportjának is sikerült grafént előállítani, és megerősítették Geim csoportjának az eredményeit [2]. A grafénben a szénatomok két dimenzióban, méhsejt-szerű alakzatban helyezkednek el, ahogy ez az 1. ábrán látható. A grafénnek kitüntetett szerepe van, hiszen a fullerént, a szén nanocsövet és a grafitot



1. ábra. Egyatom vastagságú szénlap, a grafén. Minden rombusz alakú elemi cellában (szaggatott vonal) két szénatom van (megkülönböztetésül az *A* és *B*-vel jelölt teli és üres körök).

is elvben a grafénből lehet származtatni. A fullerénnél a grafén szerkezetbe 12 darab ötszöges gyűrűt kell beépíteni (ez pozitív görbületű hibát eredményez a grafénben). A fullerénnek, mint

minden molekulának diszkrét energiaszintjei vannak. A szén nanocsövek a grafénnek hengerré való feltekerésével, és a megfelelő szénatomok összekötésével kaphatók. A szén nanocsőben az elektronok a henger felületén mozognak. Végül a grafit megfelelően elrendezett grafén rétegek egymás fölé helyezésétől származtatható, ezért a grafit a szénnek egy háromdimenziós módosulata. Amikor a ceruzával írunk grafit lemezeket kerülnek a papírlapra. A szén egyik nagyon régóta ismert fajtája a korom, ami egyéb szennyezők mellett grafit darabkákat, különböző fulleréneket és nanocsöveket, illetve grafén lapkákat tartalmaz.

Elméleti megfontolások szerint két dimenzióban nem létezik hosszútávú rend, kétdimenziós kristály termodinamikailag instabil. Ennek oka, hogy a hőmérsékleti fluktuációk az atomok olyan nagyságrendű elmozdulásaihoz vezetnek, melyek összemérhetők a rácsállandóval, az egész kristály szétszilárdodik. Így egészen mostanáig úgy gondolták, hogy kétdimenziós szerkezet természetes módon nem jöhet létre, csak egykristályon növeszthető. Ezért is nagy jelentőségű Geim csoportjának a felfedezése, az akár  $100\ \mu\text{m}$  méretű grafénpikkelyek izolálása. Ilyen nagyságú minták már alkalmasak további kutatásokra, mint például elektromos vezetési tulajdonságok vizsgálatára. Egy- és kétrétegű grafén mintákat grafitból választottak le. A grafitból mechanikai hasítással különböző vastagságú kristályszemcséket állítottak elő, legegyszerűbben cellux ragasztófelületére ragadt pikkelyeket. A kritikus lépés, hogy az egyrétegű grafén szabad szemmel (optikai mikroszkóppal) is láthatóvá válik, ha a szemcséket olyan Si lapkára helyezzük, melynek oxidált felülete jól megválasztott vastagságú (tipikusan  $300\ \text{nm}$  vastag  $\text{SiO}_2$ ). Talán soha se fedezték volna fel a grafént, ha nem ezzel a módszerrel keresték volna. Megjegyezzük, hogy ha a  $\text{SiO}_2$  vastagsága akár csak  $5\%$ -kal eltér, a grafén már nem látható. Így a látszólag egyszerűnek tűnő eljárás valójában komoly kísérleti felkészültséget igényel. A fent említett elméleti jóslattal, miszerint két dimenzióban nem létezik hosszútávú rend, valószínűleg azért nincs ellentmondás, mert a szénatomok közti kölcsönhatás még szobahőmérsékleten is olyan erős, hogy a termikus fluktuációk nem elegendőek a kristályhibák keltésére vagy a grafénsík harmadik dimenzióban való kis torzulására. Azonban, ez a kérdés még nincs teljesen megnyugtató módon megmagyarázva, további kutatásokra van szükség. Mindenesetre az tény, hogy létezik grafén.

A kísérletek szerint a grafén stabil, kémiaiilag semleges anyag. A grafén elektromos tulajdonságai is különlegesek. Benne a töltéshordozók nagyjából 100-szor könnyebben mozoghatnak, mint például az elektronika alapját képező Si félvezetőkben. Így a grafénben a töltéshordozók mozgása ballisztikus, azaz szennyezőkkel való ütközés nélkül mozoghatnak, akár a szubmikronos skálán ( $0,3\ \mu\text{m}$ ) is. Érdekes, hogy grafénben az áramsűrűség elérheti a  $10^8\ \text{A}/\text{cm}^2$  értéket is, ami durván 100-szor nagyobb, mint a közönséges rézhuzalban.

