dc_869_14

MTA doktori értekezés tézisei

Nem-egyensúlyi dinamika alacsony dimenziós kvantum rendszerekben

Dóra Balázs

Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

2014

dc_869_14

1. Bevezetés

Az alacsony dimenziós rendszerek különleges viselkedése régóta foglalkoztatja a fizikusokat. A kvantum fluktuációk különösen felerősödnek a lecsökkent térbeli dimenziók miatt, melyek számos meglepő jelenségre vezethetnek, pl. spin-töltés szétválás egy dimenziós rendszerekben (Giamarchi, 2004; Gogolin *et al.*, 1998) vagy Landau nívók megjelenése két dimenziós struktúrákban (Levy *et al.*, 2010). Míg az egy és két dimenziós rendszerek viselkedése egyensúlyban jól ismert és alaposan tanulmányozott, addig nem-egyensúlyi tulajdonságaik javarészt ismeretlenek. A disszertációban bemutatott munkám erre a területre fókuszál és az említett rendszerek valós idejű, nem-egyensúlyi dinamikáját kutatja.

A három dimenziós világunkhoz legközelebb álló, de már csökkentett dimenziós rendszerek két dimenziósak, melyet a grafén, egy szénatomokból álló hatszögrács valósít meg. 2004-es "felfedezése" hihetetlen mértékű érdeklődést és tudományos kutatást vont maga után (Novoselov *et al.*, 2004; Castro Neto *et al.*, 2009), mely nem csak esetleges elektronikai alkalmazásaiból fakad, hanem elektronszerkezetének különleges tulajdonságaiból is: az elemi gerjesztéseit egy tömeg nélküli, két dimenziós Dirac-egyenlet írja le. Ez rengeteg pszeudorelativisztikus jelenség megfigyeléséhez vezetett, mint

például a nemkonvencionális kvantum Hall-effektus (Novoselov *et al.*, 2005), az univerzális vezetőképesség eltűnő részecskeszám koncentráció mellett (Castro Neto *et al.*, 2009), Klein-alagutazás p-n átmeneteken (Cheianov and Fal'ko, 2006; Beenakker, 2008) és a Zitterbewegung (Katsnelson, 2006; Cserti and Dávid, 2006).

A két dimenziónál maradva, a topologikus szigetelőket szintén a két dimenziós Dirac-egyenlet írja le. A topologikus állapotokat az különbözteti meg nem topologikus társaiktól, hogy bizonyos válaszfüggvényeik univerzálisak, vagyis függetlenek a mintafüggő paraméterektől, mint például szennyező szórási ráta, kölcsönhatás erősségek. Ezen jelenségcsalád első tagjai a kvantum Hall-állapotok voltak, melyeket újabb rokonok is követtek a topologikus szigetelők terület megjelenésével (Hasan and Kane, 2010; Qi and Zhang, 2011). Fizikai tulajdonságaik topologikus védettsége különleges sávszerkezetükből fakad, melyet erős spin-pálya csatolás jellemez. Az alkalmazások szempontjából ezen tulajdonságok jól kamatoztathatóak lehetnek a spintronika, valamint a hagyományos és kvantum számítások területén.

Tovább csökkentve a dimenziószámot egy dimenzióhoz érkezünk. A kölcsönhatási effektusokat felerősítik a lecsökkent térbeli dimenziók miatt felerősödött kvantum fluktuációk, melyek lehetetlenné tesznek bármiféle felöltöztetett kvázirészecske képet a Landau-féle

Fermi-folyadék elmélet szellemében (Giuliani and Vignale, 2008). Ehelyett az egy dimenziós rendszerek gyakran "fémesek" maradnak, alacsony energiás gerjesztéseket lehetővé téve, de az elemi gerjesztések karaktere megváltozik: bozonikus kollektív módusok jelennek meg. Ilyen rendszerek alkotják a Luttinger-folyadék univerzalitási osztályt (Giamarchi, 2004; Gogolin *et al.*, 1998). A legszembeötlőbb különbség a Fermi- és a Luttinger-folyadékok között a korrelációs függvények anomális, hatványfüggvény-szerű lecsengése az utóbbi esetben, ahol a kritikus exponensek folyamatosan változtathatóak a kölcsönhatás erősségével. Ezzel szemben egy Fermi-folyadékban a felöltöztetett kvázirészecske kép érvényben marad, aminek folyományaként a kritikus exponensek csak egész értékeket vesznek fel.

