

**Zárójelentés a K46303 számú,  
"Korrelációk és rendezetlenség mezoszkópikus és erősen korrelált  
rendszerekben"  
című OTKA kutatási pályázathoz kapcsolódó kutatási eredményekről  
(témavezető: Zaránd Gergely)**

Az OTKA projekthez kapcsolódó kutatásaink során korrelációs effektusokat, ill. a rendezetlenség és a korrelációk együttes hatását tanulmányoztuk.

Kutatásaink egy részében mezoszkópikus rendszerek viselkedését tanulmányoztuk. Mezoszkópikusnak hívjuk általában az olyan parányi rendszereket/áramköröket, melyeknek valamelyik térbeli kiterjedése kisebb mint a töltéshordozók koherencia hossza, de ugyanakkor még mindig sokkal nagyobb mint az atomi skála. Ezeknek a rendszereknek, melyek a miniatürizáció során váltak igen fontossá, a fizikai tulajdonságai sok szempontból különböznek a makroszkópikus rendszerek tulajdonságaitól: mind az elektron-elektron kölcsönhatás, mind pedig a rendezetlenség ill. a rendszerspecifikus apró részletek fontos szerepet játszanak esetükben. A kutatás célja ezeknek a tulajdonságoknak együttes tanulmányozása volt. Egyik fő célunk a szennyezések ill. a koherenciát erősen befolyásoló inelasztikus folyamatok megértése volt. Másfelől kvantum pöttyökben fellépő egzotikus korrelált állapotokat vizsgáltunk kutatásaink során.

A projekt másik fő célkitűzéseként rendezetlen rendszerekbeli korrelációs effektusokat, a fém-szigetelő fázisátalakulás számos vonását, és korreláció-indukálta kvantum fázisátalakulásokat tanulmányoztunk numerikus és analitikus módszerekkel. Itt kutatásaink elsősorban a félvezető rendszerekbeli Mott-Anderson átalakulásra ill. a mágnesség és a rendezetlenség mágneses félvezetőkbeli összefüggésének tanulmányozására irányultak.

Kutatásaink a következő témakörök köré csoportosultak:

### **Inelasztikus folyamatok vizsgálata mezoszkópikus rendszerekben**

Kutatásaink egy részében a nem egyensúlyi kvantum drótokbeli inelasztikus folyamatokat tanulmányoztuk. Mágneses szennyezők hatását vizsgáltuk a vékony drótokban, nagy ráadott feszültség mellett mért nem egyensúlyi elektron eloszlás függvényre, a Boltzmann egyenletet szelf-konzisztensen megoldó számítógépes program kifejlesztésével. Megmutattuk, hogy a vékony mintákban a mágneses szennyezők számára kialakuló felületi mágneses anizotrópia figyelembe vétele feloldhatja az energia relaxációs, valamint a fázisvesztés mérésekből kapott koncentrációk közti ellentmondást: míg a nem egyensúlyi elektron eloszlást mérő kísérletekben nincs számottevő hatása az effektív koncentrációra, a fázisvesztés mérésekben viszont egész spinű szennyezők esetén jelentős méretfüggést okoz, jelentősen lecsökkentve az effektív koncentrációt. [O. Újsághy, A. Jakovác, and A. Zawadowski, Phys. Rev. Lett. 93, 256805 (2004).] Részletesen tanulmányoztuk, hogyan relaxálódik az elektronok nem egyensúlyi eloszlása egy dimenziós nem egyensúlyi kvantum drótokban, a mágneses szennyezőkön való inelasztikus szórás következtében. [O. Újsághy et al., Phys. Rev. B 72, 205119 (2005).]

Másik célkitűzésünk a belső dinamikával rendelkező (mágneses vagy dinamikai) szennyezőkön való inelasztikus szórás tanulmányozása volt nem perturbatív módszerekkel. Ez a probléma, mely a mezoszkópikus rendszerek fizikájának szempontjából igen nagy jelentőséggel bír, mintegy 50 éve megoldatlan volt, és számos erre vonatkozó, a kísérleti fizikusok által általánosan használt elméleti eredmény is alapvetően hibás volt. Formalizmust dolgoztunk ki, melynek segítségével meghatározható numerikus renormálási csoport módszer segítségével egy általános kvantum szennyezőn való szórás inelasztikus hatáskeresztmetszete a bejövő elektron energiájának függvényében. A módszert a Kondo problémára alkalmaztuk először, [G. Zaránd, et al., Phys. Rev. Lett. 93, 107204 (2004)] majd kiterjesztettük más szennyező