A másik fontos ok, amiért a grafén nagyon rövid időn belül a kutatás középpontjába került, az a benne lévő töltéshordozók különleges jellege. Fémekben és félvezetőkben a kvantummechanika alapegyenlete, a *Schrödinger-egyenlet* határozza meg az anyagok elektromos tulajdonságait. Ugyanez érvényes grafénre is, de amint azt később látni fogjuk, a töltéshordozók dinamikáját a Schrödinger-egyenlet helyett nagyon jól közelíthetjük a *Dirac-egyenlettel*. A Dirac-egyenlet a relativisztikus kvantummechanika alapegyenlete. Habár az elektronok mozgása egyáltalán nem relativisztikus, azaz sebességük sokkal kisebb a vákuumbeli fénysebességnél, az elektronok kölcsönhatása a méhsejt-rácsban elrendezett szénatomok periodikus potenciáljával olyan részecske-gerjesztést eredményez, ami alacsony energián nagy pontossággal írható le a  $2+1$  dimenziós<sup>1</sup> *zérus tömegű* részecskékre vonatkozó Dirac-egyenlettel. Emiatt *Dirac-elektronoknak* is nevezik a grafénben mozgó elektronokat, és gyakran hasonlítják őket a neutrí-

---

<sup>1</sup>Itt 2 a térbeli, míg 1 az idődimenzióra utal.

nókhoz is<sup>2</sup>. Azonban egy fontos különbség, hogy grafénben az effektív „fénysebesség” kb. 300-szor kisebb a vákuumban terjedő fény sebességénél. A grafén felfedezése és elektromos tulajdonságának mérése mostantól lehetőséget nyújt a relativisztikus kvantum-elektrodinamikában ismert különleges jelenségek tesztelésére. Mágneses térben a Dirac-elektronok a „hagyományos”, például a félvezetőkben lévő elektronokhoz képest szokatlan módon viselkednek. Számos új fizikai jelenség figyelhető meg, mint például az anomális Hall-effektus. A fenti gondolatokat a későbbiekben részletesebben is kifejtjük.

Óriási az érdeklődés a grafén iránt. Az elmúlt pár év alatt a grafénről több ezer cikket írtak. Hazánkban a Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézetben Bíró László Péter vezetésével, Tapasztó Levente és az Eötvös Loránd Tudományegyetem (ELTE) idén végzett fizikus hallgatója, Dobrik Gergely 2007-ben kezdték el grafén minták előállítását. Pásztázó alagútmikroszkóppal nanométeres pontossággal tudtak grafén mintákat „méreetre szabni”, ami lehetővé teszi a grafén elektromos tulajdonságainak tervezését. Elméleti kutatások az ELTE, illetve a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen folynak.

