

# Zárójelentés

Címe: Spintronika és grafén nanoszerkezetek

Témavezető: Cserti József

OTKA-azonosító: 75529

Kezdet: 2008. 10. 01.

Vége: 2013. 09. 30.

Beszámoló időszak: 2008-10-01 – 2013-09-30

## 1. év

Összefoglalás a végzett munkáról:

1. A kétdimenziós elektrongáz közelében elhelyezett töltött szennyező spin-függő szórását tanulmányoztuk elméletileg. Megmutattuk, hogy a differenciális hatáskeresztmetszet szimmetriai tulajdonságai különböznek, attól függően, hogy a szennyező a kétdimenziós elektrongáz síkjában, vagy attól véges távolságra felette van. Megmutattuk, hogy az utóbbi esetben egy aszimmetrikus (skew) szórás lép fel. Megfelelően preparált mintában ez a szórási mechanizmus a kétdimenziós elektrongáz síkjában fekvő mágneses térben is vezethet Hall-effektushoz [1].
2. Megmutattuk, hogy királis szén nanocsőben az elektronok véges csoportsebessége miatt mágneses tér alakulhat ki a nanocső tengelyének irányában. A legnagyobb tér  $18^\circ$ -os királis szögnél alakulhat ki, és  $10^{-4}$  A longitudinális áram mellett  $10^{-1}$  T nagyságrendű mágneses tér jöhet létre. Ez a tér már alkalmas lehet érdekes spintronikai effektusok vizsgálatára, illetve a szén nanocső önindukciós együtthatója is jelentős értéket vehet fel ebben az esetben [2].
3. Elméletileg tanulmányoztuk az elektronok hullámfüggvényét ballisztikus kör alakú két-rétegű grafén p-n átmenetben. Azt találtuk, hogy i) a hullámfüggvényben kausztika figyelhető meg a kör alakú tartomány belsejében, ii) a kausztika alakja a geometriai optika alapján írható le negatív törésmutatót feltételezve. Az egyrétegű grafénnel ellentétben az erős fókuszáló hatás nem lép fel a kétrétegű grafénben. Ezt az eredményt értelmeztük egy sík p-n átmenetnél fellépő, szögfüggő Klein-alagutazással [3].
4. Elsőként tanulmányoztuk az energiaszintjeit olyan grafén alapú Andreev-biliárdoknak, amelyekben a grafén fölé szupravezető tartomány van helyezve. Az Andreev-retroreflexió esetén megmutattuk, hogy a grafén alapú Andreev-biliárd spektruma megegyezik az ugyanolyan alakú normál-szupravezető biliárdok spektrumával. Továbbá, elsőként levezettünk egy szemi-klasszikus kvantálási feltételt a grafén alapú Andreev-biliárdokra. Az egzakt és szemi-klasszikusan számolt energiaszintek nagyon jól egyeznek mind Andreev-retroreflexió, mind spekuláris Andreev-reflexió esetén [4].
5. Ismert tény, hogy mágneses szennyezők elronthatják a spin-forgatási illetve az időtükrözési szimmetriát, melynek hatására megváltozhat egy rendezetlen fémes rendszer szimmetria osztálya. Elegendően alacsony hőmérsékleten a Kondo-árnyékolás miatt az elrontott szimmetriák helyreállnak. Ismeretes továbbá az is, hogy az Anderson-féle fém-szigetelő átalakulásnál a hullámfüggvények különleges, ún. multifraktál tulajdonsággal rendelkeznek, mely hatványfüggvény-szerű korrelációkat eredményez. Ebben a publikációban e két jelenség összjátékát vizsgáltuk meg. Megmutattuk, hogy a multifraktál korrelációk

ú.n. pseudo tiltott sávot nyitnak meg a Fermi-nívón a tér különböző pontján. Ha a híg mágneses szennyezés esetén a szennyezők éppen ebben a pontban találhatók, a Kondo-árnyékolás nagyon akadályozott. Ennek eredményeként ha a kicserélődési csatolási állandó egy bizonyos érték alatt marad, a fém-szigetelő fázisátalakulás kritikus pontja a rendezetlenség erősségének szempontjából egy kritikus tartománnyá növekszik. Ennek a kritikus tartománynak a hatását erősen rendezetlen ötvözetekben végzett Kondo-ellenállás mérés kapcsán lehet várhatóan kimutatni [5].