A Luttinger-folyadék elmélet sok, különböző rendszerre alkalmazható. Eleinte kvázi-egydimenziós szilárdtestfizikai rendszerek, mint pl. a Bechgaard-sók (Grüner, 1994) tartoztak ebbe az osztályba, majd később a szén nanocsövek (feltekert grafén síkok) is csatlakoztak (Egger and Gogolin, 1998; Kane *et al.*, 1997; Balents and Fisher, 1997; Yoshioka and Odintsov, 1999; Krotov *et al.*, 1997; Ishii *et al.*, 2003; Rauf *et al.*, 2004; Bockrath *et al.*, 1999; Singer *et al.*, 2005; Dóra *et al.*, 2007, 2008). Az egész és tört kvantum Hall-effektus élállapotai is egy dimenziós rendszert alkotnak, melyek szintén leírhatóak a Luttinger-folyadék elmélettel (Giamarchi,

2004).

A szilárdtestfizikai rendszereken túl a csapdázott hideg atomi rendszerek is ígéretesek (Bloch *et al.*, 2008) az elmúlt évek töretlen technológiai fejlődésének köszönhetően. Egy dimenziós fermion vagy bozon rendszereket csapdázva Luttinger-folyadékot lehet létrehozni, melyben széles tartományban hangolható a kölcsönhatás erőssége (Feshbach-rezonanciával vagy az optikai rács paramétereinek megváltoztatásával), valamint a különböző relaxációs csatornák erőssége (pl. a fononokat vagy sztatikus szennyezőket teljesen ki lehet kapcsolni), melyek révén lehetővé vált a Luttinger-folyadék kísérleti megfigyelése (Cazalilla *et al.*, 2011).

2. Célkitűzések

A nem-egyensúlyi dinamika és az új, egzotikus anyagok tulajdonságainak megértése a szilárdtestfizika jelentős problémái közé tartozik. A kettő együttes jelenléte pedig érdekes és fontos kihívást jelent. Éppen ezért két dimenziós Dirac-elektronok nem-egyensúlyi tulajdonságainak vizsgálatát tűztem ki célul: a legtöbb nanoelektronikai alkalmazás szempontjából az erős elektromos tér esete érdekes, hiszen ezek az eszközök gyakran a szaturációs tartományban dolgoznak. Eddig nem sokat tudtunk grafénról és topologikus szigetelőkről ilyen körülmények között, annak ellenére, hogy egyensúlyi tu-

lajdonságaik jól ismertek. A kvantum transzport és a nem-egyensúlyi válasz véges külső térben valódi nem-egyensúlyi jelenségek, melyek pl. dielektromos letöréshez vagy Bloch-oszcillációkhoz vezethetnek. Ezen folyamatok kvantum természete különösen jelentőssé válik csökkent térdimenziók esetén. Éppen ezért a két dimenziós, tömeg nélküli Dirac-elektronok viselkedése véges elektromos térben, ami ezen disszertáció témáinak egyike, különösen alkalmas ezen jelenségek tanulmányozására, lehetővé téve számos, a nagy-energiás fizikában vagy a kvantum optikában ismert folyamat megfigyelését egy szilárdtestfizikai rendszerben, mint pl. a Schwinger-féle párkeltés (Tanji, 2009) vagy Rabi-oszcillációk. A nem-egyensúlyi állapotok létrehozása és vizsgálata (akár a hatszögrácson is) lehetővé vált a hideg atomi rendszerek területén, ezért ezen kutatási irány érdeklődésre tart számot a fizika más területeiről is.

Az erős elektromos tér jelentős hatással bír a kétrétegű grafénre is. A merőleges elektromos tér lassú változtatásával tiltott sáv nyílik a spektrumban félig töltött állapotban. Mind elméleti, mind kísérleti szempontból érdekes kérdés, hogy az elektromos tér időben nem-adiabatikus változtatása milyen hatással van a kétrétegű grafén fizikai tulajdonságaira és vajon vezet-e bármiféle érdekes jelenségre. A nem-egyensúlyi időfejlődésen túl az időbeli perturbáció után fellépő állandósult állapot tulajdonságai sem ismertek.