modellekre is [G. Zarand and L. Borda, Physica E 40, 5, 2007; L. Borda et al, Physical Review B 75, 235112, 2007]. Egy másik munkánkban azt próbáltuk megérteni, hogy a naív peturbatív számítások miért hibásak, és miért mondanak ellent az egzakt eredménynek. Ehhez elektronoknak mágneses szennyezéseken való szóródását vizsgáltuk abban a határesetben, mikor a bejövő elektron energiája lényegesen meghaladja a Kondo hőmérsékletet. Az így kapott inelasztikus szórási hatáskeresztmetszet a bejövő elektron energiájától gyengén függ, a tipikus energia-transzfer a Kondo hőmérséklet értékével egyezik meg.[M. Garst et al., Phys. Rev. B 72, 205125 (2005).] A fenti kutatásoknak a során vált világossá számunkra, hogy a kvantum szennyezés modellek szokásos „Fermi folyadék” ill. „nem Fermi folyadék” kategóriákba való sorolása túlegyszerűsített, és hogy szükség van az ún. szinguláris Fermi folyadék kategória bevezetésére. Bethe Ansatz és numerikus renormálási csoport módszerével elemeztük az  $S=1$  alulárnyékolt Kondo-modellt. Megmutattuk, hogy ennek a rendszernek az alacsony hőmérsékletű viselkedését csak a szinguláris Fermi-folyadék elmélet keretében érthetjük meg [P. Mehta et al. Phys. Rev. B 72, 014430, 2005].

Tanulmányoztuk azt is, hogy egy kvantum dotban izolált elektron spinje hogyan relaxálódik a spin-pálya kölcsönhatás és az elektromágneses fluktuációk hatására. Megmutattuk, hogy egy kvantum dotban izolált spin külső mágneses tér nélkül is relaxálódik spin-pálya kölcsönhatás jelenlétében [P. San-Jose, et al., Phys. Rev. Lett. 97, 076803 (2006); Physica E 40, 76, 2007]. A relaxáció geometrai, egy véletlenszerű Berry fázis indukálja. Azt is megmutattuk, hogy alacsony külső tereknél a relaxációt a vezetékbeli elektron-lyuk gerjesztések hozzák létre a közhiedelemmel ellentétben, nem pedig fononok. Analízisünket kiterjesztettük egy olyan pálya-integrál ill. diagrammtechnikai formalizmust kifejlesztve, mely egyidejűleg lehetővé tette az adiabatikus közelítés kiterjesztését nagyobb elmozdulások esetére, az elektromágneses tér kvantum térként való kezelését, illetve a szemiklasszikus limesz értelmezését is [Pablo San-Jose et al., Phys. Rev. B 77, 045305, 2008]. Megmutattuk azt is, hogy a spin-pálya kölcsönhatás indukálta nem Abeli Berry fázis mechanizmus használható a spin manipulálására is.

## **Korrelált állapotok vizsgálata kvantum pötty (dot) ill. atomi rendszerekben**

### Kvantum dot rendszerek vizsgálata

Több munkánkban vizsgáltunk csatolt kvantum pötty rendszerek transzport tulajdonságait. Kutatásaink egy részében azt vizsgáltuk, hogy hogyan lehetséges ilyen rendszerek segítségével nem Fermi folyadék állapotokat megvalósítani.

Megvizsgáltuk, hogy milyen körülmények között lehetséges két csatolt mezoszkópikus kvantum dotban elérni az ún. két szennyezés Kondo kvantum kritikus pontot, amely a kvantum kritikus rendszerek egyik legismertebb példája [Zarand G, et al, Phys. Rev. Lett. 97, 166802 (2006)]. Megmutattuk, hogy a kvantum kritikus viselkedést a két dot közötti töltés transzport rontja el, és javaslatot tettünk, hogy a gyakorlatban hogyan lehet ezt a folyamatot elnyomni több kvantum dot beiktatásával. Egy másik munkánkban egy a David Goldhaber-Gordon által megvalósított két dot rendszert vizsgáltunk, mely a nem Fermi folyadék rendszerek másik prototípusát, a két csatornás Kondo modellt valósítja meg. Ennek a rendszernek az optikai vezetőképességét tanulmányoztuk numerikus renormálási csoport ill. konform térelméleten alapuló skálaelmélet segítségével, és megvizsgáltuk, hogy a nem Fermi folyadék tulajdonságok hogyan jelennek meg az optikai vezetőképességben [A. I. Tóth et al., Phys. Rev. B 76, 155318, 2007].