6. Egyrétegű és kétrétegű grafénben, mágneses térrel bezárt elektronok gerjesztéseinek szemi-klasszikus kvantálási feltételét vezettük le. A szemi-klasszikusan számolt sajátenergiák jó egyezést mutatnak a Dirac-egyenletből kapott egzakt, kvantummechanikai számolással, illetve a tight-binding számolással kapott eredményekkel [6].

## 2. év

2009-ben a spin-pálya kölcsönhatás szerepét, a Zitterbewegung jelenségét, ami kapcsolatba hozható az optikai vezetőképességgel, és a Josephson-effektust vizsgáltuk grafénben. Összefoglalás a végzett munkáról:

1. Kiszámítottuk királis arany nanocsőben az elektronok áramát, illetve az általa létrehozott mágneses teret, ami nagyobb lehet, mint szén nanocsőben [7].
2. Kvantumosan és szemiklasszikusan vizsgáltuk az elektron fókuszálást grafén nanocsőkben. A fókuszálás elvben használható a grafén széleinek jellemzésére (karosszék, cikk-cakk vagy a kettő között) [8].
3. A Zitterbewegung jelenség legáltalánosabb, univerzális elméletét dolgoztuk ki. Általánosan érvényes formulát adtunk a szabad, kvázirészecskék helyoperátorának időfüggésére, amelynek oszcilláló tagjai jelentik a Zitterbewegungnak nevezett jelenség lényegét. Nem csak a relativisztikus Dirac elektronnál lép fel a Zitterbewegung, hanem számos spintronikai rendszerben, és grafénben is. Megmutattuk, hogy a Zitterbewegung általában több frekvencián létrejövő oszcillációk szuperpozíciója, és összefüggésben van a Berry-fázissal. Számos példát adtunk az általános elméletünk alkalmazására, mint pl. spintronikai és grafén rendszerek [9].
4. Kiszámítottuk a diszperziós relációt grafénre a Rashba jellegű spin-pálya kölcsönhatás mellett, ami jelenleg aktív kutatási téma. Megmutattuk, hogy a rendszer unitér módon leképezhető a kétrétegű grafénre, és vizsgáltuk a jelenség kísérleti kimutatásának lehetőségét [10] (Selected for the September 13, 2010 issue of Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology).
5. Kiszámítottuk az elektron-síkhullám szóródását kvantumosan és az ún. uniform-szemiklasszikus közelítésben kétrétegű grafénben p-n átmenetben. Rövidhullámhossz határesetben kimutatattuk a kausztikák felléptét. A módszer általánosítható bonyolultabb rendszerekre is [11].
6. Numerikusan, véletlen mátrix modellel vizsgáltuk egydimenziós Anderson-féle fém-szigetelő átalakulás viselkedését mutató rendszer transzport tulajdonságait. Megmutattuk, hogy az átlagos szórás mátrix-eleme, a vezetőképesség átlaga, szórása, az átlagos sörétzaj egy folyamatos átmenetet mutatnak a lokalizált, illetve a delokalizált határesetek között. Ezt a viselkedést összevetettük a 3d Anderson modellel [12].

7. Enyhén rendezetlen félvezető heterostruktúrákban létrejövő excitonok tulajdonságait vizsgáltuk egy egyszerűsített, egydimenziós modell segítségével numerikusan. Megvizsgáltuk hogyan függ az excitoncsúcs vörös-eltolódása, illetve kiszélesedése a rendezetlen potenciál korrelációs hosszától [13].
8. Kritikusan rendezetlen PBRM modell néhány csatornás szórási és vezetési tulajdonságait vizsgáltuk numerikusan az időtükrözési szimmetria sérülése esetén és összevetettük az eredményeket a véletlen mátrix elmélet jóslataival [14].
9. Meghatároztuk az Anderson-féle fém-szigetelő átalakulást leíró egydimenziós véletlen mátrix modell vezetőképesség eloszlásfüggvényét kétcsatornás vezetékek esetén. Megmutattuk, hogy a vezetés logaritmusa univerzális eloszlás függvény és a vezetés tipikus értékével skálázódik. Kimutattuk, hogy az alacsony vezetés határesetet univerzális viselkedés írja le [15].
10. Egydimenziós, rendezetlen félvezető struktúrában levő exciton tömegközépponti mozgását tanulmányoztuk numerikusan. A szokásos aszimmetrikus nemlineáris optikai spektrum a legalacsonyabb energiájú, domináns átmenetek hatására Fano-típusúnak bizonyult [16].

