

# KÖZEGBELI ELEKTRONOK SPIN- ÉS IDŐFÜGGŐ DINAMIKÁJA KÜLSŐ ELEKTROMÁGNESES TEREKBEN

Tézisek

Földi Péter

Szegedi Tudományegyetem  
Elméleti Fizikai Tanszék  
2020.



# 1. Bevezetés és előzmények

Atomi, molekuláris vagy szilárdtest rendszerek külső elektromágneses térrel való kölcsönhatása, gerjesztése során a mikroszkopikusan leírt anyag alkotóelemei közül általában az elektronok viselkedése a meghatározó. Az ebben a tézisfüzetben és a kapcsolódó dolgozatban összefoglalt eredmények esetében ez mindenképpen így van. Emellett közös pont az is, hogy a vizsgált esetekben a szemiklasszikus leírás jó közelítést jelent, azaz a gerjesztés tekinthető klasszikus, időfüggő mezőnek, miközben az anyagi rendszert kvantumosan kezeljük.

Három fizikai rendszer elméleti vizsgálatából származó eredmények összefoglalását olvashatjuk a továbbiakban. Az első egy, a nanométeres mérettartományba eső, általában félvezető anyagból készült gyűrű, amin körvezetőként áram folyik keresztül. Nagy tisztaságú anyagból készült „kvantumgyűrű” esetén az elektronok transzportja ballisztikus, és a vezetőképességet a kvantum interferenciajelenségek erősen befolyásolják. Ebben a tartományban pl. egy olyan gyűrű, amelynek egy bemenete és egy kimenete van, a fundamentális kétutas interferenciakísérlet egy realizációjának tekinthető. Ha a körvezetőt alkotó anyagban erős a spin-pálya kölcsönhatás, akkor ez az interferencia spinfüggővé válik. Az ún. Rashba-típusú spin-pálya kölcsönhatás esetén kísérletileg [1, 2] is bizonyított, hogy külső elektromos térrel hangolható ennek a kölcsönhatásnak az erőssége, és így maga a spinfüggő interferencia, azon keresztül pedig a vezetőképesség is befolyásolható. A kísérletek eredményei jól interpretálhatók egyelektron képben is a megfelelő spinfüggő Hamilton-operátor [3, 4] segítségével. A témához kapcsolódó új tudományos eredményeim is ezen a módszeren alapulnak, és főként gyűrűk, illetve azok hálózatának a spintranszformációs tulajdonságaival kapcsolatosak.

Molekuláris mágnesekben (single molecular magnets) lokalizált spinek hatnak kölcsön a külső (ez esetben mágneses) térrel. Ezek a jellemzően komplex molekulák a legtöbbször tartalmaznak olyan fém atomokat, amelyeknek az elektronjai a felelősek a molekula spinjéért. A leggyakrabban vizsgált ilyen anyag a röviden  $Mn_{12}$ -Ac alakban írt komplex, a mangán acetát, amelyben a

12 mangán atom elektronjai „óriási” ( $\hbar = 1$  egységekben  $S = 10$ ) eredő spinné kombinálódnak. Kvantummechanikai szempontból ez egy  $2S+1=21$  dimenziós teret jelent, ahol alapállapotban, külső tér jelenléte nélkül, a mágnesezettség nulla. A külső mágneses tér hatására eltolódó nívók között rezonancia léphet fel, ami nemzéró mágnesezettséghez vezet. Mivel ez a mágnesezettség alacsony hőmérsékleten akár órákig megmarad [5, 6], ezek a molekulák ígéretes jelöltek a mágneses alapú információtárolás „legkisebb praktikus alkalmazhatósággal bíró egységei” címre. Emellett alapvető kvantumos jelenségek is tesztelhetők a segítségükkel. Ha a külső tér az idő lineáris függvénye, akkor a rezonanciák – amelyek alaposabban megvizsgálva elkerült nívókereszteződéseknek (avoided level crossings) felelnek meg – közvetlen kapcsolatba hozhatók a Landau, Zener és Stückelberg [7–9] nevéhez köthető ismert modellel. Ezekhez a jelenségekhez kapcsolódnak a 4. tézispontban összefoglalt saját eredmények.