Egy másik munkánkban sikerült egy másik fázisátalakulást is azonosítanunk: Két elektródához aszimmetrikusan csatolt kvantum pötty rendszert vizsgáltunk, arra az esetre szorítkozva, mikor a két szomszédos Coulomb-blokád völgyben a kvantum pötty spinje  $S=1/2$  ill.  $S=1$  [M. Pustilnik, L. Borda, Phys. Rev. B 73, 201301(R) (2006)]. Demonstráltuk, hogy ez a rendszer kvantum fázisátalakulást és spin-töltés szeparációt

mutat: az átalakulás környezetében a pötty spinje kvantált, míg a töltése folytonosan változik. Az átalakulási tartományban a rendszer spin-szűrőként alkalmazható.

Két csatolt kvantum dot leírására kifejlesztettünk egy renormált Fermi folyadék körüli perturbatív technikát, melynek segítségével le tudtuk írni az instabil Fermi folyadék állapot körüli viselkedést. Ez az analitikus módszer igen jó egyezést mutatott a numerikus renormálási csoport számításokkal [Chung-Hou Chung et al., Phys. Rev. B 77, 035120, 2008].

#### Mezozkópikus rendszerekbeli korrelált atomok ill atomi klaszterek vizsgálata:

Kutatásaink egy másik célkitűzése volt megérteni, hogy hogyan viselkedik egy mezozkópikus rendszerbe helyezett ill. azzal kölcsönható mágneses szennyező.

Egyik munkánkban egyetlen, egy kvantum dotba helyezett mágneses szennyező hatását vizsgáltuk a csatolt rendszer energiaspektrumára. Ez utóbbi transzport mérésekkel meghatározható. Egy egzakt alapállapotú tételt konstruáltunk, a gerjesztések kvantumszámait pedig perturbatív eszközökkel ill. MC szimulációval határoztuk meg. Azt találtuk, hogy az energiaszintek fejlődése az erősen korrelált állapot felépülését tükrözi. Megmutattuk továbbá, hogy egy csatolt kis kvantum dot - nagy kvantum dot rendszerben a nagy dot méretének ill. a két dot közötti csatolásnak a függvényében megváltozik a diszkrét energiaszintek spektruma [Kaul RK, Zarand G, Chandrasekharan S, et al, Phys. Rev. Lett. 96, 176802 (2006)].

Vizsgáltuk továbbá atomok ill. atomi klaszterek felületek közelében illetve felületeken való viselkedését is. Először egyetlen, felület közelébe helyezett atom viselkedését vizsgáltuk. Új mechanizmust mutattunk, mely felületek közelében mágneses anizotrópiát generál a szennyező mágneses atomon lévő spin-pálya kölcsönhatásnak köszönhetően [Szunyogh L, Zarand G, Gallego S, et al, Phys. Rev. Lett. 96, 067204 (2006)]. A mechanizmus lényege, hogy a felület által keltett Friedel oszcillációk a szennyező atomon spinjéhez az az atomi pályamomentumok segítségével csatolódnak. Ez a mechanizmus egy a kísérletekkel összhangban lévő anizotrópiát eredményez, mely sokkal erősebb, mint a korábban vizsgált mechanizmusok bármelyike. Egy másik munkánkban Mike Crommie mérései által inspirálva egy Cr atomi klasztert vizsgáltunk és renormálási csoport ill. ab initio számításokat ötvözve megmutattuk, hogy egy Au felületen elhelyezkedő Cr trimerben egy egzotikus Kondo állapot jön létre a belső rejtett orbitális kvantumszámoknak köszönhetően, egy több ezerszeresére megnövekedett Kondo hőmérséklettel, összhangban Mike Crommie eredményeivel [B. Lazarovits, et al., Phys. Rev. Lett. 95, 077202 (2005)].