### 3. év

2010-2011 időszakban a sörétzaj tanulmányozása rétegzett grafén nanoszerkezetekben projekt helyett a spin-pálya kölcsönhatás szerepét vizsgáltuk. Ennek fő oka, hogy a kísérleti munkák is ezen a téren fejlődtek alapvetően. Összefoglalás a végzett munkáról:

1. Tanulmányoztuk a superfolyékony, csapdázott Fermi-gázok (a lokális sűrűség közelítésen túlmenő) gradienskorrekcióit a BCS-BEC átmenet BCS oldalán, zérus hőmérsékleten. Fontos eredményünk, hogy a Feshbach-ponton a sűrűség vezető korrekciója egy ún. von Weizsacker-típusú korrekcióval adható meg, amelynek az együtthatója  $7/27$ -re módosul a szabad gázéhoz képest [17].
2. Kiszámoltuk a szupravezető-grafén-szupravezető Josephson átmenetben a Josephson-áramnak a fázistól, hőmérséklettől, illetve a minta hosszától való függését [18].
3. Elsőként mutattuk meg, hogy többkomponensű hullámfüggvénnyel leírható rendszerekben a transzportjelenségek (vezetőképesség, Hall-effektus stb.) leírása során ugyanazok az együttható-mátrixok jelennek meg, mint a Zitterbewegung esetén (lásd [9] cikket a Zitterbewegung általános elméletéről) [19].
4. A Green-függvény alapján általános formulát adtunk különféle kétdimenziós, végtelen periodikus ellenállás-hálózat tetszőleges két rácspontja között mérhető ellenállásra. Az elméleti módszer átvihető a kétdimenziós kvantum rendszerek elektromos transzporttulajdonságainak vizsgálatára is, ami egyben egyik jövőbeni célunk is [20].
5. Kutatásunkban, MSc hallgató bevonásával, annak jártunk utána, hogy a kaotikus spektrum és az univerzális spektrális fluktuációkat leíró véletlen mátrix elmélet milyen módon következnek egymásból, azaz mennyire nyilvánvaló, hogy az univerzális fluktuációkat tartalmazó spektrumból nem következik kaotikus dinamika. Az eredményünket numerikusan egydimenziós szimulációval kaptuk. A kaotikus klasszikus határesetű kvantum rendszerek vizsgálata a kvantum információ kutatás egyik fontos területe, ami a kvantum rendszerek és környezetük kölcsönhatását, az ún. dekoherencia jelenségét érinti [21].

6. A spin-pálya kölcsönhatás és az alrács-aszimmetria hatását tanulmányoztuk az elektron spin-polarizációjára grafénben. Az alrács-aszimmetria nem csak gappet nyit, hanem egy a grafén síkjából kifelé mutató spin-polarizációt is eredményez. Ez az effectus kísérletileg a spin-érzékeny fotoemissziós spektroszkópiával mutatható ki. Numerikusan kiszámoltuk a fotoelektronok intenzitásának energia- és vonalszélesség függését [22].

## 4. év

Összefoglalás a végzett munkáról:

1. Elméletileg, a gyorsnak számító molekula-dinamikai számolásokat összekapcsolva a sűrűség-funkcionál elméleti számolásokkal, meghatároztuk a molekuláris vezetők kvantumos transzportját. Ilyen jellegű számolás különlegesnek mondható a területen. A mért vezetőképesség-hisztogramok mellett, az egyes vezetési csatornák transzmisszióját a szupravezető gap alatt mért I-V görbékre való illesztéssel határoztuk meg. A vezetőképesség-hisztogramokra, illetve a minta szakítása során megfigyelt vezetési csatornák transzmissziójának eloszlásra vonatkozóan az indium nano-kötéseken kísérletileg mért eredményeket sikerült elméletileg is reprodukálni. A kifejlesztett elméleti eljárás alkalmas lehet a lehetséges fizikai folyamatok jobb megértésére más anyagok, nano-kötések vezetőképességét illetően [23].
2. Általánosítottuk a pszeudopotenciál-elméletet csapdázott superfolyékony Fermi-gázra. A csapdapotenciált gömbszimmetrikusnak tételezve fel, meghatároztuk a páros-páratlan részecskeszámú rendszerek energiájának különbségét a Feshbach-rezonancián, ahol a gáz univerzális tulajdonságokat mutat [24].
3. Megmutattuk elméletileg, hogy kétrétegű grafénben lehetséges (kísérletileg is realizálható) negatív törésmutatójú elektron-optikai rendszert készíteni. Az egzakt kvantumos számolásokat összevetettük a szemiklasszikus számolásokkal, az egyezés kitűnő. Az interferencia mintázat a külső mechanikai nyírással kontrolálható. Az elrendezés alkalmas a grafén diszperziós-relációjában megjelenő két Dirac-kúphoz tartozó elektron-állapotok szelektálására is. Konferenciákon már több kísérleti kutató érdeklődött az elrendezés iránt [25].
4. A Kubo-formulával egy egyszerű és általános formulát adtunk a minimális vezetőképességre tetszőleges  $2 \times 2$ -es Hamilton-operátorral leírható rendszer esetén. Alkalmazásként elemeztük a kétrétegű grafén sávszerkezetében megfigyelhető topológikus átmeneteket, illetve a minimális vezetőképesség függését az átmenet során. A vezetőképességet összevetettük a Landauer-formulával kapott eredményekkel és kitűnő egyezést kaptunk. Az eredmények összhangban vannak Novoselov és csoportja által mért kísérleti eredményekkel. Megmutattuk, hogy a vezetőképesség érzékeny az elektródáknak a grafénhez viszonyított orientációjára. Megmutattuk, hogy a grafén minimális vezetőképessége szorosan összefügg a grafén alacsonyenergiás sávszerkezetének topológiájával [26].
5. Az Anderson-féle fém-szigetelő átalakulás közelében levő rendszerben a híg mágneses szennyezés hatását vizsgáltuk. A kritikus pont közelében különböző energiájú sajátállapotok között tapasztalható hatványfüggvény-szerű korrelációk a lokális állapotsűrűségben pseudo-gap létrejöttét teszik lehetővé. Emiatt árnyékolatlan mágneses szennyezések jelennek meg. Meghatároztuk a zérus hőmérséklet határesetében a szabad mágneses momentumok sűrűségét, ami véges értéket mutat a szigetelő oldalon, de eltűnik a fémes oldalon és a kritikus ponthoz közelítve az attól mért távolságtól hatványfüggvény szerint

tűnik el. Miután a szabad mágneses momentumok fluktuáló spinje megtöri a vezetési elektronok időtükrözési szimmetriáját a fém-szigetelő átalakulás helyében egy eltolódás tapasztalható ami egy félfém tulajdonságú fázis megjelenését eredményezi. A Kondo-hőmérséklet eloszlás függvényét meghatároztuk mind a szigetelő mind pedig a fémes oldalon illetve a kritikus pontban véges méretű rendszerre, ami lehetőséget ad arra, hogy meghatározzuk a kvantum fázisdiagramot külső mágneses tér illetve nem-zérus hőmérséklet esetén. Meghatároztuk a mágneses szuszceptibilitást, a fajhőt illetve a spin relaxációs rátát a hőmérséklet függvényében. Meghatároztuk azt a fázisdiagramot, mely a szigetelő, a kritikus félfém illetve a fémes fázist írja le. Ezek az új típusú fázisátalakulások a Kondo-árnyékolás és az Anderson-lokalizáció összjátékaként jönnek létre módosítva a hőmérséklet függő spin-flip szórási rátával. Ezek alapján ezeket az átalakulásokat Kondo-Anderson átalakulásnak neveztük el [27].