Lézerterek és tömbi szilárdtestek kölcsönhatása kapcsán a rövid, nagy intenzitású gerjesztő impulzusok megjelenése több új jelenség felfedezéshez vezetett. Dielektrikumokkal kapcsolatban az anyagban létrejövő változások közül a legmarkánsabb talán az, hogy az ilyen lézerrimpulzusok képesek sávátmeneteket és így áramot indukálni, még akkor is, ha a karakterisztikus fotonenergiák többször kisebbek a tiltott sáv szélességénél [10]. Az ebben az értelemben „többfotonos” folyamatok abban az intenzitástartományban játszódnak le, ahol a szilárdtest még nem szenved irreverzibilis változást a gerjesztés következtében, nem roncsolódik, ugyanakkor a sávkép időlegesen erősen torzul. Amennyiben ez a torzulás a gerjesztés időtartamához hasonlóan femtoszekundumos skálán játszódik le, nemcsak igen gyors folyamatok feltérképezése, de ultragyors, fényvel kapcsolt elektronikai eszközök megjelenése is lehetségessé válik [11].

Az anyagi rendszer helyett a tér szempontjából vizsgálva ezt a kérdést, a fény-anyag kölcsönhatás eredményeképpen létrejövő másodlagos elektromágneses sugárzás egyik legizgalmasabb tulajdonsága erős gerjesztés esetén a gerjesztő frekvencia többszöröseinek a megjelenése a spektrumban [12, 13]. Elegendő számú, megfelelő fázisú magas felharmonikus szuperpozíciója pedig nagyon rövid, az attoszekundumos időtartományba eső elektromágneses impulzust adhat [14]. Tömbi szilárdtestekkel kapcsolatban új eredményeim az

erős lézerterek által keltett áramokra és a létrejövő magasrendű felharmonikusokra vonatkoznak.

A vizsgált témákban az elvi szintű (elektronok és külső elektromágneses tér kölcsönhatása) és technikai szempontból (szemiklasszikus leírás) vett hasonlóság mellett még az is közös, hogy mindegyik erős kísérleti motivációval rendelkezik [1, 2, 10, 15–17]. Emellett távlati célként megjelenik a külső terekkel kölcsönható fizikai rendszerek manipulálásának a szándéka is. Ez leg-erősebben a kvantumgyűrűk esetében látható, amikor előre eltervezett spin-traszformációk realizálásának a lehetőségét tanulmányozzuk. Ugyanakkor erről a tőről fakad az a szándék is, hogy molekulamágnesek mágnesezettségét vagy a lézerimpulzussal létrehozott áramok tulajdonságait a gerjesztő tér paramétereinek a megváltoztatásával kontrolláljuk.

## 2. Alkalmazott módszerek

A bevezetőben említetteknek megfelelően a tézispontok elméleti eredményeket foglalnak össze. A vizsgált fizikai rendszerek és a gerjesztés kombinációjának újdonsága miatt a kvalitatívan helyes leírás is észrevehető jelentőséggel bír, így precíz anyagszerkezeti számítások helyett az anyagi tulajdonságok jellemzően paraméterként jelennek meg a modellekben.

Kvantumos transzportfolyamatok esetén a dolgozatban részletezett, kísérletileg is teljesülő feltételek esetén a nanométeres tartományba eső vastagságú vezetékek tekinthetők egydimenziósoknak, és a függetlenrészesecske közelítés is alkalmazható. Ekkor az elektronok mozgását egy spinorértékű hullámfüggvényeken ható Hamilton-operátor határozza meg, amely a témával kapcsolatos munkám kezdetén már ismert volt [3, 4]. Ennek a Hamilton-operátornak a sajátállapotai, energiaszintjei analitikusan meghatározhatók, mind egyenes vezetékekben, mind pedig körvezetőkben. A transzport leírásához a különböző tartományokhoz tartozó, adott energiájú megoldásokat illeszteni kell [18], ami lineáris egyenletrendszerek megoldását jelenti. Egyszerűbb geometriák esetén ez szintén analitikus eredményt szolgáltat, de az egyenletek számának növekedtével érdemes volt ezeket az egyenleteket numerikusan kezelni.

## CÉLKITŰZÉSEK

---

Molekuláris mágnesek modellezésére az effektív spinre vonatkozó Hamilton-operátort használtam, és a megfelelő időfüggő Schrödinger-egyenletet oldottam meg. A dinamika – a Landau-Zener-Stückelberg [7–9] modell felhasználásával – analitikusan is közelíthetőnek adódott, ugyanakkor ez a közelítés nem volt kellően pontos. Ezért a  $Mn_{12}$ -Ac molekulát példának tekintve egy megfelelően hatékony, az elkerült nívókereszteződések közelében báziscserét is jelentő numerikus modellt dolgoztam ki.