### **Rendezetlen félvezető rendszerek vizsgálata**

A mágneses félvezetők a rendezetlen félvezető rendszerek alkalmazások szempontjából egyik legfontosabb családját alkotják, hiszen ilyen rendszerek számos spintronikai alkalmazást tesznek lehetővé. Ezekben a rendszerekben ugyanakkor egyidejűleg lépnek fel korrelációs és lokalizációs effektusok, valamint mágnesség, és a spin-pálya kölcsönhatás is igen erős. Kutatásaink egy részében ilyen rendszerek transzport és mágneses tulajdonságait tanulmányoztuk.

Az ún. hat sáv közelítést használva meghatároztuk GaMnAs-ben a két Mn spin közötti kölcsönhatást. Azt tapasztaltuk, hogy a két spin közötti kölcsönhatás kis távolságokra izotróp, míg nagy Mn-Mn távolságnál erősen anizotróp. Az effektív kölcsönhatást használva Monte Carlo szimulációkat végeztünk, és megmutattuk hogy a híg határesetben nem kollineáris állapot alakulhat ki [GA. Fiete, et al., Phys. Rev. B 71, 115202 (2005); GA Fiete, et al, Phys. Rev. B 72, 045212 (2005)].

Mikroszkópikus számítások alapján effektív térelméleti modellt alkottunk nagyon híg mágneses félvezető ötvözetekbeli lyukak dinamikájának leírására. A modellt Monte Carlo szimuláció és átlagtérelmélet segítségével tanulmányoztuk, és megmutattuk, hogy lehetséges a szennyezési sávban egy lokalizációs fázisátalakulás létrejötte, valamint hogy

a spin-pálya kölcsönhatás természetesen vezet nem-kollineáris állapotok megjelenéséhez.

Skálaelméletet alkottunk rendezetlen mágneses ötvözetek transzporttulajdonságainak leírására, aholis figyelembe vesszük a mágnesség hatását a rendezetlenség következtében fellépő lokalizációs effektusokra. Az elmélet kiválóan leírja a rendezetlen mágneses félvezetőkben megfigyelhető anomális magnetorezisztenciát. [G. Zaránd et al., Phys. Rev. Lett. 94, 247202 (2005).]

Kutatásaink a mágneses félvezető rendszerek tanulmányozása mellett kiterjedtek egyéb félvezető struktúrák/ rendszerek vizsgálatára is. Egy új, tisztán optikai sémán alapuló módszert mutattunk be, mely félvezető nanostruktúrákban található rendezetlenség kísérleti feltérképezésére szolgál [P. Bozsoki, et al., Phys. Rev. Lett. 97, 227402 (2006)]. A módszer alapja a nanostruktúra által spontán módon kibocsátott foton szög szerinti autokorrelációjának meghatározása. A cikkben ezt a korrelációs függvényt numerikusan kiértékeljük egy modellrendszerre. E munka folytatásaként egy egyszerűsített független két-állaptú rendszerekből álló modell segítségével analitikusan szisztematikusan vizsgáltuk, hogy a jelenséget hogyan befolyásolja a rendezetlen potenciálban tapasztalható korrelációs hossz, az emittált fény hullámhossza illetve a foltméret [P. Bozsoki et al., Journal of Luminescence, 124, 99-112 (2007)].

Az anomális Hall effektus az utóbbi évek során komoly érdeklődés középpontjába került. A több évtizedes kutatás ellenére még mindig nincs általánosan elfogadott elmélete az anomális Hall effektusnak. Igen fontos lenne a megérteni, hogy ferromágneses rendszerekben a mágneses szennyezők hogyan vezetnek anomális Hall effektushoz. Miután a 3 dimenziós probléma igen nagy kihívást jelent, először egy két dimenziós elektron gáz esetében vizsgáltuk, hogy a mágneses szennyezők hogyan vezetnek a Rashba ill. Dresselhaus kölcsönhatás következtében anomális Hall effektushoz. Azt találtuk, hogy ha a szennyezőktől származó potenciálszórást csakúgy mint a kicserélődési kölcsönhatás következtében fellépő szórást figyelembe vesszük, az anomális Hall koefficiens erősen nem lineáris viselkedést mutat a szórási folyamat során fellépő interferenciátagoknak köszönhetően, és esetenként előjelet is válthat [Tamara S. Nunner et al., Phys. Rev. Lett. 100, 236602, 2008]. Ez az eredmény összhangban van Mihály György csoportjában végzett mérésekkel [G. Mihaly et al Phys. Rev. Lett. 107201 2008].

