

„Non-equilibrium dynamics of low dimensional quantum systems”
című MTA doktori értekezéséről

A benyújtott disszertáció igen magas színvonalú kutatómunkáról ad számot. A dolgozat mindkét elvárt követelménynek messze eleget tesz, azaz a jelölt tömören és közérthetően bemutatja kutatási területének szakmai hátterét, illetve részletezi saját hozzájárulását a nemzetközi eredmények ismertetése mellett. A dolgozat 10 magas impakt faktorú folyóiratban publikált közlemény (4 PRL, 5 PRB, 1 Phys Stat) eredményeire épül, melyekből a Szerző hét tézispontot fogalmazott meg. A dolgozatban minden tézisponthoz megfelelő háttérinformáció található, és mind a hét tézispontot a Szerző saját munkájának fogadom el, amellyel nagyban hozzájárult nemzetközi szinten is kutatási területének fejlődéséhez.

A dolgozat témaválasztása időszerű és a dolgozatban bemutatott rendszerek a nemzetközi kutatás fókuszában állnak. A grafénnek például olyan egyedülálló elektromos tulajdonságai vannak, melyek planáris elektronikus eszközök fejlesztésben kiemelt figyelmet érdemelnek. Ezen felül a Dirac-elektronok nemegyensúlyi transzport tulajdonságainak vizsgálata kétdimenziós rendszerekben, kiváltképpen az erős elektromos tér határesetre, a modern elektronikai eszközök fejlesztéséhez nyújthat új releváns ismeretanyagot. E témakörben grafénre és topológikus szigetelőkre kevés eredmény ismert, míg az egyensúlyi tulajdonságok jobbára már letisztázottnak tekinthetők. Ilyen rendszerekben a kvantum transzport és a nemlineáris válasz egyedi jellegű tulajdonságokat hordoznak, melyek kvantum aspektusai az alacsony dimenzionalitás révén még inkább relevánssá válnak.

A dolgozat felépítése igen színvonalas és az egyes fejezetek végén található rövid összefoglalók nagyban segítik az olvasót a bemutatott eredmények ismételt áttekintésében. Külön kiemelem azt, hogy Jelölt az első fejezetben egy 36 oldalas bevezetőben nagy részletességgel foglalja össze a későbbi fejezetekben tárgyalandó rendszerek és fizikai folyamatok megértéséhez szükséges alapvető ismeretanyagot. A Szerző elsőként az egyrétegű grafén (MLG) fő ismertető jegyeit, majd a kétrétegű grafén (BLG) tulajdonságait, a topológikus szigetelőket (TI) és végül a Luttinger-folyadékok (LL) elméletét mutatja be. Külön értékes része a dolgozatnak, hogy az egydimenzióban bekövetkező Fermi-folyadék kép letörését a Szerző saját gondolatmenete alapján vezeti be, de talán az irodalomjegyzékben hazai szerzők angol nyelvű könyveit is idézhette volna e témában. A fejezet végén a Szerző kitér a kísérleti megvalósításokra és eredményekre, mint például Beshgard-sók, szén nanocsövek, egydimenziós él-állapotok kvantum Hall-rendszerekben, ultrahideg atomok és Feschbach-rezonancia hangolhatósága.

A 2. fejezetben a Szerző kutatómunkájának fő célkitűzéseit és az azok mögött rejlő motivációkat ismerteti, ezzel is megkönnyítve az olvasó számára a következő 4 fejezetben tárgyalt eredmények egységes képben való értelmezésének lehetőségét.

A 3. fejezetben Jelölt a nemlineáris elektromos transzportot vizsgálja grafénben. A fejezet elején mindjárt kitér arra, hogy a Dirac-vákuum instabil a részecske antirészecske párképződéssel szemben, mely erős mágneses térben új anomális effektusokhoz vezethet. Eredményként adódik, hogy gyenge tér esetén a polarizációs tag (sávok közötti, interband, Zitterbewegung) a domináns, és a Kubo-formula alapján az AC és a DC áram is azonos mivel minden elektron v_F sebességgel terjed. Az áram ezáltal