6. A [27] cikkben részletesen kifejtett és először a [5] cikkben bejelentett effektust vizsgáltuk numerikus szimulációkkal. Ennek keretében meghatároztuk a Kondo-hőmérséklet eloszlást éppen a kritikus pontban. A jelen szimuláció lehetővé tette nagyobb tartományban a lineáris méret függését vizsgálni, valamint azt, hogy a multifraktál tulajdonságokat egy szabad, folytonos paraméter változtatásával alakíthassuk. Jó egyezést találtunk az analitikus eredmények és a szimuláció között [28].
7. Heurisztikus érvelés alapján arra a sejtésre jutottunk, hogy általában a multifraktál tulajdonságot mutató sajátvektorok általánosított dimenziói között belső kapcsolat állhat fenn. Ezeket a belső kapcsolatokat a modellek széles skáláján igazoltuk, sőt ennek következményeként azt is megállapítottuk, hogy az általánosított dimenziók, illetve a spektrális kompresszibilitás között is léteznek ilyen relációk, melyek alapjául szolgálhatnak korábban feltárt összefüggéseknek a rendezetlenség hatására létrejövő ún. Anderson-átalakulás esetén [29].
8. Megvizsgáltuk az egyrészezske állapotok lokalizációs tulajdonságait nagy, de nem végtelen nagy rendezetlenség esetén. Azt lehet látni, hogy az inverz részvételi arányként ismeretes paraméter nem nő az energia függvényében a sávközéptől távolodva, a néhány rácshelyre történő lokalizáció anomális viselkedésének következtében. A két-pont közelítést megoldottuk analitikusan egzaktul, ami a jelenség alapvető vonásait már visszaadja az egy-, két-, illetve háromdimenziós mintákon történt szimulációkkal összehasonlítva. Megvizsgáltuk a három-pont kiterjesztést is, de kvalitatíve nem kaptunk lényeges változást, bár kvantitatíve jobb egyezést kaptunk. Az így kapott viselkedést más szerzőkkel egyetemben párhuzamosan publikáltuk, mert bár a probléma több, mint félévszázadra nyúlik vissza érdekes újdonságokat tartogat. Ez az anomália lényegesen eltér a szokásos Anderson-lokalizációtól illetve a sávszéleken várható, ún. Lifshitz-állapotoktól is [30].
9. A topológikus szigetelők kutatása napjainkban rendkívül intenzív. Ebben a kutatási irányvonalba kapcsolódtunk be. Elméletileg tanulmányoztuk a  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  topológikus szigetelő felületén lévő vonal-hiba hatását. A vonal-hiba elektron-állóhullámokat indukál, és alapvetően befolyásolja a jól mérhető lokális állapotosságát. A Fermi-energián, a vonal-hiba közelében és a hibától távoli tartományban a lokális állapotosság-oszcillációk jelentősen eltérnek egymástól. A korábbi elméletekkel ellentétben, a mi modellünk alapján a vonal-hiba közelében számolt lokális állapotosság oszcillációk jó egyezést adnak a pásztázó elektronmikroszkóppal mért eredményekkel (lásd Phys. Rev. Lett. **104**, 016401 (2010)) [31].

## 5. év

Ebben az időszakban előkészítő munkákat végeztünk a jövőbeni, OTKA által támogatott (K108676) kutatásaink érdekében. Az eddigi eredményeink közül egy cikkel kapcsolatos munkánk a jelen pályázati időszakban, illetve a fenti OTKA pályázat kezdeti időszakában történt, és már elfogadásra került a *Physical Review B (Rapid Communications)* folyóiratnál:

1. Számos kétdimenziós rácsban, mint pl. a 'dice' és 'Lieb'-rácsokban a diszperziós reláció, a Dirac-kúp mellett, egy lapos, diszperziómentes energia-sávot is tartalmaz. Tanulmányoztuk ennek a diszperziómentes energia-sávnak a szerepét, ha a rendszerben szennyezők vannak. Habár ebben az esetben a csoportsebesség zérus, a dc vezetőképesség  $\ln(1/g)$  függvény szerint divergál, ahol  $g$  a szennyezés mértékére jellemző dimenziótlans menntiség. A kapott eredmények fontosak lehetnek más, diszperziómentes energia-sávval rendelkező rendszerek esetén is [32].

## Egyéb munkák

A témavezető ismeretterjesztő cikkeket írt a grafénről, amit a projekt témavezetője fontosnak tart a kutatómunkája mellett [33, 34]. A témavezető és az egyik résztvevő, Csordás András, az MTA doktori munkájukat sikeresen megvédték, és 2010-től az MTA doktorai [35, 36]. Csordás András 2009-ben habilitált az ELTE-n [37]. Három PhD dolgozat készült az ELTE-n: Dávid Gyula, a jelen pályázat résztvevője [38], Rakyta Péter [39], és Péterfalvi Csaba Géza [40] (az utóbbi két hallgatónak a témavezetője a jelen pályázat témavezetője volt). A fenti munkák témája szorosan kapcsolódik a jelen pályázat kutatási területéhez.