A szabályos félvezetők lumineszcenciáját leíró mikroszkopikus elméletet módosítottuk, hogy erősen rendezetlen rendszereket is le tudjon írni. Megközelítésünk együtt tárgyalja az ún. diagonális rendezetlenséget illetve a Coulomb kölcsönhatást is. Egy esettanulmány keretében az egydimenziós, két-sáv, erősen kötött modellben kialakuló elektron-lyuk plazma által kibocsátott fényt vizsgáltuk. Szabályos határesetben mind direkt, mind pedig indirekt sávval rendelkező félvezető struktúrákat is megvizsgálá-tunk. Kiszámítottuk a lumineszcencia és abszorpciós spektrumokat különböző erősségű rendezetlenség illetve mint a hőmérséklet mellett, meghatároztuk a Stokes-eltolódást illetve az elektron-lyuk párok radiatív élettartamát [P. Bozsoki et al. J Matl. Science: Materials in Electronics, online journal (2007)].

### **Korrelált szennyezésmodellek vizsgálata**

Több munkánkban vizsgáltunk prototipikus korrelált szennyezésmodelleket.

Numerikus renormálási csoport módszerrel tanulmányoztuk az ún. asszisztált alagútazás hatását a szennyezés-modellekben. Azt tapasztaltuk, hogy a szupravezető fluktuációk amplitúdója jelentősen megnövekszik a asszisztált alagútazás eredményeképp [L. Borda, F. Guinea, Phys. Rev. B 70, 125118 (2004)]. Tovább vizsgáltuk azt is, hogy megvalósulhat-e a két csatornás Kondo viselkedés dinamikus rácshibák esetében.

Megmutattuk, hogy a korábbi állításokkal szemben, az erős csatolású tartományban létezik egy kiterjedt hőmérséklettartomány, ahol a kétállapotú rendszerek két csatornás Kondo viselkedést mutatnak. Ez a tartomány könnyen elérhető, ha az alagutazó atomon rezonanciaszórás van. [G. Zaránd, Phys. Rev. B 72, 245103 (2005).]

Numerikus renormálási csoport, bozonizáció és skála analízis módszerével vizsgáltuk a Bose-Fermi Kondo modell fázisdiagramját. Ez a modell a bozonikus és fermionikus módusokhoz egyszerre csatoló spin dinamikáját együttesen írja le. Az anizotróp Bose-Fermi modell írja le többek között egy az elektromágneses módusokhoz is csatolt kvantum dot kvantum fluktuációit a töltés degenerált tartományban. Megmutattuk, hogy erős disszipációnál egy fázisátalakulás jön létre, ahol a töltésfluktuációk megszűnnek. [L. Borda, et al., Phys. Rev. B 72, 155311 (2005)]. Hasonló modell írja le egy rendezett antiferromágnesben egy szennyező spin dinamikáját. Megmutattuk, hogy a spinhullámokhoz való erős csatolások gyengítik egymást, és így a spin még erős disszipáció esetén is koherensen viselkedik. [E. Novais et al., Phys. Rev. B 72, 014417 (2005).]

Ezen kívül erőfeszítést tettünk egy másik igen fontos és igen régi megoldatlan probléma, a Kondo kompenzációs felhő számításának megoldására. A numerikus renormálási csoport módszerét tovább fejlesztve alkalmassá tettük térbeli korrelációk számolására [L. Borda, Phys. Rev. B 75, 041307(R), 2007]. A módszer segítségével kiszámítottuk az egy dimenziós Kondo árnyékolási felhő hely- és hőmérsékletfüggését. Megmutattuk, hogy ezt aszimptotikusan jól leírja a Fermi folyadék elmélet (azaz egy egyszerű rezonáns szint modell).

Mind térelméleti mind pedig numerikus módszerek segítségével tanulmányoztuk egy spin nélküli rezonáns energiaszint dinamikáját, mind egyensúlyi mind pedig nem egyensúlyi körülmények között [L. Borda et al, Phys. Rev. B 75, 125107 (2007)].

Megvizsgáltuk, hogy egy szupravezetőbe ágyazott mágneses atom realiztikus struktúrája hogyan befolyásolja a gapben létrejövő ún. Shiba állapotokat. Megmutattuk, hogy a d-nívó belső szerkezetének köszönhetően több Shiba állapot is létre jöhet, és hogy ezeket jól el lehet különíteni a koherencia csúcstól a spin polarizált STM spektrumban [Cătălin Paşcu Moca et al., Phys. Rev. B 77, 174516, 2008].