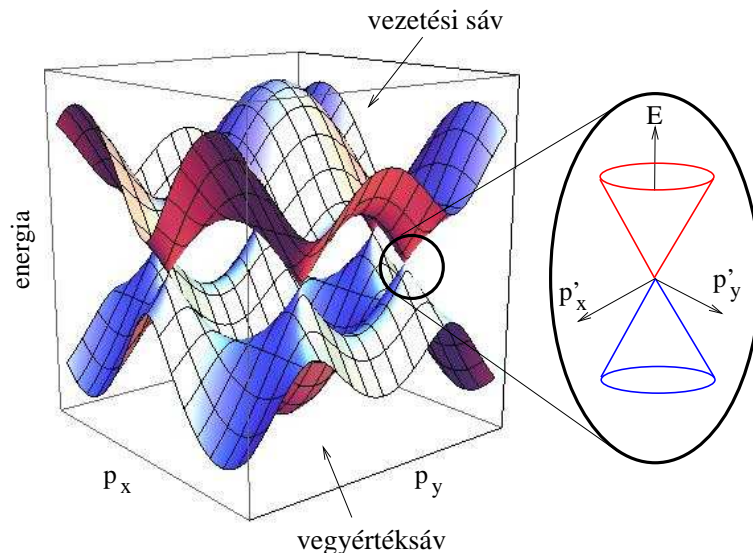
## Dirac-elektronok grafénben

A grafén méhsejt-szerű szerkezetében minden szénatom kovalens kötéssel kapcsolódik a körülötte lévő három szomszédos szénatomhoz. Ez a szoros kötés felelős a gyémánt kivételével a szén minden más módosulatának stabilitásáért. Mivel a szénatomnak négy elektronja vehet részt a kötésben, minden szénatomnak egy elektronja szabadon mozoghat a kétdimenziós grafénsíkon. Ennek az elektronnak a mozgása határozza meg a grafén elektromos tulajdonságait. Ezért különösen fontos meghatározni, hogy a grafénsík különböző irányokban terjedő elektronnak mekkora az energiája. Ezt a problémát a fizikában sáv szerkezet-számításnak nevezik. A grafén sáv szerkezetét először Wallace tanulmányozta 1947-ben, de abban az időben a tisztán kétdimenziós grafén szerkezet vizsgálatát pusztán elméleti modellnek tekintették. Valójában, maga Wallace is kiindulási pontnak tekintette ezt a számolást a grafit jobb megértése érdekében, ami nagyon fontos volt az atomreaktorok kifejlesztésében a II. világháború után. Később a Slonczewski-Weiss-McClure sáv szerkezeti-modell nagyon jól leírta a grafit sáv szerkezetét, és sikeresen alkalmazták a kísérleti eredmények megértéséhez. Így Wallace eredményei feledésbe merültek, és csak napjainkban, a nanocsövek és a grafén iránt megnőtt érdeklődés miatt váltak ismét fontossá. A számításai szerint — ami ma már tananyag az egyetemi oktatásban — az elektron energiája erősen függ az elektron impulzusának irányától és nagyságától, azaz a mozgásának irányától és sebességének nagyságától<sup>3</sup>, amint ez a 2. ábrán látható. Két sáv alakul ki, melyeket az irodalomban vezetési sávnak (felső felület) és a vegyértéksávnak (alsó felület) neveznek. Az impulzusok terében felrajzolt két felület egymás tükörképe és hat ponton érintkezik egymással. Ezeket  $K$  pontoknak vagy — a később indokolt okok miatt — *Dirac-pontoknak* nevezik. A vegyértéksáv teljesen be van töltve. Emiatt csak azokat az elektronokat lehet kis energiával gerjeszteni (például termikusan, a külső környezet által) a vegyértéksávból a vezetési sávba, amelyeknek az impulzusa a  $K$  pontok közelében van. Ezért fontos ismerni a Dirac-pontok közelében az elektron energiájának az impulzustól való függését. Megmutatható, hogy a Dirac-pontok közelében az elektron energiája *arányos* az elektron impulzusával:  $E = vp$ , ahol  $v$  egy sebesség dimenziójú mennyiség és a  $p$  impulzust a  $K$  ponttól mérjük. A 2. ábra kinagyított részletén látható, hogy a  $K$  pontból elmozdulva az energia lineárisan

---

<sup>2</sup>A neutrínók nyugalmi tömege nem zérus, de rendkívül kicsi, gyakorlatilag zérusnak vehető.

<sup>3</sup>Egy részecske  $\mathbf{p}$  impulzusa a részecske  $m$  tömegének és  $\mathbf{v}$  sebességének szorzata:  $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ .



2. ábra. A grafén sávszerkezete, azaz az elektron energiájának az impulzustól való függése.

függ az impulzus nagyságától, függetlenül az elmozdulás irányától. Így az energia-impulzus függés egy kúpot határoz meg a Dirac-pontok közelében, és ezeket a kúpokat *Dirac-kúpoknak* nevezik. Ez az energiafüggés alapvetően eltér a fémekben és félvezetőkben mozgó elektronok energiájától, ugyanis ezekben az anyagokban az elektron energiája jól közelíthető a newtoni mechanika alapján:  $E = \frac{1}{2} m^* v^2 = p^2 / (2m^*)$ , ahol  $m^*$  az elektron effektív tömege a kristályban<sup>4</sup>. Az energia *parabolikusan*, azaz négyzetesen függ az elektron impulzusától.