## Hivatkozások

- [1] A. Pályi and J. Cserti. Spin-dependent electron-impurity scattering in two-dimensional electron systems. *Phys. Rev. B*, 78(24):241304–241307, DEC 2008.
- [2] C. J. Lambert, S. W. D. Bailey, and J. Cserti. Oscillating chiral currents in nanotubes: A route to nanoscale magnetic test tubes. *Phys. Rev. B*, 78(23):233405–233408, DEC 2008.
- [3] Cs. Péterfalvi, A. Pályi, and J. Cserti. Electron flow in circular n-p junctions of bilayer graphene. *Phys. Rev. B*, 80(7):075416–075421, AUG 2009.
- [4] József Cserti, Imre Hagymási, and Andor Kormányos. Graphene Andreev billiards. *Phys. Rev. B*, 80(7):073404–073407, AUG 2009.
- [5] S. Kettemann, E. R. Mucciolo, and I. Varga. Critical metal phase at the Anderson metal-insulator transition with kondo impurities. *Phys. Rev. Lett.*, 103:126401, Sep 2009.
- [6] A. Kormányos, P. Rakyta, L. Oroszlány, and J. Cserti. Bound states in inhomogeneous magnetic field in graphene: Semiclassical approach. *Phys. Rev. B*, 78(4):045430–045437, JUL 2008.
- [7] D. Zs. Manrique, J. Cserti, and C. J. Lambert. Chiral currents in gold nanotubes. *Phys. Rev. B*, 81(7):073103, Feb 2010.
- [8] P. Rakyta, A. Kormányos, J. Cserti, and P. Koskinen. Exploring the graphene edges with coherent electron focusing. *Phys. Rev. B*, 81(11):115411, Mar 2010.

- [9] Gyula Dávid and József Cserti. General theory of Zitterbewegung. *Phys. Rev. B*, 81(12):121417 (R), Mar 2010.
- [10] P. Rakyta, A. Kormányos, and J. Cserti. Trigonal warping and anisotropic band splitting in monolayer graphene due to Rashba spin-orbit coupling. *Phys. Rev. B*, 82(11):113405, Sep 2010.
- [11] Csaba Péterfalvi, András Pályi, Ádám Rusznyák, János Koltai, and József Cserti. Catastrophe optics of caustics in single and bilayer graphene: Fine structure of caustics. *Phys. Status Solidi B*, 247:2949–2952, 2010.
- [12] J. A. Méndez-Bermúdez, Victor A. Gopar, and Imre Varga. Scattering and transport statistics at the metal-insulator transition: A numerical study of the power-law banded random-matrix model. *Phys. Rev. B*, 82:125106, Sep 2010.
- [13] I. Kuznetsova, N. Gógh, J. Förstner, T. Meier, S. T. Cundiff, I. Varga, and P. Thomas. Modeling excitonic line shapes in weakly disordered semiconductor nanostructures. *Phys. Rev. B*, 81:075307, Feb 2010.
- [14] J. Alcazar-Lopez, A. Mendez-Bermudez, and I. Varga. Broken time-reversal symmetry scattering at the Anderson transition. *Ann. der Physik (Berlin)*, 18:896–900, 2009.
- [15] J. A. Mendez-Bermudez, Victor A. Gopar, and Imre Varga. Conductance distribution at criticality: one-dimensional Anderson model with random long-range hopping. *Ann. der Physik (Berlin)*, 18:891–895, 2009.
- [16] N. Gogh, P. Thomas, I. Kuznetsova, T. Meier, and I. Varga. Localization of excitons in weakly disordered semiconductor structures: A model study. *Ann. der Physik (Berlin)*, 18:905–909, 2009.
- [17] András Csordás, Orsolya Almásy, and Péter Szépfalussy. Gradient corrections to the local-density approximation for trapped superfluid fermi gases. *Phys. Rev. A*, 82:063609, Dec 2010.
- [18] Imre Hagymási, Andor Kormányos, and József Cserti. Josephson current in ballistic superconductor-graphene systems. *Phys. Rev. B*, 82(13):134516, Oct 2010.
- [19] József Cserti and Gyula Dávid. Relation between Zitterbewegung and the charge conductivity, Berry curvature, and the Chern number of multiband systems. *Phys. Rev. B*, 82(20):201405 (R), Nov 2010.
- [20] József Cserti, Gábor Széchenyi, and Gyula Dávid. Uniform tiling with electrical resistors. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 44(21):215201.
- [21] László Ujfalusi, Imre Varga, and Dániel Schumayer. Quantum chaos in one dimension? *Phys. Rev. E*, 84:016230, Jul 2011.
- [22] P. Rakyta, A. Kormányos, and J. Cserti. Effect of sublattice asymmetry and spin-orbit interaction on out-of-plane spin polarization of photoelectrons. *Phys. Rev. B*, 83(15):155439, Apr 2011.
- [23] P. Makk, D. Visontai, L. Oroszlány, D. Zs. Manrique, Sz. Csonka, J. Cserti, C. Lambert, and A. Halbritter. Advanced simulation of conductance histograms validated through channel-sensitive experiments on indium nanojunctions. *Phys. Rev. Lett.*, 107, Dec 2011.