Intenzív lézerterek és dielektrikumok kölcsönhatásának leírására az egyrészeske közelítés keretein belül több sávot figyelembe vevő modellt használtam. Hosszmértékben dolgozva, a dipólközelítést alkalmazva, a sávok közötti átmeneteket a reciprok rácsvektor szerint felbontott „ $k$ -függő” Bloch-egyenletek írják le, míg a relaxációs folyamatokról egy, a Boltzmann-egyenletben is megjelenő taggal analóg kifejezés ad számot. Ezt a modellt numerikusan oldottam meg. Az elektromágneses mérték megválasztásának szerepét tisztázni kívánó számításaim jórészt analitikusak, amelyekhez egy egydimenziós numerikus példát fűztem.

Összességében tehát az alkalmazott módszerek analitikus számításokon alapuló, a problémákra optimalizált numerikus eljárásokat jelentenek, ahol a váltás azon a ponton történt meg, amikor az analitikus módszer további alkalmazása már nehézkessé vagy kivitelezhetetlenné vált.

### 3. Célkitűzések

Az első vizsgált terület elektronok kvantumozott transzportja Rashba-féle spinpálya kölcsönhatás jelenlétében. Ezen belül kvantumgyűrűk spintranszformációs tulajdonságainak a meghatározása volt a célunk. A probléma linearitása miatt az várható, hogy ez a transzformáció a bemenő spinekre, mint két-dimenziós vektorokra, qubitekre ható mátrixként írható le, másszóval egyqubites kvantumozott logikai kapukról van szó. Fontos kérdés annak a feltérképezése, hogy milyen jellegűek lehetnek ezek a logikai kapuk. Ennek a problémának az általánosításaként az is célunk volt, hogy megvizsgáljuk több gyűrűből álló, összetett hálózatok spintranszformációs tulajdonságait. Emellett praktikus szempontból lényeges, hogy realiztikusabb körülmények között, szórási

folyamatok és termikus fluktuáció jelenlétében hogyan módosulnak ezek az eredmények. Kísérleti szempontból főként a [1, 2] munkák jelentettek motivációt ennek a témakörnek a vizsgálatához.

Molekuláris mágnesek külső mágneses térben mutatott viselkedését is tanulmányoztuk. A bevezetőben említett rezonanciák a pontosabb leírás szerint elkerült nívókereszteződéseket jelentenek. Célunk volt egy ilyen nívókereszteződés esetén a dinamika vizsgálata abban az esetben, amikor a külső tér periodikus, így az elkerült nívókereszteződésen újra és újra áthalad a rendszer. Ilyenkor a kvantummechanikai koherencia kulcsszerepet játszik, így nagyon fontos a dekoherencia-mechanizmusok szerepének tisztázása. Emellett terveztük azt a kérdést is körüljárni, hogy a mágneses molekula effektív Hamilton-operátorának összes energiaszintjét figyelembe véve milyen új jelenségek lépnek fel. A téma vizsgálatát motiváló korai kísérleti eredmények a [15, 16] közleményekben találhatóak.

Intenzív lézerterek és szilárdtestek kölcsönhatásának elméleti leírásában jelenleg még sok a nyitott kérdés. Ezzel kapcsolatban terveztük megvizsgálni a dielektrikumokban gerjesztés hatására folyó áramok tulajdonságait, a létrejöttükben szerepet játszó folyamatok szerepét. Itt különösen a relaxáció jelentősége érdekes, mivel annak realiztikus erőssége jellegében is megváltoztathatja a dinamikát. (Ennek a kérdésnek a tanulmányozását egy konkrét kísérlet [10] értelmezésének a szándéka indította el.) Tömbi szilárdtestekben keltett magasrendű felharmonikusokat 2011-ben detektáltak [17]. Ezzel kapcsolatban célunk volt annak a kritikai felülvizsgálata, hogy milyen értelemben pontos a szilárdtestekben keltett felharmonikusok keletkezéséről alkotott hagyományos fizikai kép, melyek is azok a mennyiségek, amelyek függetlenek az leíráskor használt elektromágneses mérték megválasztásától.