A topologikusan nem-triviális anyagok keresése időszerű kutatási téma napjainkban. A disszertációban megvizsgálom egy időben periódikus perturbáció alkalmazásának topológiai előnyeit, különös figyelmet szentelve annak, hogy vajon elő lehet-e állítani topologikus szigetelőket ezzel a módszerrel. Mindezt egy erős elektromágneses térbe helyezett kvantum spin-Hall-szigetelő, az első kísérletileg is megvalósított topologikus szigetelő él-állapotának vizsgálatával fogom megtenni.

Az elektromos tér időbeli változásával való manipuláción túl az anyag egzotikus állapotát lehet megvalósítani a részecskék közti kölcsönhatás nem-egyensúlyi bekapcsolásával. Az erős korrelációk ötvözése nem-egyensúlyi dinamikával mindenképpen a fizika eleddig kevéssé kutatott, jóllehet rendkívül izgalmas és kihívásokkal teli területei közé tartozik. A hideg atomi rendszerek területén elért technológiai fejlődés következtében (Bloch *et al.*, 2008) lehetővé vált ezen rendszerek kvantum állapotai időbeli fejlődésének követése és mérése. Különösen a kvantum kvencs folyamatok tartanak számot nagy érdeklődésre, melyek során a kölcsönhatás időbeli megváltozása akár egy Feshbach-rezonancia révén, akár a rácsparaméterek változtatása révén, hihetetlen mértékű elméleti (Dziarmaga, 2010; Polkovnikov *et al.*, 2011; Cazalilla *et al.*, 2011) és kísérleti (Hofferberth *et al.*, 2007; Haller *et al.*, 2010; Kinoshita *et al.*, 2006; Paredes *et al.*, 2004) érdeklődést keltett. Mindezektől vezérel-

ve egy Luttinger-folyadék nem-egyensúlyi viselkedését fogom tanulmányozni, mely a kölcsönhatás időbeli bekapcsolása után lép fel.

3. Módszerek

Mivel kutatásaim a nem-egyensúlyi fizikára koncentrálnak, ezért az alkalmazott módszerek a következőek: az időfüggő Schrödinger- vagy Dirac-egyenlet tanulmányozása a differenciál egyenletek megoldására kifejlesztett analitikus és numerikus módszerekkel, az adiabatikus perturbáció számítás, a Floquet-elmélet valamint a vizsgált modellek leképezése a fizika egyéb területein használt modellekre, mint pl. a (tiltott) sávkeresztezést leíró Landau-Zener modellre és egyéb változataira. Az erősen korrelált, alacsony dimenziós rendszereket térelméleti módszerekkel, mint bozonizáció, tanulmányozom, majd analitikus eredményeimet összevetem a Frank Pollmann által numerikusan szimulált rácsmodelleken mátrix-szorzat állapotokon alapuló módszerekkel kapott eredményekkel. A numerikus munkákat a budapesti és drezdai számítógépes hálózatokhoz való hozzáférés segítette.

4. Új tudományos eredmények

1. Tanulmányoztam az E elektromos tér bekapcsolása után fellépő áramot a két dimenziós Dirac-egyenlet-

ben, ami a grafén illetve a topologikus szigetelők tulajdonságait írja le. Az elektromos térrel párhuzamos áram időfüggése három különböző tartományt mutatott, melyeket klasszikus, Kubo- és Schwinger-tartományként azonosítottam. Az elsőben az áram lineárisan nő mind az idővel, mind az elektromos térrel. A másodikban az áram időfüggetlenné válik, de továbbra is lineárisan skálázódik az elektromos térrel. Végül a Schwinger-tartományban az áram $tE^{3/2}$-nel arányos növekedést mutat [2], melyet az erős elektromos tér által indukált elektron-lyuk párkeltés dominál. Ezek alapján meghatároztam a grafén állandósult állapotának áram-feszültség karakterisztikáját, mely a lineáris, Ohmikus tartományból a tér növelésével egy nem-lineáris tartományba megy át, ahol az áram a feszültség 3/2-ik hatványával nő. Eredményeimet kísérletileg is igazolták. Hasonlóan meghatároztam a nem-lineáris Hall-áram-feszültség kapcsolatot grafénon és topologikus szigetelőkön: erős elektromos térben a Hall-áram az elektromos tér négyzetgyökével nő [4].