szaturál, időtől független. Erős térben ezzel szemben a vezetést a sávon belüli folyamatok szabják meg (sok elektron-lyuk pár képződik), azaz a vezetési tag, ami lineárisan nő az időben. Míg konvencionális esetben az elektromos tér gyorsítja az elektronokat, jelen esetben a Schwinger-mechanizmus növeli $n_p(t)$ értékét. Ezután a Szerző rámutat arra, hogy grafénben a nem lineáris transzport kapcsolódik a kritikus viselkedéshez. Egy időbeni átmenet történik t_{cross} időre, azaz $t < t_{\text{cross}}$ esetén nincsen nívó keresztveződés, perturbatív régió és a Kubo-formalizmus alkalmazható, míg $t > t_{\text{cross}}$ esetén a Schwinger-mechanizmus révén párképződés alakul ki, ami nem perturbatív, és egyben nívó keresztveződés történik. A 3.2 fejezetben a Szerző vizsgálja, hogy a Hall-effektus hogyan módosul erős elektromos térben, azaz hogyan változik a hosszanti és a merőleges transzport. Egyik fő eredmény a nemegyensúlyi kvantum (spin) Hall-letörés, azaz a kvantáltság megszűnik elég erős térben. Szerző az elektromos tér erősségének függvényében kétféle viselkedést különböztet meg: $E < E_c$ esetén a gerjesztések kontinuumra alatti elhelyezkedő él állapotok védve vannak a véges gap révén, így a spin Hall-válasz is védve van. Ezzel szemben $E > E_c$ tartományra a gap bezárul, és az él állapotok összekeverednek a kontinuummal, védettségük megszűnik, ami miatt a spin Hall-effektus letörik.

A 4. fejezetben a Szerző a grafént, mint koherensen sugárzó forrás alkalmazhatóságának elvi kérdéseit tárgyalja. Mindezt motiválja az a tény, hogy kétrétegű grafénben (BLG) a sáv gap hangolható, így a grafén szilárdtest lézer alapegységeként is hasznosítható lehet. Ilyen koherens, az infravörös tartományban hangolható spektrális tulajdonságokkal ezidáig csak néhány anyag ismert. A Jelölt olyan defektusokat vizsgál, melyek a külső potenciál hatásaként a felső ágban keletkezett gerjesztett állapotok. Mindehhez figyelembe veszi a rendszer kvantum kritikus viselkedését, Kibble-Zurek skálázódást, numerikusan is ellenőrzi a gerjesztett állapotok számát, és meghatározza egy kvencs okozta defektusok sűrűségét a kétrétegű grafénben. A 4.2 fejezetben a nemegyensúlyi optikai válasz analízise kis elektromos tér esetén arra vezet, hogy a dinamikus vezetőképesség frekvencia függése nagy energiára konstans, míg kis energiára a vezetőképesség negatív a populáció inverzió miatt. További eredményként kimutatja a stimulált emisszió dominanciáját, ami a fáziskoherens válasszal együttesen a lézer szempontjából biztosítja a két alapvető fontosságú tulajdonságot.

Az 5. fejezetben a Szerző a Rabi-oszcillációt vizsgálja grafénben, mely igen érdekes kérdés, hiszen a Landau-nívó különbsége erős mágneses térben négyzetgyök függvény szerint változik, és ezen felül a hullámfüggvény, az átfedések és a kiválasztási szabályok is eltérőek a szokásos 2 dimenziós rendszerektől. A Jelölt rámutat arra, hogy az áram dinamikája kontrollálható a Landau-nívók közötti oszcillációkkal, ami nagy hasonlóságot mutat a Jaynes-Cummings-moddal, vagy más néven Rabi-moddal. Az áram-áram korrelációs függvényből adódó optikai vezetőképesség és a Jaynes-Cummings-moddal való kapcsolat alapján az optikai kiválasztási szabályok és átmentek a Rabi-oszcillációkkal is magyarázhatók. A mikrohullámú Hall-vezetőképesség vizsgálata után pedig Jelölt a grafénben eredményként kapja, hogy a keresztirányú áram korrelációs függvényben nemkonvencionális Hall-lépcsőket figyelhetünk meg a kémiai potenciál és a részecske sűrűség függvényében. Eredményei egyben lehetőséget biztosítanak arra, hogy az elektrodinamika alapvető feltevéseit vizsgálhassunk kondenzált anyagokban is.