## 4. Új tudományos eredmények

1. Egy bemenettel és egyetlen kimenettel rendelkező kvantumgyűrűk esetében, amikor a vezetési tulajdonságokat a Rashba-típusú spin-pálya kölcsönhatás befolyásolja, megoldottam a spinfüggő transzportproblémát, meghatároztam a be- és kimenetet összekötő transzmissziós mátrix függését a geometriai paraméterektől és a spin-pálya kölcsönhatás erősségétől. Ezt az analitikus megoldást felhasználva megmutattam, hogy alkalmasan választott paraméterek esetén a reflexiós valószínűség nulla, és a gyűrű a spinre ható egyqubites kvantumos kapuként működik. A koherenciahosszon belüli mérettartományban reflexiómentes gyűrűk egymás után kapcsolásával lényegében minden tradicionális egyqubites kvantumos kapu realizálható [T1].
2. Kvantumgyűrűk egy újabb alkalmazásaként megfogalmaztam azt az ötletet, hogy két kimenet esetén a megvalósítható spintranszformációk osztálya tovább bővül, mivel a kimenetekhez tartozó spinirányok különbözőek lesznek. A konkrét számításokat elemezve arra jutottunk, hogy egy ilyen gyűrűt – eltekintve a kimenetek ortogonalitásától – a Stern-Gerlach berendezés elektronspinre vonatkozó megfelelőjének is tekinthetünk. Az ötlet továbbfejlesztéseként kidolgoztam több gyűrűből álló, több kimenettel rendelkező hálózatokban a spinfüggő transzportprobléma numerikus megoldását. Megmutattam, hogy ha a spin-pálya kölcsönhatás erősségét az egyes gyűrűkben megfelelően választjuk, akkor a Stern-Gerlach berendezés pontos analogonját kapjuk. Emellett rámutattam, hogy ez a hálózat – attól függően, hogyan választjuk meg a spin-pálya kölcsönhatás erősségét a gyűrűkben – nagyon változatos spintranszformációs tulajdonságokkal rendelkezik [T2, T3].
3. Több gyűrűből álló, összetett rendszerek esetén különösen élesen merül föl az elektronok interferenciaképességének a kérdése. Ezt vizsgálandó, a modell továbbfejlesztéseként mesterségesen szórócentrumokat helyeztem a különböző funkciókat megvalósító hálózatokba. A szórási folyamatok szerepének a növekedése a koherencia fokozatos eltűné-



sét eredményezte. A hálózatok eredeti funkciójának ezzel párhuzamos gyengülését célszerűen megválasztott mérőszámok segítségével vizsgáltam. Eredményeim azt mutatják, hogy a 2. tézispontban leírt rendszerek funkcionalitása egészen addig megmarad, amíg a hálózat vezetőképessége számottevően nem csökken. A hőmérséklet emelkedésével hasonló eredményt kaptam [T4].

4. Lokalizált spinek és külső mágneses tér kölcsönhatása kapcsán a dekoherencia szerepét vizsgáltam egy olyan periodikusan gerjesztett kétnívós rendszerben, ami megfelel a molekuláris mágnesek egy rezonanciájának. Azt az általános eredményt kaptam, hogy ekkor a rendszer periodikus Floquet állapotok inkohereus összege felé tart. Elegendően hosszú idő után a hiszterézisgörbékét már pusztán ezek az állapotok határozzák meg, ugyanakkor az irányukba tartó konvergencia időállandója függ a dekoherencia folyamatának a sebességétől.

Kidolgoztam egy hatékony numerikus módszert a mágneses szempontból fontos spinek dinamikájának a kiszámítására a teljes 21 dimenziós téren ( $S=10$ ) is, relaxációs folyamatok és időfüggő külső mágneses tér jelenlétében. A  $Mn_{12}$ -Ac molekula paramétereit használva megmutattam, hogy ha a mágneses tér változási sebessége a kísérletekben is alkalmazott  $kT/s$  tartományba esik, akkor a mágneszettségi görbékben látható ugrások kétnívós rezonanciáknak felelnek meg, de ezek az átmenetek csak korlátozott pontossággal írhatók le a hagyományos Landau-Zener-Stückelberg modellel. A numerikusan egzakt számítások segítségével azt is megmutattam, hogy a vizsgált paramétertartományban a dekoherencia fontos szerepet játszik, annak erőssége a mágneszettség mérhető ugrásainak a magasságát befolyásolja [T5, T6].