Részletesen tanulmányoztuk, hogy a nem egyensúlyi Anderson modell esetében hogyan mond csődöt az átlagtérelmélet. Érdekes módon ilyen részletes tanulmány, bár alapvető kérdést feszeget, korábban még nem jelent meg az irodalomban. Megmutattuk, hogy az átlagtérelméleten belül hiszterézis valamint nem egyensúlyi spin polarizált állapotok jelennek meg a korrelált tartományban. Ugyan ezek az eredmények nem nagyon meglepők a soktestprobléma témakörében járatos kutatók számára, az ab initio számításokat végző kutatók számára igen fontosak lehetnek, és remélhetőleg némi elővigyázatosságra intenek [B. Horváth et al., Phys. Rev. B 77, 113108, 2008].

## **Kvantum kritikus rendszerek és kvantum fázisátalakulások vizsgálata**

Kutatásaink során számos korreláció illetve rendezetlenség-indukálta kvantum fázisátalakulást tanulmányoztunk.

Megvizsgáltuk a legegyszerűbb 1-dimenziós esetben, hogy egy kvantum fázisátalakulás közelében hogyan viselkednek a kvázi-részecskék, amennyiben azok belső kvantumszámokkal is rendelkeznek. Kiterjesztettük Sachdev és Young szemiklasszikus elméletét a Q -állapotú kvantum Potts modellre. Meghatároztuk mind a gapes, mind pedig a kvantum kritikus tartományban a dinamikus korrelációs függvényt, az utóbbi tartományban konform térelméletet alkalmazva [Rapp A and Zarand G, Phys. Rev. B 74, 014433 (2006)]. A gapes fázisban megmutattuk, hogy a spin korrelációs függvény diffúziós viselkedést mutat, ami azzal van kapcsolatban, hogy az alacsonyenergiás elmélet eredményeink szerint  $SU(Q-1)$  szimmetriát mutat.

Az optikai rácsban csapdázott hideg atomok a hangolható erősen korrelált rendszerek között igen jelentős szerepet játszanak. Ilyen, erősen vonzó kölcsönhatással kölcsönható, három fermionból álló rendszereket tanulmányoztunk. Megmutattuk, hogy három komponensű vonzó fermionikus hideg atomi rendszerekben egy baryonikus fázis jelenik meg, ahol a fermionok kötött trionokat (baryonok) képeznek [A. Rapp et al, Phys. Rev. Lett. 98, 160405 (2007); and Phys. Rev. B 77, 144520 (2008)]. Ez a fázisátalakulás a QCD szín szupravezető – baryon fázisátalakulásának analógja.

Kísérletet tettünk, olyan átlagtér elmélet megkonstruálására, amely  $SP(N)$  spineket használ, és egy nehéz-Fermion rendszernek mind az antiferromágneses-, mind pedig a Fermi folyadék fázisát képes leírni [Rech J, Coleman P, Zarand G, et al, Phys Rev. Lett. 96, 016601 (2006)]. Az formalizmust két szennyezés esetén teszteltük, és megmutattuk, hogy az ott képes a kvantum kritikus pont leírására is.

Tanulmányoztuk továbbá a rendezetlenség hatására létrejövő fém-szigetelő fázisátalakulás néhány tulajdonságát is. A korábban említett mágneses félvezető rendszereken kívül kváziperiodikus (Aubrey-André ill. Harper modell) rendszerben létrejövő fém szigetelő átalakulást is vizsgáltunk a fázistéren, vagyis koherens állapot reprezentációban. A modell az impulzus és a koordináta reprezentációra nézve egy bizonyos dualitással is rendelkezik, amely az átalakulásnál öndualitást eredményez. Megállapítottuk, hogy a kritikus pontot kivéve a potenciál erősségének növekedtével a sajátállapotokra az impulzustérbeli viselkedés dominál, a fázistéren folyamatos összehúzódnást tapasztaltunk, csak a kritikus pont közvetlen környezetében történt fázistérbeli szétterjedés [C. Aulbach et al., New J of Physics 6 (2004) 70].