A 6. fejezetben a Szerző Floquet-topologikus szigetelőket (TI) vizsgál, melynek fő motivációja, hogy topologikusan nemtriviális anyag igen ritka. Világszinten nagy erőfeszítéseket tesznek arra, hogy topologikusan triviális anyagokból topologikus szigetelőket állítsanak elő különféle fizikai effektusok felhasználásával. A Jelölt, kiindulva egy térben periodikus potenciálból és időben periodikus perturbációból, megadja a Floquet-állapot kvázi energiáját. Ezt követően a kvantum Hall-él-állapot viselkedését vizsgálja cirkulárisan polarizált elektromágneses térben és eredményként kapja, hogy az

időfüggő Zeeman-effektus marad releváns. A fejezet második részében a rendszer topologikus tulajdonságait és a fotoáram részleteit ismerhetjük meg. A Floquet- és Dirac-sávok kapcsolatának megmutatása után Szerző a Chern-szám kifejezését is megkapja. A cirkulárisan polarizált tér hatására a Zeeman-tagon keresztül fotoáram keletkezik (azaz elektronáram generálódik a mágneses tér hatására). A frekvenciafüggés analízise után Jelölt eredményként kapja, hogy alacsony frekvenciákra a Chern-szám kvantált, míg egy kritikus érték felett, amikor a két sáv kereszteződik, elveszti kvantáltságát. A kvantált fotoáram tehát elveszik, amikor az ellentétes Chern-számot hordozó Floquet-állapotok kereszteződnek. A Zeeman-effektus és cirkuláris polarizáció révén a Chern-szám és a fotoáram egy széles frekvencia tartományban kvantált marad. A Szerző ismét kitér a kísérleti mérési lehetőségekre is, azaz, hogy az effektív csatolás értéke nagyban változtatható számos anyagban, továbbá az indukált áram kimérhető és az él állapotoknak topologikus tulajdonsága meghatározható az indukált mágnesezettség és fotoáram alapján.

A 7. fejezetben a Szerző négy fő témakörrel foglalkozik és az analitikus megoldások mellett eredményeit külföldi kollégáival együttműködve numerikus szimulációkkal is alátámasztotta. A dolgozatból egyértelműen megállapítható, hogy az analitikus eredmények Jelölt munkájához köthetők, míg a numerikus számítások az iDMRG és iTEBD módszerek alkalmazása mellett Frank Pollmann eredményei. A tézispontokban megfogalmazott eredmények Jelölt eredményei. A fejezetben tárgyalt négy fő témakör: kölcsönhatások Luttinger-folyadékokban kvencselés után, fermionikus és bozonikus sűrűségmátrixok alakjai, a munka statisztikája kvantum kvencs során, illetve a Loschmidt-visszhang Luttinger-folyadékokban az XXZ modell alapján. A fejezet első felében a Szerző arra a kérdésre keresi a választ, hogy miként befolyásolja egy véges kvencs idő a végállapotokat a kvencselés után Luttinger folyadékokban. A Heisenberg mozgásegyenletről kiindulva egy lineáris kvencsre megmutatja, hogy annak hatása hasonló a felmelegítéséhez. Ezt követően a hirtelen kvencs és az adiabatikus limesz közötti hangolhatóságot vizsgálja, amit kapcsolatba hoz az alacsony és magas energiás gerjesztések tulajdonságaival, illetve a hosszú és rövid távolságú korrelációs függvények alakjával. Az ún. hard core bozon esetet az XXZ Heisenberg-modellben tanulmányozza, ahol a nemperturbatív eredményeket numerikus szimulációkkal is összeveti, kiváló egyezést találva. Egyik fő eredménye, hogy a fermionikus esettel szemben a rövid távú viselkedésben a nagy energiás módusok a dominánsak és az impulzus eloszlás az adiabatikus eloszlás alakjával egyezik meg a kvencs ellenére. A Jelölt megjegyzi azért azt, hogy magasabb rendű korrekciók megváltoztathatják az exponensek értékét. A harmadik részfejezetben Jelölt az állapot karakterizálásához szükséges magasabb momentumok meghatározásához a munka valószínűségi eloszlás függvényét vezeti be, mivel ez minden magasabb momentumot is tartalmaz. Fő eredménye, hogy a munka valószínűségi eloszlás függvény élesen elkülöníthető tulajdonságokkal rendelkezik a rendszer méretének, a kvencs időtartamának és a kölcsönhatások erősségének függvényében. A fejezet végén a Luttinger-folyadékok Loschmidt-válaszát vizsgálja kvencselések után, és univerzális viselkedést talál a nem egyensúlyi időfejlődés számos állapotában. Mindezt numerikus szimulációkkal is összeveti az XXZ Heisenberg-modell alapján.