5. Széles tiltott sávval rendelkező félvezetők és nagy intenzitású lézermimpulzusok kölcsönhatásnak a leírására olyan modellt fejlesztettem ki, amely figyelembe veszi az elektronok fononokon való szóródását is, amely gyakran a domináns relaxációs folyamat. A fény-anyag kölcsönhatást hossz mértékben felírva, eredményeim szerint az erős lézertér képes az elektronokat a reciproktérben az első Brillouin zóna határán túl

ra elmozdítani. Ezek az akár többszörös dinamikai Bloch-oszcillációk realiztikusan erős elektron-fonon kölcsönhatás esetén is fellépnek. A kísérleti eredményekkel összhangban azt kaptam, hogy a lézerimpulzus által elmozdított összes előjeles töltésmennyiség függ a gerjesztő impulzus térerősségének a pontos időbeli lefutásától, a vivő-burkoló fázis függvényében oszcilláló viselkedést mutat. Számításaim szerint ezeknek az oszcillációknak a maximumai eltolódnak a gerjesztő impulzus intenzitásának a növelése esetén, ami a dinamikai Bloch-oszcillációk mérhető következménye [T7].

6. A magasrendű felharmonikusok tömbi szilárdtestekben való keltésével kapcsolatban a folyamat elvi hátterét érintő interpretációs kérdéseket vizsgáltam. Két, gyakran használt elektromágneses mérték felhasználásával meghatároztam az anyagi válasz sávokon belüli („áramszerű”) és sávok közötti („polarizációszerű”) komponensét. Ezek a komponensek fizikailag egy tőről fakadnak, ugyanannak az áramsűrűség operátornak különböző mátrixelemeiről van szó, így összegük mértékinvariáns. Ezzel szemben analitikus úton megmutattam, hogy bármennyire intuitív is a teljes áram szétbontása, a fenti két komponens külön-külön nem mértékinvariáns. Ezt az eredményt numerikusan is igazoltam, továbbá megmutattam, hogy a teljes áramsűrűség figyelembevételével kiszámított magasfelharmonikus spektrumok a kísérleti eredményekkel kvalitatív egyezést mutatnak [T8].

## 5. Az eredmények hatása, kitekintés

Kvantumosan viselkedő elektronok különböző geometriájú hálózatokban való mozgásával kapcsolatban a legjelentősebb visszhangot az 1. és 2. tézispont alapjául szolgáló [T1–T3] munkák keltették. Ezeken az eredményeken kívül a problémakört még számos további szempontból is megvizsgáltuk [E2–E5, E7–E9, E13]. Többek között megmutattuk, hogy kvantumgyűrűk segítségével a kvantumos bolyongás is realizálható [E5], illetve hogy négyzetes hálózatok magashőmérsékletű vezetőképessége a spin-pálya kölcsönhatás erősségének a változtatásával kontrollálható [E9]. Ehhez a területhez kapcsolódóan témavezetésemmel két *summa cum laude* minősítéssel megvédett PhD dolgozat született (Kálmán Orsolya 2009., a társ-témavezető Benedict Mihály, és Szaszko-Bogár Viktor, 2015.) Jelenleg két doktorandusz dolgozik ehhez nagyon hasonló, de időfüggő kérdéseken, amikor az áramokat létrehozó külső gerjesztést lézerezimpulzus hozza létre [E17, E18]. Ez még viszonylag új területnek tekinthető, ugyanakkor a statikus terekkel befolyásolt, spinfüggő vezetési jelenségek vizsgálata nemzetközi szinten még mindig intenzíven kutatott témának számít [19].

Molekuláris mágnesek kapcsán az ismertetett eredmények mellett megvizsgáltuk azt a kérdést is, hogy a mágneses átmeneteket kísérő, mikrohullámú tartományba eső sugárzást [20, 21] milyen mechanizmus kelti. A kísérleti paraméterek figyelembevételével arra jutottunk, hogy itt leginkább egy mézer-szerű effektusról van szó [E1], nem pedig a Dicke-féle [22] szupersugárzásról [23]. Az elméleti leírást illetően az általunk használt effektív spin Hamilton-operátoron alapuló módszert még mindig alkalmazzák, főként kísérletek értelmezésénél [24]. Az elméleti jellegű számításoknál ezt a modellt ma már gyakran egészíti ki valamilyen szofisztikáltabb módszer [25, 26].