2. A kétrétegű grafén spektruma merőleges elektromos térrel hangolható, mely a félig töltés körül nyíló tiltott sáv kialakulásáért felelős. Megmutattam, hogy a tiltott sáv időbeli változtatásának hatására gerjesztett állapotok jönnek létre a kétrétegű grafénban, melynek kialakulása és dinamikája rokonságot

mutat egy kvantum kritikus ponton történő nem adiabatikus áthaladás során fellépő hibakeltéssel, melyet a Kibble-Zurek-elmélet ír le [3]. A létrejövő állapot populáció invertált a Dirac-ponthoz közeli hullámszám vektorokra, mely használható lehet hangolható paraméterű (frekvencia és kiszélesedés), koherens infravörös sugárzás forrásaként.

3. A kvantum optika alapmodellje a Jaynes-Cummings-Hamilton operátor, ami egy üregbe helyezett kétállapotú rendszer elektromágneses térrel való kölcsönhatását írja le. A grafénnek, mint szilárdtestfizikai rendszernek az alacsony energiás gerjesztéseit a Dirac-egyenlet írja le, mely kvantum-elektrodinamikai jelenségeket mutat. Ez a két, látszólag eltérő rendszer szorosan összefügg egymással. Megmutattam, hogy a Rabi-oszcillációk, melyek az atom gerjesztéseivel vannak kapcsolatban a kvantum optikában, megjelennek a kvantáló mágneses térbe helyezett grafén optikai válaszában is, ily módon egy egyszerű képpel magyarázva a optikai kiválasztási szabályokat. Míg a longitudinális vezetőképesség kaotikus Rabi-oszcillációkat mutat, addig a Hall-komponenst a koherens, termikus oszcillációk jellemzik. Ez lehetővé teszi, hogy egy kevés-test problémás, mikroszkópikus rendszert szimulálni lehessen egy makroszkópikus, könnyen hangolható tömbi anyaggal és fordítva [1].

4. Attól az ötlettől inspirálva, hogy időben periódikus perturbációk alkalmasak lehetnek egy rendszer topológiájának megváltoztatására a Floquet-sávszerkezeten keresztül, megvizsgáltam egy cirkulárisan polarizált elektromágneses térbe helyezett két dimenziós topologikus szigetelő spin-Hall-él-állapotának tulajdonságait. A hasonló modellekkel ellentétben a spin-Hall-szigetelőt elsősorban a Zeeman-tag befolyásolja, és nem a pálya járulék. Az indukált fotoáram várható értéke, ami arányos az élmenti mágnesezettséggel a magnetoelektromos effektus révén, véges és helicitás függő lesz, és a disszipáció mentes, adiabatikus töltéspumpálás tartományból a disszipatív transzport tartományba történő topológiai átalakulást jelez [6,8].

5. Megvizsgáltam egy kölcsönhatás kvencs hatását egy Luttinger-folyadékban. A fermionikus egyrészecske sűrűségmátrix többféle, kvalitatívan különböző tartományt mutat az idő és térkoordináta függvényében: Fermi-folyadék, hirtelen kvencs Luttinger-folyadék, adiabatikus Luttinger-folyadék és egy időfüggő kitevőjű Luttinger-folyadék. A különböző tartományok megjelennek a momentum eloszlás függvényben is, melyet ún. repülési idő kísérletekkel lehet tetten érni [5]. Megvizsgáltam az XXZ modell hard-core bozonjainak sorsát is azok korrelációs függvényein keresztül. Ezek egyértelműen eltér-

nek a fermionikus esetben találtaktól, és az állandósult állapot viselkedése érzéketlennek mutatkozott a kvencs időtartamára. Az analitikus eredményeket összevetettem numerikusan egzakt, mátrix-szorzat állapotokon alapuló szimulációkkal [9].

6. A nem-egyensúlyi statisztikus mechanika legújabb eredményei által inspirálva meghatároztam egy Luttinger-folyadékon végzett munka statisztikáját egy kölcsönhatási kvencs során [7]. A termodinamikai határesetben a munka eloszlásfüggvénye erősen csúcsos, de nem Gauss-jellegű a várható érték körül, ami a spektrális súly túlnyomó részét hordozza. A kis rendszer határesetben a spektrális súly nagy részét egy Dirac-delta hordozza az adiabatikus energia különbséghez tartozó értéknél, melyet egy oszcilláló, exponenciális lecsengés követ növekvő energiával, ahol a minimumokhoz tartozó energiák kommenzurábilisak a kvencs időtartamával.

7. Míg egy lokális perturbációra válaszul fellépő Anderson-féle ortogonalitási katasztrófa és a Fermi-él szingularitás jól ismert jelenségek, addig a soktest általánosítására eddig kevés figyelem fordítódott. Ezért megvizsgáltam az ezt leíró Loschmidt-echot egy Luttinger-folyadékban, a tömbi kölcsönhatás időbeli megváltoztatása után. Ez exponenciálisan csökken a rendszer méretével és univerzális

viselkedést mutat: az állandósult állapot exponense n oda-vissza kvencs után két Luttinger-folyadék állapot között, $2n$-szerese a megfelelő adiabatikus állapotok átfedésének, és csak a kezdeti és végállapoti Luttinger-folyadék paraméterektől függ [10]. Ezen analitikus eredményeimet megerősítettem az XXZ Heisenberg-modellen végzett numerikus szimulációkkal való összehasonlítással. Javaslatot tettem a Loschmidt-echo mérésére egy hibrid rendszert használva, mely csapdázott hideg atomi rendszer Feshbach-rezonanciájához csatolt fluxus qubitot tartalmaz, Ramsey-interferometria vagy rádiófrekcenciás spektroszkópia alkalmazásával.

A tézispontokhoz kapcsolódó közlemények: [1]:

1. **B. Dóra**, K. Ziegler, T. Thalmeier, M. Nakamura: Rabi Oscillations in Landau Quantized Graphene Phys. Rev. Lett. **102**, 036803 (2009)

2. **B. Dóra**, R. Moessner: Non-linear electric transport in graphene: quantum quench dynamics and the Schwinger mechanism Phys. Rev. B **81**, 165431 (2010)

[1] a `http://mono.eik.bme.hu/~dora/publcit.pdf` oldal tartalmazza az arXiv-os hivatkozásokat és cikkeket is

3. **B. Dóra**, E. V. Castro, R. Moessner:
Quantum quench dynamics and population inversion in bilayer graphene
Phys. Rev. B **82**, 125441 (2010)

4. **B. Dóra**, R. Moessner:
Dynamics of the spin-Hall effect in topological insulators and graphene
Phys. Rev. B **83**, 073403 (2011)

5. **B. Dóra**, M. Haque, G. Zaránd:
Crossover from adiabatic to sudden interaction quench in a Luttinger liquid
Phys. Rev. Lett. **106**, 156406 (2011)

6. **B. Dóra**, J. Cayssol, F. Simon, R. Moessner:
Optically engineering the topological properties of a spin Hall insulator
Phys. Rev. Lett. **108**, 056602 (2012)

7. **B. Dóra**, Á. Bácsi, G. Zaránd:
Generalized Gibbs ensemble and work statistics of a quenched Luttinger liquid
Phys. Rev. B **86**, 161109(R) (2012)

8. J. Cayssol, **B. Dóra**, F. Simon, R. Moessner:
Floquet topological insulators
Phys. Stat. Sol. RRL **7**, 101 (2013)

9. F. Pollmann, M. Haque, **B. Dóra**:
Linear quantum quench in the Heisenberg XXZ cha-

in: time dependent Luttinger model description of a lattice system
Phys. Rev. B **87**, 041109(R) (2013)

10. **B. Dóra**, F. Pollmann, J. Fortágh, G. Zaránd: Loschmidt echo and the many-body orthogonality catastrophe in a qubit-coupled Luttinger liquid
Phys. Rev. Lett. **111**, 046402 (2013)

Hivatkozások

Balents, L., and M. P. A. Fisher, 1997, Phys. Rev. B **55**, 11973.

Beenakker, C. W. J., 2008, Rev. Mod. Phys. **80**, 1337.

Bloch, I., J. Dalibard, and W. Zwerger, 2008, Rev. Mod. Phys. **80**, 885.

Bockrath, M., D. H. Cobden, J. Lu, A. G. Rinzler, R. E. Smalley, L. Balents, and P. L. McEuen, 1999, Nature **397**, 598.