Hogy megvilágítsuk a relativisztikusan mozgó elektron, a Dirac-elektron és a grafénben mozgó elektron közti hasonlóságot, tegyünk egy kis kitérőt! *Diracnak*, az elmúlt századunk egyik legmeghatározóbb fizikusának 1928-ban sikerült egyesíteni a fizika két alapvető elméletét, a kvantummechanikát és a speciális relativitáselméletet. A Dirac-féle relativisztikus kvantummechanika szerint a részecske (például elektron, proton, neutron, neutrínó, stb.) energiája  $E = \sqrt{m^2 c^4 + c^2 p^2}$ , ahol  $m$  a részecske nyugalmi tömege és  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s a fény sebessége. Vegyük észre, hogy egy zérus nyugalmi tömeggel rendelkező részecske energiája a fentiek szerint  $E = cp$ . Ez emlékeztet a grafénben mozgó elektronok korábban említett energia-impulzus összefüggésére. A különbség csak az, hogy grafénben a részecske sebessége nem  $c$ , hanem  $v$ . A grafénen végzett mérések és számítások szerint  $v \approx c/300$ . Vajon létezik-e a természetben zérus nyugalmi tömegű részecske? A válasz igen. Ilyen a foton. Valóban, a fény kvantumjának, a fotonnak az energiája  $E = h\nu$ , ahol  $h$  a Planck-állandó és  $\nu$  a fény frekvenciája. Ismeretes, hogy a fény sebessége  $c = \nu\lambda$ , ahol  $\lambda$  a fény hullámhossza. Innen egyszerűen belátható, hogy  $E = hc/\lambda$ . A kvantummechanika szerint egy  $p$  impulzusú részecskéhez  $\lambda = h/p$  hullámhosszúságú, ún. de Broglie-hullámhossz rendelhető. Ezek után egyszerűen megmutatható, hogy a foton energiája és impulzusa közti összefüggés ugyanaz, mint a Dirac-féle relativisztikus kvantummechanika által jóslott zérus nyugalmi tömeggel rendelkező részecske energiája:  $E = cp$ . A foton energiája arányos a foton impulzusával, az arányossági tényező pedig éppen a fény sebessége. Ez persze nem véletlen. A fényt, az elektromágneses teret a Maxwell-egyenletek írják le. Ezek az egyenletek pedig összhangban vannak a speciális relativitáselmélettel.

Összefoglalva, az elektronok mozgása a kétdimenziós grafénben, a Dirac által kidolgozott

<sup>4</sup>A kristályos anyagban mozgó elektron  $m^*$  effektív tömege a kristályráccsal történő kölcsönhatás miatt eltér a szabad elektron  $m_0$  tömegétől.

relativisztikus kvantummechanika törvényei szerint mozgó, de zérus nyugalmi tömegű elektronok mozgásához hasonlítható. Grafénben az ún. Dirac-elektronokkal írhatjuk le az elektronok mozgását, de az energia-impulzus összefüggést illetően sokban hasonlít a foton terjedéséhez is. Ebből az analógiából kiindulva nevezik Dirac-kúpoknak az elektronok energiájának az impulzustól való, a 2. ábrán látható függését. Természetesen a fenti, kissé heurisztikusnak tűnő érvelés végkövetkeztetését azóta szigorú kvantummechanikai számításokkal is megalapozták. Sőt, közvetett módon, kísérletekkel is igazolták.

## Dirac-elektronok kísérleti bizonyítéka

Geim és Kim csoportja a sikeresen előállított grafén mintán különböző méréseket végzett. A mintához négy kontaktust kapcsoltak és az egészet a grafén síkjára merőleges irányú mágneses térbe helyezték. Megmérték a mágneses tér függvényében a minta ellenállását úgy, hogy két szemközti kontaktuson keresztül áramot vezettek a mintába és a másik két, az előző két kontaktust összekötő egyenesre merőlegesen elhelyezett kontaktus között mérték a feszültséget. A feszültség és az áram arányát nevezik *Hall-ellenállásnak*, *Edwin H. Hall* tiszteletére, aki 1879-ben fedezte fel a róla elnevezett *Hall-effektust*. Hall közönséges fémen végezte a fenti mérést, és azt tapasztalta, hogy a mért  $R_H$  Hall-ellenállás arányos a mágneses tér nagyságával. Pontosan száz évvel később *Klaus von Klitzing* kétdimenziós félvezető mintán megismételte a mérést, és meglepő módon egy bizonyos mágneses tér fölött (körülbelül 1 T fölött) azt találta, hogy a Hall-ellenállás értéke nem követi a Hall által megfigyelt, ma már klasszikusnak számító, egyszerű lineáris viselkedést. Klitzing mérései szerint rendkívül nagy pontossággal (ma már  $10^{-8}$  pontosság érhető el) a Hall-ellenállás:  $R_H = R_K/\nu$ , ahol  $\nu$  pozitív egész szám és  $R_K = h/e^2 \approx 25812,8 \Omega$  egy univerzális ellenállás-érték (itt  $h$  a korábban már szerepelt Planck-állandó, és  $e$  az elektron töltése), és *Klitzing-állandónak* nevezik. A Hall-ellenállás olyan pontosan követi a fenti viselkedést, hogy ma már ellenállás-etalonnak használják a mérést. Klaus von Klitzing 1985-ben munkája elismeréséül Nobel-díjat kapott. A jelenség magyarázatához kvantummechanikai ismeretek szükségesek. Ezért ezt a jelenséget *egész számú kvantum Hall-effektusnak* nevezik. Pár évvel később még nagyobb mágneses teret alkalmazva kiderült, hogy a fenti  $\nu$  szám törtszám is lehet, például  $\frac{1}{3}$ ,  $\frac{2}{5}$ ,  $\frac{3}{7}$ , stb. Ennek alapján, ezt a jelenséget *tört számú kvantum Hall-effektusnak* nevezik, és 1998-ban hárman, *Tsui*, *Störmer* és *Laughlin*, megosztva kaptak Nobel-díjat.