Pillanatnyilag túlzás lenne azt állítani, hogy a 6. tézispontban összefoglalt eredmények gyökeresen és azonnal megváltoztatták volna a lézerfizikus közösség gondolkodásmódját a sávon belüli illetve azok közötti áramokkal kapcsolatban, ugyanakkor mindenképpen elindítottak egyfajta diszkussziót. A hivatkozások között van pl. egy P. Corkum csoportjából érkező javaslat [27], aminek az a lényege, hogy ha ragaszkodunk a kétféle áram szétválasztásához,

*AZ EREDMÉNYEK HATÁSA*

---

akkor válasszunk egy meghatározott mértéket (konkrétan a hossz mértéket a vektorpotenciál hiánya miatt), és az abban kapott eredményeket használjuk más mértékekben is, a megfelelő mértéktranszformáció felhasználásával. Fontos független eredmény továbbá, hogy a sávon belüli és sávok közötti áram szétválasztásának mértékfüggő mivolta nem csupán egyrészecke képben igaz [28]. A 6. tézispontban bemutatott analitikus számítások alátámasztására kidolgozott numerikus modell önmagában is hasznosnak bizonyult, kisebb változtatásokkal alkalmas volt arra, hogy kvalitatív értelmezést nyújtson a szegedi ELI-ALPS intézetben mért első kísérleti eredmények egyikéhez [E20].

A jelen tézisfüzetben összefoglalt munkának a központi koncepciója a szemiklasszikus közelítés volt, azaz amikor a kvantumosan kezelt anyagi rendszert befolyásoló külső tereket klasszikusan írtuk le. Vannak azonban olyan esetek, amikor csak a teljesen kvantált modell ad megfelelő leírást. Nagyintenzitású elektromágneses terek esetén a magas fotonszám miatt nem szokás a mező kvantált leírását alkalmazni, ugyanakkor kísérleti eredmények utalnak arra, hogy még a magasfelharmonikus-keltés intenzitástartományában is vannak csak ilyen módon értelmezhető effektusok [E20, 29]. Ilyen erős terekkel kapcsolatban – néhány fontos korai eredménytől [30, 31] eltekintve – az elméleti leírás eléggé hiányos, és jelenleg is folyó kutatásaink ezt a hiányt igyekeznek betölteni [E14, E17, E18, E21, E22].

## A tézispontokhoz felhasznált publikációk

- [T1] P. Földi, B. Molnár, M. G. Benedict és F. M. Peeters: „Spintronic single-qubit gate based on a quantum ring with spin-orbit interaction”, *Phys. Rev. B* **71** (2005.), 033309.
- [T2] P. Földi, O. Kálmán, M. G. Benedict és F. M. Peeters: „Quantum rings as electron spin beam splitters”, *Phys. Rev. B* **73** (2006.), 155325.
- [T3] P. Földi, O. Kálmán, M. G. Benedict és F. M. Peeters: „Networks of quantum nanorings: Programmable spintronic devices”, *Nano. Lett.* **8** (2008.), 2556.
- [T4] P. Földi, O. Kálmán és F. M. Peeters: „Stability of spintronic devices based on quantum ring networks”, *Phys. Rev. B* **80** (2009.), 125324.
- [T5] P. Földi, M. G. Benedict és F. M. Peeters: „Dynamics of periodic anticrossings: Decoherence, pointer states, and hysteresis curves”, *Phys. Rev. A* **77** (2008.), 013406.
- [T6] P. Földi, M. G. Benedict, J. M. Pereira és F. M. Peeters: „Dynamics of molecular nanomagnets in time-dependent external magnetic fields: Beyond the Landau-Zener-Stückelberg model”, *Phys. Rev. B* **75** (2007.), 104430.
- [T7] P. Földi, M. G. Benedict és V. S. Yakovlev: „The effect of dynamical Bloch oscillations on optical-field-induced current in a wide-gap dielectric”, *New J. Phys.* **15** (2013.), 063019.
- [T8] P. Földi: „Gauge invariance and interpretation of interband and intraband processes in high-order harmonic generation from bulk solids”, *Phys. Rev. B* **96** (2017.), 035112.

