

Válasz Vibók Ágnes bírálatára

Szeretném megköszönni opponensemnek a dolgozat gondos áttanulmányozását, az értekezéshez fűzött elismerő és kritikai észrevételeit.

Kérdéseire az alábbiakat válaszolom:

1. *"A jelölt a kétrétegű grafénban erős elektromos tér segítségével csatolja a rétegeket, amelynek következtében a spektrumban megjelenő tiltott sáv hangolhatóságát és dinamikáját vizsgálja. Teszi mindezt a 2×2 Floquet reprezentáció alkalmazásával. Mennyire konzisztens ez? Az erős tér ugyanis nemcsak az egy, hanem a több fotonos folyamatokat is magában foglalja. Viszont ha az elektromos tér miatt időfüggő Hamilton-operátor eredeti egzakt $n \times n$ -es Floquet alakjáról áttérünk a 2×2 -es alakra, akkor ez ismereteim szerint annyit jelent, hogy csak az egyfotonos folyamatokat vesszük figyelembe. Ez pedig gyenge, vagy legfeljebb mérsékelt intenzitású elektromos térben tartható. Egy áthidaló megoldás lehetne az RWA (rotating wave approximation) közelítés használata. Erről a jelölt említést is tesz a dolgozatban. Ez annyiban pontosabb, hogy időtől függő burkoló függvénnyel dolgozik a Floquet-ban használatos konstans amplitudó helyett. Érdekes lenne megnézni, hogy egy ilyen leírás mekkora változást okozna a kapott eredményekben. Ismert ezzel kapcsolatban valamilyen munka az irodalomban?"*

A 2×2 -es Floquet-reprezentáció valóban csak az egy fotonos folyamatokat veszi figyelembe, azonban cirkulárisan polarizált elektromágneses tér esetén csak ezek a folyamatok vannak jelen a rendszerben, emiatt létezik ebben az esetben egzakt megoldása a problémának. Ez formálisan megfelel a klasszikus fény - kétállapotú rendszer kölcsönhatását leíró Rabi-modell RWA közelítésben vett alakjának, anélkül, hogy itt ezt a közelítést megtettük volna. Nem cirkulárisan polarizált tér esetén megjelennek a többfotonos folyamatok, azonban ezek leírása már csak numerikusan lehetséges. Hasonlóan a vektorpotenciál figyelembevételére vagy egyéb, a Hamilton-operátorban lehetséges tagok megjelenésére, pl. inverzió szimmetriasértés vagy más frekvenciájú elektromágneses terek esetén csak numerikus módszerek állnak rendelkezésünkre a Floquet-spektrum meghatározására. A Phys. Rev. Lett. 108, 056602 (2012) kiegészítő anyagában megvizsgáltuk ezek hatását numerikusan a többfotonos folyamatok figyelembevételével (egészen a 100 fotonos folyamatokig), és azt kaptuk, hogy a fizikailag érdekes tartományokban ezek hatása jó közelítéssel elhanyagolható.

2. *"Okozhatja-e érdekes fizikai hatást, ha a két réteg csatolása frekvencia*

csörpölt elektromos térrel történne? Hogyan módosulna a dinamika, illetve a hangolhatóság?”

A Landau-Zener problémának csörpölt terek esetén is létezik egzakt megoldása, melyeket pl. N. V. Vitanov et al., Phys. Rev A 53, 4288 (1996) tárgyal. Ezek során az időben lineárisan változó merőleges elektromos teret lehetne valamilyen megfelelő időfüggésre változtatni. Egy simább, lineáris helyett $\tanh(t)$ -vel változó térrel a folyamat adiabatikusságát lehetne növelni, amivel a lineáris tér be- illetve kikapcsolásnál jelentkező hirtelen változást lehetne finomítani. Ezzel a folyamat adiabatikussága növelhető, mely a felfűtési effektusok csökkentéséhez vezethet, és élesebb frekvenciatartományt eredményezhet, ahol a populáció inverzió fellép.

3. *”A Berry fázist két állapot között a nemadiabatikus csatolási vektornak, egy a konfigurációs téren felvett zárt görbe mentén számítható integráljaként kaphatjuk meg. Ezt a formulát adja meg a disszertáció 1.7 képlete is. A számítás nem is szokott nehézséget okozni, amennyiben elektromos tér nincs jelen. Kérdésem az lenne, hogy hogyan, pontosan milyen módszerrel, illetve közelítéssel történik a számítása, amennyiben erős, időfüggő elektromos teret kapcsolunk be?”*

A Berry-fázis kiszámítása egy adiabatikus időfejlődés tételével fel a paraméterterben. Nemadiabatikus változás esetén ennek általánosítása az Aharonov-Anandan fázis (Y. Aharonov et al., Phys. Rev. Lett. 58, 1593 (1987)), melynek kiszámítása feltételezi a nemadiabatikusan időfejlesztett hullámfüggvény ismeretét. Az általam vizsgált Floquet-topologikus szigetelők esetén a probléma egzakt megoldása lehetővé teszi ennek a fázisnak a kiszámítását is. Ez alapján egy adott p momentumra az $\alpha = \pm$ sávban

$$\gamma_\alpha = \pi \left(\frac{\alpha(v_F p - \omega/2)}{\sqrt{g^2 + (v_F p - \omega/2)^2}} - 1 \right), \quad (1)$$

ahol ω a cirkulárisan polarizált elektromágneses tér frekvenciája, g pedig a Zeeman-energia. Nagy momentumok esetén ez a dinamikus fázis alig változik a g and ω paraméterek függvényében, és a triviális $\gamma \approx 0 \bmod 2\pi$ értéket veszi fel. Ezzel szemben $p = \omega/2v_F$ közelében a nem-triviális $-\pi$ értéket veszi fel, mely szintén azt mutatja, hogy ezen állapotok viselkedését befolyásolja a legnagyobb mértékben az elektromágneses tér.