- [24] A. Csordás, G. Homa, and P. Szépfalusy. Calculation of the even-odd energy difference in superfluid fermi systems using the pseudopotential theory. *EPL (Europhysics Letters)*, 97:37005, 2012.
- [25] Csaba G Péterfalvi, László Oroszlány, Colin J Lambert, and József Cserti. Intraband electron focusing in bilayer graphene. *New Journal of Physics*, 14(6):063028, 2012.
- [26] Gyula Dávid, Péter Rakyta, László Oroszlány, and József Cserti. Effect of the band structure topology on the minimal conductivity for bilayer graphene with symmetry breaking. *Phys. Rev. B*, 85, Jan 2012.
- [27] S. Kettemann, E. R. Mucciolo, I. Varga, and K. Slevin. Kondo-Anderson transitions. *Phys. Rev. B*, 85:115112, 2012.
- [28] I. Varga, Stefan Kettemann, and E. R. Mucciolo. Local pseudogaps and free magnetic moments at the Anderson metal-insulator transition: Numerical simulation using power-law band random matrices. In *Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser.*, 11, 2012.
- [29] J. A. Mendez-Bermudez, A. Alcazar-Lopez, and I. Varga. Multifractal dimensions for critical random matrix ensembles. *EPL*, 98:37006, 2012.
- [30] László Ujfalusi and Imre Varga. Anderson localization at large disorder. *Phys. Rev. B*, 86:125143, Sep 2012.
- [31] P. Rakyta, A. Pályi, and J. Cserti. Electronic standing waves on the surface of the topological insulator  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . *Phys. Rev. B*, 86:085456, Aug 2012.
- [32] M. Vigh, L. Oroszlány, Sz. Vajna, P. San-Jose, Gy. Dávid, J. Cserti, and B. Dóra. Diverging dc conductivity due to a flat band in disordered pseudospin-1 Dirac-Weyl fermions. *accepted in Phys. Rev. B*, 2013.
- [33] Cserti József, A grafén, a nanofizika egyik reménysége, *Természet Világa*, 140:15–17. oldal, 2009.
- [34] Cserti József, Nobel-díj a grafénért, *Természet Világa*, 142. évf. 2. szám (február):50–51. oldal, 2011.
- [35] Cserti József, Kétdimenziós kvantumrendszerek nanoszerkezetekben, MTA doktori dolgozat, 2010.
- [36] Csordás András, Csapdázott ultrahideg gázok gerjesztéseinek vizsgálata, MTA doktori dolgozat, 2010.
- [37] Csordás András, Csapdázott gázok gerjesztései, Habilitációs értekezés, (ELTE) 2009.
- [38] Dávid Gyula, A Zitterbewegung általános elmélete, PhD dolgozat, (ELTE) 2011.
- [39] Rakyta Péter, Fotoemissziós és pásztázó alagútmikroszkópos mérések modellezése Dirac-féle elektronok vizsgálatánál, PhD dolgozat, (ELTE) 2012.
- [40] Péterfalvi Csaba Géza, Szemiklasszikus elektronoptika grafén rendszerekben, PhD dolgozat, (ELTE) 2013.