**A PhD fokozat megszerzése óta született, a tézispontokhoz nem használt jelentősebb egyéb közlemények**

- [E1] M. G. Benedict, P. Földi és F. M. Peeters, *Phys. Rev. B* **72** (2005.), 214430.
- [E2] O. Kálmán, P. Földi, M. G. Benedict és F. M. Peeters, *Physica E* **40** (2008.), 567.
- [E3] O. Kálmán, P. Földi, M. G. Benedict és F. M. Peeters, *Phys. Rev. B* **78** (2008.), 125306.
- [E4] P. Földi, M. Benedict, O. Kálmán és F. Peeters, *Phys. Rev. B* **80** (2009.), 165303.
- [E5] O. Kálmán, T. Kiss és P. Földi, *Phys. Rev. B* **80** (2009.), 035327.
- [E6] P. Földi, *Fizikai Szemle* **59** (2009.), 378.
- [E7] P. Földi, V. Szaszko-Bogár és F. M. Peeters, *Phys. Rev. B* **82** (2010.), 115302.
- [E8] P. Földi, O. Kálmán és M. Benedict, *Phys. Rev. B* **82** (2010.), 165322.
- [E9] P. Földi, V. Szaszko-Bogár és F. Peeters, *Phys. Rev. B* **83** (2011.), 115313.
- [E10] L. Szabó, M. Benedict, A. Czirják és P. Földi, *Phys. Rev. B* **88** (2013.), 075438.
- [E11] P. Földi, I. Márton, N. Német, V. Ayadi és P. Dombi, *Appl. Phys. Lett* **106** (2015.), 013111.
- [E12] P. Dömötör, P. Földi, M. Benedict, B. Shore és W. Schleich, *New J. Phys.* **17** (2015.), 023044.
- [E13] V. Szaszko-Bogár, F. Peeters és P. Földi, *Phys. Rev. B* **91** (2015.), 235311.
- [E14] Á. Gombkötő, A. Czirják, S. Varró és P. Földi, *Phys. Rev. A* **94** (2016.), 013853.
- [E15] L. Szabó, M. Benedict és P. Földi, *Phys. Rev. A* **96** (2017.), 063419.
- [E16] P. Földi, *Fizikai Szemle* **67** (2017.), 345.

- [E17] I. Magashegyi, L. Szabó és P. Földi, *J. Opt. Soc. Am. B* **35** (2018.), A116.
- [E18] P. Mike, L. Szabó és P. Földi, *J. Russ. Las. Res.* **39** (2018.), 465.
- [E19] A. Nayak, M. Dumergue, S. Kühn, S. Mondal és tsai., *Phys. Rep.* **833** (2019.), 1.
- [E20] N. Tsatrafyllis, S. Kühn, M. Dumergue, P. Földi és tsai., *Phys. Rev. Lett.* **122** (2019.), 193602.
- [E21] Á. Gombkötő, S. Varró, P. Mati és P. Földi, *Fizikai Szemle* **70** (2020.), 163.
- [E22] Á. Gombkötő, S. Varró, P. Mati és P. Földi, *Phys. Rev. A* **101** (2020.), 013418.

## Irodalomjegyzék

- [1] J. Nitta, T. Akazaki, H. Takayanagi és T. Enoki: „Gate Control of Spin-Orbit Interaction in an Inverted In GaAsInAlAs Heterostructure”, *Phys. Rev. Lett.* **78** (1997.), 1335.
- [2] J. Nitta, T. Koga és H. Takayanagi: „Interference of Aharonov-Bohm ring structures affected by spin-orbit interaction”, *Physica E* **12** (2002.), 753.
- [3] F. E. Meijer, A. F. Morpurgo és T. M. Klapwijk: „One-dimensional ring in the presence of Rashba spin-orbit interaction: Derivation of the correct Hamiltonian”, *Phys. Rev. B* **66** (2002.), 033107.
- [4] B. Molnár, F. M. Peeters és P. Vasilopoulos: „Spin-dependent magnetotransport through a ring due to spin-orbit interaction”, *Phys. Rev. B* **69** (2004.), 155335.
- [5] W. Wernsdorfer: „Classical and quantum magnetization reversal studied in nanometer-sized particles and clusters”, *Adv. Chem. Phys.* **118** (2001.), 99.