Visszatérve a graféneken végzett mérésekre, Geim és Kim csoportja egymástól függetlenül anomális viselkedést tapasztalt a Hall-ellenállásban. A méréseik szerint a Hall-ellenállás:  $R_H = R_K/(n + 1/2)$ , ahol  $n$  egész szám. Ez csak abban tér el a félvezető mintákon végzett mérések eredményétől, hogy  $n$  helyett  $n + 1/2$  szerepel  $R_H$  kifejezésében. Alapos elméleti számítások szerint ez az  $1/2$  tag a Dirac-elektronok miatt lép fel. A Geim és Kim csoportja által mért anomális Hall-effektus volt az első bizonyíték arra, hogy grafénben az elektronok dinamikáját a Dirac-egyenlet határozza meg.

Az anomális Hall-effektus mellett egy másik fontos kísérleti tény, és egyben további kísérleti igazolása a Dirac-elektronoknak grafénben, az ún. *maximális ellenállás* [1, 2]. Egy  $L$  hosszúságú és  $W$  keresztmetszetű kétdimenziós mintában az  $L$  hosszúságú él mentén a minta ellenállása:  $R = \rho L/W$ , ahol  $\rho$  a fajlagos ellenállás. A mérések szerint, ha változtatjuk a töltéshordozók  $E$  energiáját (például a töltéshordozók számának változtatásával), akkor grafénben a  $\rho$  fajlagos ellenállás maximális értéket vesz fel azon az energián, ahol a 2. ábrán látható két ág, a vezetési és vegyértéksáv összeér, azaz a Dirac-kúp csúcánál. Meglepő módon elméletileg

sokkal korábban, a grafén felfedezése előtt már tanulmányozták a maximális ellenállás jelenségét a Dirac-elektronok kapcsán. Geim és Kim csoportjának kísérleti eredményei óta még több cikk foglalkozik a maximális ellenállással, és a kvantum Hall-effektus kapcsán már szerepelt  $h/e^2$  értékkel megegyező nagyságrendű ellenállást jósolnak. A pontos érték körül még folyik a vita. Több elméleti jóslat szerint a fajlagos ellenállás is univerzális értéket vesz fel:  $\rho_{max} = (\pi/4) h/e^2$ . Az újabb kísérletekben a különböző  $W$  szélességű és  $L$  hosszúságú grafénben a  $W/L$  növelésével (széles, de rövid mintákra) a fajlagos ellenállás a fenti univerzális értékhez tart.