A dolgozattal kapcsolatban néhány kérdést fogalmazok meg, de az ezekre adott válasz nem befolyásolja a munka kiváló minőségét. A Szerző az elmúlt évtizedben komoly és értékes munkát végzett, mely nemzetközi szinten is kimagasló. Minderről a jelen dolgozat messzemenőig beszámol és a Tézisfüzetben megfogalmazott hét tézispontot Szerző saját eredményeinek fogadom el, amelyekkel nagyban hozzájárult nemzetközi szinten is kutatási területének fejlődéséhez. Mindezek alapján javaslom a dolgozat nyilvános vitára bocsátását és sikeres védés esetén a doktori cím odaítélését.

A dolgozattal kapcsolatban az alábbi kéréseket teszem fel:

A grafén tárgyalásához kapcsolódó kérdéseim:

A Szerző a 7.3-as fejezetben megvizsgálja egy Luttinger-folyadékban végzett munka statisztikáját. Elképzelhető-e hasonló elgondolások használata a Schwinger-féle párkeltésre? A grafénben az erős elektromos tér által keltett elektron-lyuk párok várható értékén túl, amit a szerző vizsgál, érdekes lehet a párkeltés statisztikájának vizsgálata is, vagyis meghatározni, milyen valószínűséggel keltődik adott számú elektron-lyuk pár. A párkeltés valószínűségi eloszlásfüggvénye más viselkedést mutathat a 3.1-es táblázatban részletezett klasszikus, Kubo- és Schwinger-féle tartományokban. Milyen viselkedés várható ezekben a tartományokban?

A Floquet-topologikus szigetelők tárgyalásához kapcsolódó kérdéseim:

A Szerző egy klasszikus elektromágneses tér hatását vizsgálja egy spin-Hall szigetelő él-állapotára. Mi történhet egy kvantált elektromágneses tér esetén? A kvantum optikában a klasszikus, illetve kvantált tér anyaggal való kölcsönhatását leíró Rabi- és Jaynes-Cummings-modellek mutatnak hasonló tulajdonságokat, várható-e hasonló viselkedés a fény - topologikus szigetelők kölcsönhatása esetén a klasszikus és kvantált esetek között?

A 6.4-es egyenlet egy idealizált esetet ír le. Mennyiben érvényesek Jelölt eredményei egyéb, járulékos tagok figyelembe vételekor? Mi történik, ha nem cirkulárisan, hanem csak elliptikusan vagy lineárisan polarizált a fény? Várható-e változás egy konstans mágneses tér jelenlétében?

A Luttinger-folyadékok tárgyalásához kapcsolódó kérdéseim:

A Szerző egy Luttinger-folyadék fázisban történő kölcsönhatási kvencsek hatását vizsgálta, és kiszámította a Loschmidt-echo-t. Mi történne, ha a kvencs során elhagynánk a Luttinger-folyadék fázist, és a végállapot egy gapes fázis lenne? A dolgozatban vizsgált XXZ Heisenberg-modell nyelvén ez egy $|J_z| < 1$ tartományból egy $|J_z| > 1$ tartományba irányuló kvencset jelentene. Egy egyensúlyi fázishatár átlépése a kvencs során megváltoztatná-e a Loschmidt-echo viselkedését, illetve megjelenének-e benne olyan tulajdonságok, melyek az egyensúlyi fázishatár átlépésére utalnak?

Habár a Szerző egyértelműen írta, hogy a numerikus szimulációk külföldi kollégái munkáihoz köthetők, a numerikus és analitikus eredmények kiváló egyezése mégis felveti azt a kérdést, hogy a véges kötődimenzió az iDMRG és iTEBD algoritmusok esetén miért nem okozott jelentősebb hibát kritikus rendszerekre? Hogyan ellenőrizték azt, hogy a véges kötődimenzió miatt megjelenő véges koherenciahossz nem befolyásolta az eredmények pontosságát?

Budapest, 2015.04.02

Legeza Örs
Erősen Korrelált Rendszerek „Lendület” Kutatócsoport
MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont