

## Szakmai zárójelentés

OTKA nyilvántartási szám: **D 46043**

Témavezető neve: Földi Péter Dr.

Vezető kutató neve: Benedict Mihály Dr.

Téma címe: Környezetükkel kölcsönható kvantumrendszerek: Dekoherencia és a kvantumos összefonódottság eltűnése

A kutatás időtartama: 2003. október 1. – 2006. szeptember 30.

A kutatási témában elvégzett munka és az elért eredmények ismertetése:

Az OTKA posztdoktori ösztöndíj által támogatott kutatási időszakban elért eredmények két csoportra oszthatók. A kvantumoptika területén szerzett korábbi tapasztalatokra alapozva dipól-dipól kölcsönhatással csatolt kétállapotú atomok lineáris láncát vizsgáltuk [1-4]. Emellett az ösztöndíj első két évében megszerzett új ismeretek lehetővé tették, hogy fontos eredményeket érjünk el olyan szilárdtest rendszerek kutatásában is, amelyekben az elektronok spinje játssza a lényegi szerepet [5-13]. Mindkét kutatási terület szorosan kapcsolódik a kvantumos információfeldolgozás problémájához, annak gyakorlati megvalósíthatóságát vizsgálja. Emellett közös az a jellemző is, hogy a vizsgált rendszerek több szabadsági fokkal bírnak, amelyek között klasszikusan elképzelhetetlenül erős kvantumos korreláció, azaz összefonódottság épülhet fel.

Kétállapotúnak tekinthető atomok dipól-csatolt láncában két, tetszőlegesen kiválasztható atom állapotának a kvantumos összefonódottságát vizsgáltuk a szabad elektromágneses mező, mint környezet jelenlétében [1,2]. Megmutattuk, hogy ebben az esetben az atompárok összefonódottságának a dinamikája erősen függ a köztük lévő távolságtól: Távoli atomok lényegében függetlenül viselkednek, a párok összefonódottsága monoton módon csökken azon az időskálán, amit a magányos atomok relaxációs ideje határoz meg. Ha a szomszédos atomok távolsága összemérhetővé válik az atomi átmenettel rezonáns elektromágneses sugárzás hullámhosszával, akkor a párok összefonódottságának az eltűnése annál gyorsabb, minél erősebb a tagok közt a csatolás. A rezonáns hullámhossznál kisebb atomi távolságok esetén már arra is van lehetőség, hogy bizonyos atompárok között összefonódottság épüljön fel.

A párok összefonódottságán túl a teljes rendszerben észlelhető korrelációk külön figyelmet érdemelnek, bár az összefonódottság mértéke ebben az esetben önmagában is összetett kérdés. Egy alkalmas, viszonylag könnyen kiszámítható mérték [MW02] segítségével megmutattuk, hogy a rendszer globális – minden atomot érintő – összefonódottságára szintén igaz, hogy elegendően kicsi atomi távolságok esetén a dipól-dipól kölcsönhatások következtében növekedhet is [3,4].

A kvantumoptikai és a nyílt rendszerekkel kapcsolatos tapasztalatainkra alapozva elkezdtük a nagy eredő spinnel rendelkező molekulák (nanomágnesek) vizsgálatát. Ezek az új típusú mágneses anyagok [GS06] a múlt század utolsó évtizedében kerültek az érdeklődés homlokterébe, szintetizálásuk és kristályos formában való előállíthatóságuk tudománya sem tekint vissza tízévesnél lényegesen hosszabb múltra. Érdekességük fizikai szempontból elsősorban az, hogy alapvető kvantumos jelenségek – mint például az alagúteffektus – kísérleti vizsgálatát teszik lehetővé, ugyanakkor a szilárdtestekben elkerülhetetlen relaxációs folyamatok miatt úgy is tekinthetünk rájuk, mint a klasszikus és kvantummechanika határán található rendszerekre. Ezt hangsúlyozza az is, hogy a legtöbb esetben az egyes – meglehetősen komplex – molekulák egymástól lényegében független viselkedése felelős a rendszer tulajdonságaiért, így a releváns objektumok mérete a nanométeres skálán mozog.

Első eredményünk nanomágnesek kristályaival kapcsolatban annak a kiszámítása, hogy a kísérletekben észlelt [TC04], a gyakorlati felhasználás szempontjából is lényeges THz tartományba eső sugárzás tulajdonságait hogyan befolyásolja, ha üregrezonátor veszi körül a mintát. Ekkor az történik, hogy a kristály által generált sugárzás visszahat a kibocsátó rendszerre, és így erős csatolás jöhet létre a rezonáns üregmódus és a minta között. Megmutattuk, hogy a kristályrács jelentette környezet által előidézett relaxációs folyamatok időállandóját figyelembe véve ez a sugárzás a korábbi elgondolásokkal [CG02] ellentétben nem szuperradiancia [BE96], hanem inkább mézerszerű folyamatról van szó [5]. Számításaink alapján a sugárzásban fellépő csúcsok kísérletileg tapasztalt eltolódása mézereffektus esetén is fennáll. Modellünk alapján képesek voltunk a legvalószínűbben sugárzó átmenet meghatározására is [6,7].

Ezek után a spin szabadsági fok, külső mágneses tér és a fononkörnyezet kapcsolatát vizsgáltuk a mágneses alagutazás problémáján keresztül. Ez a jelenség kísérletileg úgy jelentkezik, hogy a hiszterézis görbe lépcsőszerű viselkedést mutat [TL96]. Az ugrások a külső mágneses tér azon értékeinél találhatók, ahol a spin szabadsági fokkal kapcsolatos két energiaszint a Zeeman kölcsönhatás révén közel egyenlővé válik a kristályrács által létrehozott kétfoldos (effektív) potenciál két különböző oldalán. Ebben az értelemben szokás rezonáns mágneses alagutazásról beszélni. Elméleti szempontból ez egy igen gazdag terület, a nagy spin miatt relatívan sok mágneses nívó (az  $Mn_{12}$ -Ac /manganacetát/ molekulára pl.  $S=10$ ) a köztük lévő különböző erősségű csatolások miatt igen összetett viselkedést mutat a külső mágneses tér függvényében [8]. Kísérleti adatokra illesztett paraméterekkel leírt effektív Hamilton operátor segítségével elvégeztük a spin szabadsági fok dinamikájának a modellezését, és a számított hiszterézis görbe jó egyezést mutatott a kísérleti eredményekkel. Mivel az általunk kifejlesztett numerikus eljárás az összes spin állapot időfejlődését követte, olyan különbségekre tudunk rámutatni a korábbi, kétnívós közelítésekhez képest, amelyek kísérletileg is mérhetők. Megmutattuk azt is, hogy ha kristályrács fononjait, mint a spin szabadsági fok környezetét figyelembe vesszük, akkor a hiszterézis görbe éles ugrásai simábbakká válnak, és magasságuk is csökken [9].

Síkbeli, félvezető gyűrűk pusztán kvantummechanikai szempontból is igen érdekesek, hiszen ha egy vezetéken keresztül elektronokat injektálunk egy gyűrűbe, úgy, hogy azok egy másik vezetéken át távozhatnak, akkor a bejövő elektron hullámfüggvénye szükségképpen kettéválik, majd interferál önmagával. Ez az interferencia a fáziskülönbség függvényében destruktív vagy konstruktív, így az elektromágneses hullámvezetőkhez hasonlóan a rendszeren való áthaladás valószínűsége függ a hullámhossztól, azaz az energiától. Ma már léteznek olyan félvezető anyagok, melyekben az elektron szabad úthossza lényegesen hosszabb a bevett eljárásokkal létrehozható gyűrűk átmérőjénél, ami jellemzően a mikrométeres tartományba esik. Ezek a félvezető gyűrűk – amellet tehát, hogy a rajtuk átmenő elektrontranszport leírására kvantummechanikai módszereket kell alkalmaznunk – azzal a fontos tulajdonsággal is rendelkeznek, hogy a bennük fellépő spin-pálya kölcsönhatás [R60] erőssége külső elektromos mezővel változtatható [NM99]. Így ez az elrendezés alkalmas az elektronok spinjének kontrollált megváltoztatására.

Vékony gyűrűkre érvényes számításaink azt mutatják, hogy a paraméterek megfelelő, de még a kísérletileg elérhető intervallumba eső választásával alapvető kvantumos logikai kapuk realizálhatók [10]. Konkrétan a kvantumos információfeldolgozás szempontjából kiemelt fontosságú egy kvantum bitre ható kapuk (X, Y, Z, valamint Hadamard) mindegyike létrehozható néhány gyűrű egymás után kapcsolásával úgy, hogy a teljes rendszer mérete még bőven kisebb, mint a napjainkban már elérhető koherenciahossz. Fontos megjegyezni, hogy a fenti transzformációk meghatározott paraméterértékek esetén úgy is létrehozhatók, hogy a reflexiók valószínűség (azaz a transzmissziós logikai kapuk vesztesége) nulla.

Abban az esetben, ha az elektronok két vezetéken át is távozhatnak a gyűrűből, a két kimeneten különböző spintranszformációk realizálódnak. Számításaink legérdekesebb eredménye az, hogy ekkor a rendszer a Stern-Gerlach berendezéshez nagyon hasonló funkciót is elláthat, azaz polarizálatlan bemenő elektronok a kimeneteken már spinpolarizáltak lesznek, még hozzá a két vezetékben más-más irányban [11]. Megmutattuk, hogy megfelelő paraméterválasztás esetén az ilyen típusú működés is lehetséges reflexiók veszteségek nélkül. Megvizsgáltuk azt a kérdést is, hogy a spinpolarizációs tulajdonság a térbeli és a spin szabadsági fok összefonódottságával milyen kapcsolatban van. Azt találtuk, hogy a Stern-Gerlach szerű működés esetén a nem található ilyen mély, különböző szabadsági fokok közötti [HL03] kvantumkorreláció, azonban létezik olyan eleve polarizált bemenet, ami maximális ilyen jellegű összefonódottságot ad a két kimenő vezetéken [12]. Visszatérve a matematikai módszerekkel kimutatott polarizációs effektusra, megkerestük a jelenség fizikai okát is. Eredményeink szerint ekkor a legfontosabb szerepet a térbeli interferencia játssza, ami egy adott kimenő vezeték és a gyűrű érintkezési pontjában egy meghatározott spin irányra destruktívnak adódik, míg az ortogonális irányra konstruktív, így a kimeneten ennek a második iránynak megfelelő tiszta spin állapot jelenik meg [13].

A kutatás ezen iránya az Antwerpeni Egyetem Prof. F. M. Peeters által vezetett elméleti szilárdtestfizikai csoportjával való ígéretes együttműködés eredménye.

A fenti, jelentős érdeklődésre számot tartó, kísérleti vonatkozásokkal is rendelkező elméleti úton nyert kutatási eredmények rangos nemzetközi konferenciák és folyóiratok révén jutottak a szakmai közvélemény elé. A kutatási témák mindegyike olyan jellegű, hogy továbbra is sok a nyitott kérdés, így az OTKA posztdoktori ösztöndíj által lehetővé tett vizsgálatok folytatása mindenképpen sok lehetőséget rejt magában.