Castro Neto, A. H., F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov, and A. K. Geim, 2009, Rev. Mod. Phys. **81**, 109.

Cazalilla, M. A., R. Citro, T. Giamarchi, E. Orignac, and M. Rigol, 2011, Rev. Mod. Phys. **83**, 1405.

Cheianov, V. V., and V. I. Fal'ko, 2006, Phys. Rev. B **74**, 041403.

Cserti, J., and G. Dávid, 2006, Phys. Rev. B **74**, 172305.

Dóra, B., M. Gulácsi, J. Koltai, V. Zólyomi, J. Kürti, and F. Simon, 2008, Phys. Rev. Lett. **101**, 106408.

Dóra, B., M. Gulácsi, F. Simon, and H. Kuzmany, 2007, Phys. Rev. Lett. **99**, 166402.

Dziarmaga, J., 2010, Adv. Phys. **59**, 1063.

Egger, R., and A. O. Gogolin, 1998, Eur. Phys. J. B **3**, 281.

Giamarchi, T., 2004, *Quantum Physics in One Dimension* (Oxford University Press, Oxford).

Giuliani, G. F., and G. Vignale, 2008, *Quantum theory of the electron liquid* (Cambridge University Press, Cambridge).

Gogolin, A. O., A. A. Nersesyan, and A. M. Tsvelik, 1998, *Bosonization and Strongly Correlated Systems* (Cambridge University Press, Cambridge).

Grüner, G., 1994, *Density waves in solids* (Addison-Wesley, Reading).

Haller, E., R. Hart, M. J. Mark, J. G. Danzl, L. Reichsollner, M. Gustavsson, M. Dalmonte, G. Pupillo, and H.-C. Nagerl, 2010, Nature **466**, 597.

Hasan, M. Z., and C. L. Kane, 2010, Rev. Mod. Phys. **82**, 3045.

Hofferberth, S., I. Lesanovsky, B. Fischer, T. Schumm, and J. Schmiedmayer, 2007, Nature **449**, 324.

Ishii, H., H. Kataura, H. Shiozawa, H. Yoshioka, H. Otsubo, Y. Takayama, T. Miyahara, S. Suzuki, Y. Achiba, M. Nakatake, T. Narimura, M. Higashiguchi, K. Shimada, H. Namatame, and M. Taniguchi, 2003, Nature **426**, 540.

Kane, C., L. Balents, and M. P. A. Fisher, 1997, Phys. Rev. Lett. **79**, 5086.

Katsnelson, M. I., 2006, Eur. Phys. J. B **51**, 157.

Kinoshita, T., T. Wenger, and D. S. Weiss, 2006, Nature **440**, 900.

Krotov, Y. A., D.-H. Lee, and S. G. Louie, 1997, Phys. Rev. Lett. **78**, 4245.

Levy, N., S. A. Burke, K. L. Meaker, M. Panlasigui, A. Zettl, F. Guinea, A. H. C. Neto, and M. F. Crommie, 2010, Science **329**, 544.

Novoselov, K. S., A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, M. I. Katsnelson, I. V. Grigorieva, S. V. Dubonos, and A. A. Firsov, 2005, Nature **438**, 197.

Novoselov, K. S., A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, and A. A. Firsov, 2004, Science **306**, 666.

Paredes, B., A. Widera, V. Murg, O. Mandel, S. F. I. Cirac, G. V. Shlyapnikov, T. W. Hänsch, and I. Bloch, 2004, Nature **429**, 277.

Polkovnikov, A., K. Sengupta, A. Silva, and M. Vengalattore, 2011, Rev. Mod. Phys. **83**, 863.

Qi, X.-L., and S.-C. Zhang, 2011, Rev. Mod. Phys. **83**, 1057.

Rauf, H., T. Pichler, M. Knupfer, J. Fink, and H. Kataura, 2004, Phys. Rev. Lett. **93**, 096805.

Singer, P. M., P. Wzietek, H. Alloul, F. Simon, and H. Kuzmany, 2005, Phys. Rev. Lett. **95**, 236403.

Tanji, N., 2009, Ann. Phys. **324**, 1691.

Yoshioka, H., and A. A. Odintsov, 1999, Phys. Rev. Lett. **82**, 374.