4. *”Az ötödik fejezetben rámutat, hogy az egyrétegű grafén statikus mágneses térbeli viselkedése összefüggésbe hozható egy kétállapotú rendszer (pl. atom) elektromágneses térbeli viselkedésével. Konkrétan az elektromos tér hatására*

bekövetkező populáció transzfernek az oszcillációi (Rabi-oszcillációk) megjelennek a kvantáló mágneses térbe helyezett grafén optikai válaszában is. Az atomfizikában van egy érdekes határeset, amikor is rezonáns gerjesztések esetén a Rabi frekvenciát kizárólag a dipólus csatolás erőssége határozza meg. Van-e ennek fizikai megfelelője, s ha igen, akkor mi a mágneses térbe helyezett grafén esetén?”

Ez az eset akkor valósul meg, amikor a fonon frekvenciája és a kétállapotú rendszer megfelelő módon definiált energiája megegyezik egymással. A grafén esetében a fonon (mely a Peierls-helyettesített impulzusból származik) frekvenciája azonosan nulla, míg a kétállapotú rendszer energiáját a hatszögrács két alrácsa közti energiakülönbség határozza meg. Ez tipikusan nulla, mely a zérus tömegű Dirac-elektron leírást teszi lehetővé. A dipólus csatolásnak pont a mágneses tér feleltethető meg a $V = v_F \sqrt{2eB}$ képleten keresztül, így a legtermészetesebben pont az az eset valósul meg, amikor csak a dipólus csatolás adja a Rabi-frekvenciát.

5. *”A hetedik fejezetben egy kölcsönhatás kvencs hatását vizsgálja Luttinger-folyadékban a fermion egyrészecske sűrűségmátrix tér és időkoordináták szerinti viselkedésének függvényében. Azt találja, hogy árnyékolt Coulomb kölcsönhatást bekapcsolva (1 szomszéd közelítés) a rendszer rövid távú leírását a nagy energiás, nem egyensúlyi módusok, míg a térbeli hosszú távolságú viselkedést a kis energiás, erősen nem egyensúlyi módusok határozzák meg. Mennyire változhatna ez, ha távolabbi, mint első szomszéd kölcsönhatásokat is figyelembe vennénk? Hogyan módosulna a rendszer dinamikai viselkedése egy disszipációt jelentő hatás bekapcsolása után? Léteznek-e kísérleti eredmények ezen a területen?”*

Távolabbi szomszéd kölcsönhatásokat figyelembe véve is a modell sok esetben megőrzi az alacsony energiás gerjesztéseket, mely esetben a Luttinger-folyadék leírás érvényben marad, csak a Luttinger-folyadék paraméterek (a renormált sebesség és a kölcsönhatást jellemző K) mikroszkopikus paraméterektől való függése változik meg. Ilyen esetekben a közölt számolások érvényesek maradnak. Amennyiben egy gap nyílik a rendszerben a kölcsönhatás releváns volta miatt, akkor más, a sine-Gordon elmülethez hasonlító megközelítést kell alkalmazni, melyeket nem tárgyaltam a dolgozatomban.

Disszipatív tagok jelenlétében azt várnám, hogy a rendszer termalizálódik. Megjelenik egy hőmérsékleti korrelációs hossz $\sim 1/T$, ahol a hőmérsékletet a disszipatív folyamatok határoznák meg. A különböző korrelációs függvények pedig úgy viselkednének, mint egy egyensúlyi, T

hőmérsékletű rendszerben, vagyis az $1/T$ idő- illetve hosszskálán túl exponenciális lecsengést mutatnának. Ezt a mára már klasszikussá vált kvantum Newton bölcső kísérlet demonstrálja (Nature 440, 900 (2006)), melyben különböző térbeli dimenziós kölcsönható bozonokat vizsgáltak nemegyensúlyi viszonyok között. Míg egy dimenzióban a közel integrálhatóság miatt a rendszer nem termalizálódott, hanem a kísérlet időtartama alatt megőrizte nemegyensúlyi jellegét (a bekövetkező több 1000 ütközés ellenére), addig magasabb dimenziós, nem integrálható realizációi az egyensúlyból való kimozdítás után szinte azonnal termalizálódtak a disszipatív folyamatok miatt.

Végezetül egyetértek opponensemmel abban, hogy valóban szerencsésebb lett volna egy rövidítés jegyzékét készítenem, erre azonban nem gondoltam a dolgozat írásakor.

Budapest, 2015. május 7.

Dóra Balázs