Megvizsgáltuk, hogy egy hozzávezetés (kontaktus) hatására egy véges méretű rendezetlen rendszerben a kialakuló rezonanciák szélessége valamint az ún. Wigner-Smith-féle késleltetési idő fluktuációi hogyan függenek a zárt rendszerbeli sajátállapotok tulajdonságaitól [J. A. Mendez-Bermudez, I. Varga, Phys Rev B 74, 125114 (2006)]. Meghatároztuk az említett mennyiségek teljes eloszlás függvényét, valamint a „geometriai” átlagukat. Eredményeink szerint az eloszlás függvények a kritikus pontban méretfüggetlenek, ha a geometriai átlagokat a rendszer méretnek megfelelő exponenciával átskálázzuk.

Egy másik munkánkban az elektron-elektron kölcsönhatás és a rendezetlenség együttes hatását vizsgáltuk. A statisztikus mechanika Wigner-féle formalizmusában a Wigner-Liouville-szerű egyenletek numerikus megoldását végeztük el, és ezzel kvantum részecskék dinamikáját vizsgáltuk. Ez a megközelítés a molekuláris dinamika és a Monte Carlo módszerek kombinációjaként fogható föl, melyben releváns dinamikai mennyiségek spektrumát illetve nyomát számítjuk ki. Alkalmazásként kölcsönható elektronok sokaságát tekintettük véletlenszerűen elhelyezkedő szórócentrumok között. Úgy találtuk, hogy az elektronok közötti kölcsönhatás valóban hozzájárulhat az elektromos vezetőképeség növekedéséhez.[V. Filinov, et al. Physica Status Solidi (b) 241 40-46 (2004)].

Az összefonódottság ma már egy olyan fizikai mennyiség, mint az energia, töltés vagy tömeg, mely a kvantum információ feldolgozás egyik legalapvetőbb eszköze. Egyik munkánkban egy  $N$ -kubitos kiterjedt rendszert vizsgáltunk. Egy kubitnak az felelt meg, hogy az erősen kötött közelítésben felépített rendszer egyik rácshelyén található elektron, vagy sem. A kérdés az, hogy a rendszer különös sajátállapotai, hogyan befolyásolják egy kiválasztott kubit összefonódottságát a többivel illetve két kiválasztott kubit összefonódottságát az  $N-1$  kubitos rendszeren keresztül. Az összefonódottságnak több fajta mértékét is meghatároztuk: a konkurenciát, a purity-t illetve az összefonódottsági entrópiát, valamint ezek skálázását a rendszer méret,  $N$  függvényében. A rendszer sajátállapotai az Anderson-féle fém-szigetelő átmenetnél tapasztalt multifraktál állapotok voltak [I. Varga and J.A. Mendez-Bermudez, physica status solidi (c) 5, 867-870 (2008)].

**Disszertációk, összefoglaló cikkek, diplomamunkák meghívott előadások**

A kutatásokhoz kapcsolódóan számos összefoglaló munka született. Ezek közül talán a legjelentősebb egy a kvantum szennyezés-modellek témakörében készült akadémiai doktori disszertáció [G. Zaránd, MTA doktori értekezés, 2005]. Ezen kívül egy összefoglaló cikkünk jelent meg egy nyári iskolán tartott előadássorozat anyagából [Zarand G, Phil. Mag. 86, 2043-2072 (2006)], és összefoglaló cikket írtunk a mezoszkópikus skálán fellépő Kondo effektusról is [O. Újsághy and A. Zawadowski, J. Phys. Soc. Japan 74, 80 (2005)]. Az OTKA projekthez kapcsolódóan 5 diplomunka [Rapp Ákos, Horváth Bertalan, Burkhard Scharfenberger, Bayer Balázs, Rácz Attila], valamint 1 Ph.D. disszertáció is született [Rapp Ákos, 2008].

### **Összefoglalás:**

Az OTKA projekthez kapcsolódóan mintegy 44 publikációnk jelent meg, melyek kumulatív impakt faktora meghaladja a 150-et, és amelyekre már eddig is több mint 200 független hivatkozás érkezett. A 44 publikáció közül 12 a Physical Review Letters hasábjain jelent meg, míg 20 a Physical Review B-ben. Ezekon kívül még számos a kutatáshoz kapcsolódó munkánk van közlésre benyújtva. A munkák jelentős része nemzetközi együttműködésben született. A kutatásban résztvevő kutatók a kutatáshoz kapcsolódóan mintegy félszáz meghívott előadást tartottak nemzetközi konferenciákon ill. külföldi kutatási intézményekben. A kutatáshoz kapcsolódóan öt diplomamunka, egy Ph.D. értekezés, és egy akadémiai doktori disszertáció született.