### Hivatkozások:

- [1] T. Serényi, **P. Földi**, A. Czirják, M. G. Benedict, *Kvantumelektronika* 2003, 33 (2003).
- [2] M. G. Benedict, **P. Földi**, A. Czirják, T. Serényi, *J. Opt. B* **6**, S3-S6 (2004).
- [3] **P. Földi**, M. G. Benedict, T. Serényi, A. Czirják, SPIE 2<sup>nd</sup> Symposium on Fluctuation and Noise, szóbeli konferencia előadás (Földi P.) és cikk a kiadványban (SPIE Proceedings **5468**, 306) (2004).
- [4] **P. Földi**, M.G. Benedict, T. Serényi, A. Czirják, *Fluct. Noise Lett.* **4**, L511 (2004).
- [5] M. G. Benedict, **P. Földi**, F. M. Peeters, *Phys. Rev. B* **72** (21), 214430 (2005); továbbá 12th Central European Workshop on Quantum Optics, Vienna (szóbeli előadás, Földi P.).
- [6] M. G. Benedict, **P. Földi**, F. M. Peeters, *J. Phys.: Conf. Ser.* **36**, 12 (2006).
- [7] Benedict Mihály, **Földi Péter**, *A kvantumoptika és -elektronika legújabb eredményei* (könyvfejezet) (Szegedi Tudományegyetem, 2006. 119-131).
- [8] **P. Földi**, M. G. Benedict, F. M. Peeters, *Acta Phys. Hung. B (Heavy Ion Physics)* **26**, 47 (2006).
- [9] **P. Földi**, M. G. Benedict, J. M. Pereira, F. M. Peeters, cond-mat/0606763 (elküldve a *Phys. Rev. B*-be).
- [10] **P. Földi**, B. Molnár, M.G. Benedict, F. M. Peeters, *Phys. Rev. B* **71** (3), 033309 (2005); valamint konferenciákon: 11th Central European Workshop on Quantum Optics, Trieste (szóbeli meghívott előadás, Benedict Mihály), Decoherence, Information and Geometrical Phases in Complex Systems, Trieste (poszter, Földi Péter), Workshop on Electronic Properties of Quantum Nanostructures, Antwerpen (szóbeli előadás, Földi Péter).

- [11] **P. Földi**, O. Kálmán, M. G. Benedict, F. M. Peeters, *Phys. Rev. B* **73**, 155325 (2006); ezekről az eredményekről a témavezető szóbeli előadást tartott Kolozsváron egy NATO Advanced Study Institute konferencián.
- [12] O. Kálmán, **P. Földi**, M. G. Benedict, *Open systems & information dynamics* **13**, 455-462 (2006).
- [13] O. Kálmán, **P. Földi**, M. G. Benedict, F. M. Peeters, quant-ph/0612183 (elküldve a *New J. of Phys.*-be).
- [BE96] M. G. Benedict, A. M. Ermolaev, V. A. Malyshev, I. V. Sokolov, E. D. Trifonov, *Superradiance* (IOP Bristol, 1996).
- [CG02] E. M. Chudnovsky, D. A. Garanin, *Phys. Rev. Lett.* **89**: 157201 (2002).
- [GS06] D. Gatteschi, R. Sessoli, J. Villain: *Molecular nanomagnets* (Oxford Univ. Press, 2006).
- [HL03] Y. Hasegawa, R. Loidl, G. Badurek, M. Baron, H. Rauch, *Nature* **425**, 445 (2003).
- [MW02] D. A. Meyer, N. Wallach, *J. Math. Phys.* **43** (9): 4273 (2002).
- [NM99] J. Nitta, F. E. Meyer, H. Takayanagi, *Appl. Phys. Lett.* **75**, 695 (1999).
- [R60] E. I. Rashba, *Fiz. Tverd. Tela* **2**, 1224 (*Sov. Phys. Solid State* **2**, 1109) (1960).
- [TL96] L. Thomas, F. Lioni, R. Ballou, D. Gatteschi, R. Sessoli, B. Barbara, *Nature* **383**, 145 (1996).
- [TC04] J. Tejada, E. M. Chudnovsky, J. M. Hernandez, R. Amigo, *Appl. Phys. Lett.* **84**, 2373 (2004).

Szeged, 2006 . december 27.

Földi Péter