Végezetül fontos elméleti eredmény, hogy grafénben is fellép a relativisztikus kvantummechanikából ismert *Klein-paradoxon* kapcsolatos jelenség. A klasszikus fizika szerint, ha egy részecske energiája kisebb a  $V_0$  potenciálgát magasságánál, akkor az teljesen visszaverődik, visszapattan a potenciálgátról. A nemrelativisztikus kvantummechanikában, a Schrödinger-egyenlet alapján megmutatható, hogy az elektron bizonyos  $T$  valószínűséggel behatolhat a potenciálgátba, de  $T$  exponenciálisan csökken  $V_0$  növekedésével. Alapvetően más a helyzet a relativisztikus kvantummechanikában. A Dirac-egyenlet alapján *Oskar Klein* svéd fizikus mutatta meg először, hogy az elektron  $T$  transzmissziós valószínűsége csak *gyengén* függ a potenciálgát  $V_0$  magasságától, ha  $V_0$  értéke nagyobb az elektron  $mc^2$  nyugalmi energiájának kétszeresénél. Sőt végtelen nagy  $V_0$  esetén akár elérheti a tökéletes transzmissziót, azaz a  $T = 1$  értéket is. Ez szöges ellentétben van a nemrelativisztikus kvantummechanika alapegyenletéből, a Schrödinger-egyenletből kapott eredménnyel. Ezt a „józan észnek” ellentmondó eredményt nevezik Klein-paradoxonnak. Ugyanakkor kísérletileg nehéz kimutatni a jelenséget, mert a potenciálváltozásnak nagyobbak kell lennie  $2mc^2$ -nél a  $\hbar/(mc)$  Compton-hullámhossz nagyságrendjébe eső távolságon, ami óriási elektromos teret jelent ( $\mathcal{E} > 10^{16}$  V/cm). Grafénben a Klein-paradoxon kísérleti kimutatása sokkal realiztikusabb, mivel a számítások szerint a szükséges elektromos tér jóval kisebb,  $\mathcal{E} \approx 10^5$  V/cm. Ha a grafén minta tetejére pozitívan töltött elektródát helyezünk, akkor a grafénben mozgó elektronoknak egy potenciálfalon kell áthaladniuk. Ellentétben a normál fémekben mozgó elektronokkal, grafénben az elektronok potenciálgáton történő átjutásának a valószínűsége elérheti akár a maximális 1 értéket is. A potenciálgát belsejében az elektron „átalakul” a vegyértéksáv elektronjává, ami elektromos tulajdonságait illetően pozitív töltésű részecskeként, másszóval *lyukként* viselkedik. Az elektron lyuk-szerű részecskévé alakul át, ahogy a relativisztikus kvantummechanikában az elektron pozitronként halad a potenciálgát belsejében. Kísérletileg a Klein-paradoxont közvetett módon, az elektromos ellenállás mérésével mutatták ki.

A fenti kísérleti eredmények, azaz a maximális ellenállás létezése, a Hall-effektus és a Klein-paradoxon igazolják az elektronok furcsa, a relativisztikus kvantummechanika törvényeit követő viselkedését grafénben. Megjegyezzük, hogy az utóbbi évek intenzív kutatásai további, itt nem említett szokatlan jelenségekre is fényt derítettek a grafénnel kapcsolatban.

## Alkalmazási lehetőségek

Az eddigi kutatások alapján a grafén a jó vezetési tulajdonságai miatt ígéretesnek tűnik az elektronikában, megalapozvan a *grafén alapú elektronikát*. Ugyanakkor erre még az optimista becslések alapján is legalább húsz évet kell várni. De az elektronikai eszközök bizonyos elemeinek grafénnel történő helyettesítése, integrált áramkörök, grafén tranzistorok készítése sokkal rövidebb időn belül megvalósulhat. A kvantumszámítógépek alapját képző spin qubit grafénnel való megvalósításának lehetősége is egy aktív kutatási terület.

További alkalmazási terület grafén szemcsék használata elektromos akkumulátorokban. Grafit, illetve a szén nanocsövek használata ilyen akkumulátorokban már ma is jól jövedelmező piacot jelent. Valószínűleg a grafénnel még ennél is jobb hatásfokú akkumulátorok készíthetők a jövőben, és ráadásul olcsóbban is. A grafén egy másik ígéretes alkalmazási lehetősége a szilárdtest-gázérzékelők. Kiváló lehet gázmolekulák érzékelésére, mivel a grafén kétdimenziós volta miatt a teljes felületére kapcsolódhatnak a gáz molekulái. A molekulák érzékelése indirekt úton történik, a molekulák a grafénhez kötődve megváltoztatják a grafén ellenállását.

Az egyszerű grafitcseruza hegye mind elméleti, mind kísérleti és gyakorlati alkalmazást illetően még sok izgalmas kutatási lehetőséget rejt magában. Egyszer talán a szilíciumot szénre cseréljük, és ezzel a grafén a reményeket keltő álmok után a nanofizika új „sztárjává” válik.

## Köszönetnyilvánítás

Megköszönöm *Dávid Gyula*, *Gesztli Tamás* és *Tichy Géza* hasznos tanácsait.

## Irodalomjegyzék

- [1] K. S. Novoselov és mások, *Science* **306**, 666 (2004); K. S. Novoselov és mások, *Nature* **438**, 197 (2005).
- [2] Y. Zhang, J. P. Small, M. E. S. Amori, and P. Kim, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 176803 (2005); Y. Zhang, Y.-W. Tan, H. L. Stormer, and P. Kim, *Nature* **438**, 201 (2005).