- [6] D. Gatteschi, R. Sessoli és J. Villain: *Molecular Nanomagnets*. Oxford University Press, 2006.
- [7] L. D. Landau: „Zur Theorie der Energieübertragung II”, *Phys. Z. Sowjetunion* **2** (1932.), 46.
- [8] C. Zener: „Non-adiabatic crossing of energy levels”, *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A* **137** (1932.), 696.
- [9] E. C. G. Stückelberg: „Theorie der unelastischen Stösse zwischen Atome”, *Helv. Phys. Acta* **5** (1932.), 369.
- [10] A. Schiffrin, T. Paasch-Colberg, N. Karpowicz, V. Apalkov és tsai.: „Optical-field-induced current in dielectrics”, *Nature* **493** (2013.), 70.
- [11] F. Krausz és M. I. Stockman: „Attosecond metrology: from electron capture to future signal processing”, *Nature Photonics* **8** (2014.), 205.
- [12] M. Ferray, A. L’Huillier, X. F. Li, L. A. Lompre, G. Mainfray és C. Manus: „Multiple-harmonic conversion of 1064 nm radiation in rare gases”, *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* **21** (1988.), L31.
- [13] A. L’Huillier és P. Balcou: „High-order harmonic generation in rare gases with a 1-ps 1053-nm laser”, *Phys. Rev. Lett.* **70** (1993.), 774.
- [14] G. Farkas és C. Tóth: „Proposal for attosecond light pulse generation using laser induced multiple-harmonic conversion processes in rare gases”, *Physics Letters A* **168** (1992.), 447.
- [15] L. Thomas, F. Lioni, R. Ballou, D. Gatteschi, R. Sessoli és B. Barbara: „Macroscopic quantum tunnelling of magnetization in a single crystal of nanomagnets”, *Nature (London)* **383** (1996.), 145.
- [16] J. R. Friedman, M. P. Sarachik, J. Tejada és R. Ziolo: „Macroscopic measurement of resonant magnetization tunneling in high-spin molecules”, *Phys. Rev. Lett.* **76** (1996.), 3830.
- [17] S. Ghimire, A. D. DiChiara, E. Sistrunk, P. Agostini, L. F. DiMauro és D. A. Reis: „Observation of high-order harmonic generation in a bulk crystal”, *Nat. Physics* **7** (2011.), 138.



- [18] S. Griffith: „A free-electron theory of conjugated molecules. Part 1: Polycyclic hydrocarbons”, *Trans. Faraday Soc.* **49** (1953.), 345.
- [19] D. Frustaglia és J. Nitta: „Geometric spin phases in Aharonov-Casher interference”, *Solid State Comm.* **311** (2020.), 113864.
- [20] J. Tejada, E. M. Chudnovsky, J. M. Hernandez és R. Amigó: „Electromagnetic radiation produced by avalanches in the magnetization reversal of Mn<sub>12</sub> acetate”, *Appl. Phys. Lett.* **84** (2004.), 2373.
- [21] A. Hernandez-Minguez, M. Jordi, R. Amigo, A. Garcia-Santiago, J. M. Hernandez és J. Tejada: „Low-temperature microwave emission from molecular clusters”, *Europhys. Lett.* **69** (2005.), 270.
- [22] R. M. Dicke: „Coherence in spontaneous radiation processes”, *Phys. Rev.* **93** (1954.), 439.
- [23] M. G. Benedict, A. M. Ermolaev, V. A. Malyshev, I. V. Sokolov és E. D. Trifonov: *Superradiance*. IOP, Bristol, 1996.
- [24] F.-S. Guo, B. M. Day, Y.-C. Chen, M.-L. Tong, A. Mansikkamäki és R. A. Layfield: „Magnetic hysteresis up to 80 kelvin in a dysprosium metallocene single-molecule magnet”, *Science* **362** (2018.), 1400.
- [25] K. Wrześniewski és I. Weymann: „Time-dependent spintronic anisotropy in magnetic molecules”, *Phys. Rev. B* **101** (2020.), 245434.
- [26] E. Garlatti, L. Tesi, A. Lunghi, M. Atzori és tsai.: „Unveiling phonons in a molecular qubit with four-dimensional inelastic neutron scattering and density functional theory”, *Nature Comm.* **11** (2020.), 1751.
- [27] G. Ernotte, T. J. Hammond és M. Taucer: „A gauge-invariant formulation of interband and intraband currents in solids”, *Phys. Rev. B* **98** (2018.), 235202.
- [28] L. Yue és M. B. Gaarde: „Structure gauges and laser gauges for the semiconductor Bloch equations in high-order harmonic generation in solids”, *Phys. Rev. A* **101** (2020.), 053411.

- [29] N. Tsatrafyllis, I. K. Kominis, I. A. Gonoskov és P. Tzallas: „High-order harmonics measured by the photon statistics of the infrared driving-field exiting the atomic medium”, *Nat. Comm.* **8** (2017.).
- [30] J. Bergou és S. Varró: „Nonlinear scattering processes in the presence of a quantised radiation field. I. Non-relativistic treatment”, *J. Phys. A: Math. Gen.* **14** (1981.), 1469.
- [31] J. Bergou és S. Varró: „Nonlinear scattering processes in the presence of a quantised radiation field. II. Relativistic treatment”, *J. Phys. A: Math. Gen.* **14** (1981.), 2281.